

TESIS

**ESTUDIO Y OPTIMIZACION DE LAS
COMUNICACIONES ENTRE PROCESADORES
PARA EL CONTROL DE SISTEMAS
COMPLEJOS EN TIEMPO REAL**

por

JOAQUIN LUQUE RODRIGUEZ

Ingeniero Industrial por la E.T.S.I.I.

de la Universidad de Sevilla

presentada en la

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

de la

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

para la obtención del

GRADO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL

SEVILLA, ABRIL DE 1986.

TESIS

ESTUDIO Y OPTIMIZACION DE LAS
COMUNICACIONES ENTRE PROCESADORES
PARA EL CONTROL DE SISTEMAS
COMPLEJOS EN TIEMPO REAL

por

JOAQUIN LUQUE RODRIGUEZ

Ingeniero Industrial por la E.T.S.I.I.

de la Universidad de Sevilla

presentada en la

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

de la

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

para la obtención del

GRADO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL

SEVILLA, ABRIL DE 1986.

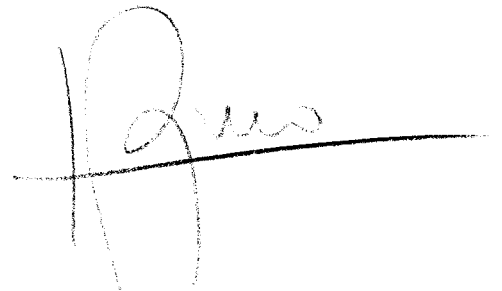
TESIS DOCTORAL

ESTUDIO Y OPTIMIZACION DE LAS COMUNICACIONES ENTRE PROCESADORES
PARA EL CONTROL DE SISTEMAS COMPLEJOS EN TIEMPO REAL.

AUTOR: D. Joaquin Luque Rodriguez.

DIRECTOR: D. Jose Luis Calvo Borrego.

TRIBUNAL CALIFICADOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Luque', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

A mi mujer y a mis hijas que supieron
poner el contrapunto necesario.

AGRADECIMIENTOS

- A D. Jose Luis Calvo Borrego, Director de la Tesis, por su aliento, continuo apoyo y valiosas orientaciones.
- Al Departamento de Automatica y Electronica de la Escuela de Ingenieros de Sevilla por el soporte humano y material que me ha brindado.
- Al Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Andalucia Occidental por la concesion de la Beca que financio estos trabajos.
- A todas las empresas y organismos que atendieron mis consultas, entre las cuales querria destacar a la Compañia Sevillana de Electricidad que ademas me dio la oportunidad de verificar parte de las conclusiones de esta Tesis mediante datos de uno de sus sistemas de control.
- A D. Josep M. Selga Jorba de ENHER por sus consejos y eficaz colaboracion.

INDICE

1.- INTRODUCCION.	9
1.1.- Planteamiento y objetivos.	9
1.2.- Estructura.	10
2.- CONCEPTOS GENERALES.	12
2.1.- Introduccion.	12
2.2.- Topologia de la red de comunicaciones.	16
2.3.- Protocolos de comunicaciones.	26
2.3.1.- Modelo ISO.	28
2.3.2.- Tratamiento de errores.	36
2.3.2.1.- Codigos polinomicos.	37
2.3.2.2.- Control de calidad de la señal.	43
2.3.3.- Transmision de estados.	52
2.3.4.- Transmision de medidas.	55
2.3.5.- Transmision de ordenes.	59
2.3.6.- Funciones auxiliares.	60
2.4.- Sistemas de control de una red electrica.	61
2.4.1.- Perspectiva historica.	63
2.4.2.- Adquisicion de datos.	66
2.4.3.- Regulacion frecuencia-potencia.	68
2.4.4.- Estimacion de estados.	73

3.- CALIDAD DE LOS DATOS.	76
3.1.- Introduccion.	76
3.2.- Edad.	78
3.3.- Desfase.	84
3.4.- Conclusiones.	89
4.- TRANSMISION DE MEDIDAS.	92
4.1.- Introduccion.	92
4.2.- Estudio mediante series temporales.	94
4.3.- Estudio mediante transformadas en z.	99
4.4.- Tratamiento de la media de la serie.	103
4.5.- Analisis de medidas en sistemas complejos.	109
4.6.- Protocolo para transmision de medidas.	111
4.7.- Transmision de medidas en despachos electricos.	116
4.8.- Conclusiones.	127
5.- TRANSMISION DE ORDENES.	129
5.1.- Introduccion.	129
5.2.- Descripcion formal.	131
5.3.- Metodos con adicion de bits redundantes.	135
5.4.- Metodos con repeticion de mensajes.	142
5.5.- Metodos con control de calidad de la señal.	146
5.6.- Comparacion de metodos.	150
5.7.- Conclusiones.	161

6.- RESUMEN Y CONCLUSIONES.	163
BIBLIOGRAFIA.	166
APENDICE A.- Relacion de empresas consultadas.	174
APENDICE B.- Resultados del analisis y simulacion.	176
APENDICE C.- Programas realizados.	228

CAPITULO 1

1.- INTRODUCCION.

1.1.- Planteamiento y objetivos.

En las ultimas decadas el desarrollo de la Electronica ha propiciado, con la aparicion del ordenador, una revolucion tecnologica comparable a la que tuvo lugar con la invencion de la maquina de vapor. Este nuevo "artefacto" se ha extendido por casi todas las areas de nuestra ciencia, tecnica y economia removiendocimientos sociales y hasta filosofias, llegando a constituirse en algo cotidiano e imprescindible en una sociedad moderna.

A medida que se sigue avanzando en microelectronica y otras ramas afines, es mas y mas frecuente abordar la resolucion de problemas usando un conjunto de procesadores que cooperan entre si, en vez de recurrir al gran computador central que se enfrenta solo a la totalidad de la cuestion. Siguiendo a Tanenbaum, este principio fue enunciado por primera vez por Julio Cesar: "Divide y venceras". Lo cual es mas patente si cabe cuando la complejidad del problema crece.

El uso de multiples procesadores que cooperan plantea una cuestion fundamental que es el intercambio de informacion entre

ellos: las comunicaciones. Si el problema que tratamos de resolver es el control en tiempo real de sistemas complejos, ello conlleva unas características especiales de comunicaciones que son las que nos proponemos estudiar y optimizar en esta Tesis.

1.2.- Estructura.

En el capítulo 2 se presentan algunos conceptos generales, empezando por formalizar lo que entendemos por sistemas complejos, y tratando temas que nos sirvan de apoyo en los capítulos siguientes, como el modelo ISO de protocolos, el tratamiento de errores, etc.

El capítulo 3 presenta un cuerpo teórico para evaluación cuantitativa de la calidad de los datos que un procesador adquiere por comunicaciones. Aquí se presentan y aplican los conceptos de edad y desfase, obteniendo algunos resultados interesantes.

En el capítulo 4 se trata el tema de la transmisión de medidas con las particularidades que ello conlleva, elaborando unos criterios teóricos que son contrastados con datos experimentales obtenidos en sistemas reales.

El capítulo 5 se ocupa de la transmisión de ordenes en estos sistemas, con especial énfasis en el aspecto de seguridad, estudiando métodos y algoritmos alternativos que son analizados y comparados mediante técnicas de simulación.

Por ultimo el capitulo 6 resume los puntos de este trabajo y presenta las conclusiones mas interesantes a nuestro juicio.

Para la elaboracion de esta Tesis nos hemos puesto en contacto con numerosas empresas nacionales y extranjeras tratando de conseguir informacion sobre las tecnicas mas recientes en uso, consiguiendo una respuesta positiva de la mayoria de las empresas en vanguardia en el sector. Las mas significativas se recogen en el apendice A.

Dado el importante volumen de datos analizados y simulados, por razones de presentacion se incluyen en los capitulos correspondientes solo aquellas tablas y figuras mas significativas, reservandose al apendice B un tratamiento mas completo de las mismas. Asimismo, los principales programas y rutinas necesarios para la obtencion de los anteriores resultados, son recogidos en el apendice C.

CAPITULO 2

2.- CONCEPTOS GENERALES.

2.1.- Introduccion.

El termino "sistema complejo" hace uso de dos vocablos de amplio significado. En primer lugar, y siguiendo a Bertalanffy, diremos que "un sistema es un conjunto de elementos que se relacionan entre ellos y con el medio". Entenderemos por sistema complejo aquel en el que la naturaleza o numero de sus elementos, asi como las relaciones entre ellos, presentan una cierta dificultad de modelado o control. En el ambito de esta Tesis seran aquellos que necesiten de varios procesadores para su control, existiendo comunicaciones entre los mismos para lograr una correcta actuacion sobre el sistema, lo cual debe basarse en un conocimiento lo mas exhaustivo posible de su estado.

Dependiendo de la naturaleza y tamaño del sistema, variara el numero de procesadores necesarios para su control, asi como su dispersion geografica. En efecto, mientras en algunos sistemas complejos los procesadores se hallan fisicamente cercanos, en otros pueden estar a distancias de cientos o miles de kilometros. Como ejemplo de los primeros podemos señalar el caso de un robot industrial que es controlado por varios procesadores que cooperan

para la mayor eficacia del ingenio. Entre los segundos destacamos las redes de distribución de energía eléctrica con procesadores situados en centrales, subestaciones, etcetera, y que transmiten información a un centro de control que coordina el conjunto de la red. En ambos ejemplos existe un volumen importante de información que se transmite de un procesador a otro. Sin embargo dependiendo de las características del sistema, los canales de comunicación variarían grandemente en cuanto estructura, velocidad, retardos y en general prestaciones.

En esta Tesis abordamos el estudio de las comunicaciones que tienen lugar entre los múltiples procesadores que controlan un sistema complejo y en los que el canal supone un "recurso escaso" cuya optimización resulta interesante por encima frecuentemente de CPU, memoria u otros. A medida que la distancia entre procesadores es mayor, es más fácil encontrarse con canales como "recurso escaso". A este tipo de sistema pueden ajustarse algunos tales como control de redes de abastecimiento de aguas, control de plantas industriales, control de oleoductos o gaseoductos, control de edificios, etcetera, además de los mencionados con anterioridad. En el ámbito de este trabajo tomaremos como ejemplo tipo los sistemas de control de redes eléctricas al cual nos referiremos continuamente a lo largo de toda la exposición. Esto se hace tanto por razones técnicas (presentan una problemática extensa y generalizable), como por razones logísticas (experiencia concreta en este campo y oportunidad de contrastes experimentales). No obstante no se debería perder el concepto de que los problemas planteados son comunes a todos los sistemas complejos y las soluciones aportadas, o son generales, o bien son fácilmente

transplantables a otros entornos diferentes.

La figura 2.1 representa un sistema complejo general, el cual comunica directamente con varios procesadores, y estos a su vez con otros de distinto nivel jerarquico. La topologia de esta red de comunicaciones es simplemente un ejemplo, pudiendo adoptar multitud de ellas. A continuacion trataremos precisamente las diferentes posibilidades en cuanto a dicha topologia, viendo la fuerte dependencia entre la dispersion geografica del sistema que se desea controlar y la solucion topologica que se adopte.

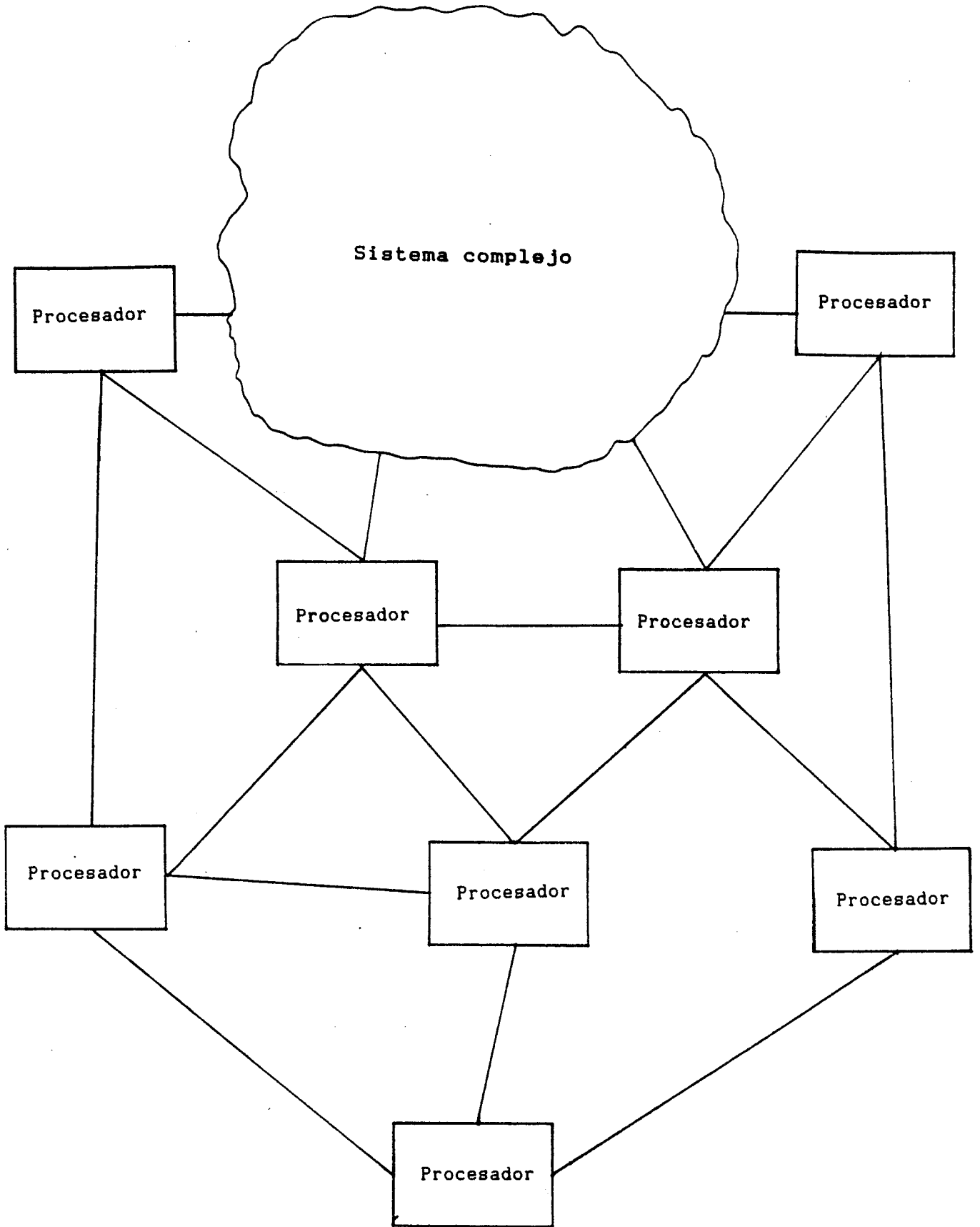


Fig. 2.1.- Equipo de control de un sistema complejo.

2.2.- Topologia de la red de comunicaciones.

No se puede dar una formulacion unica al problema de la topologia que adopta o debe adoptar la red de comunicaciones ya que dependera en gran medida del sistema concreto que se trate de controlar, del numero de procesadores, su distribucion geografica, volumen de informacion intercambiada, distribucion de funciones en la red, tecnologia de diseño del canal, etcetera. No obstante presentaremos algunas topologias tipicas entendiendo que un sistema concreto puede participar de una o varias de ellas.

En primer lugar (figura 2.2) tenemos las comunicaciones a traves de un bus para sistemas con varios procesadores que lo comparten. Ello es posible para distancias muy cortas entre los procesadores, proporcionando una alta velocidad de transmision.

Esta proximidad fisica, sin embargo, se presenta rara vez en el control de sistemas complejos. Para sistemas en el que los procesadores se puedan situar a distancias del orden de hasta 10 Kilometros, encontramos recientemente (figura 2.3) la solucion de las redes locales (LAN) en las que se alcanzan velocidades de hasta 10 Megabits por segundo. Estas redes locales suelen tener la forma de una linea ("ether") que une todos los procesadores y a la cual se accede por testeo de la portadora (CSMA). Es decir, antes de emitir un mensaje cada procesador comprueba que la linea esta libre. Debido a los retardos de propagacion de la señal es posible la colision de dos mensajes, por lo cual deben ser retransmitidos. Una de las redes locales con testeo de portadora mas extendida es la red "Ethernet".

Otra solución dentro de las redes locales es aquella que se basa en redes en anillo (figura 2.7) en la cual cada procesador está unido al siguiente y el último se une con el primero, cerrando el anillo. Entre las más conocidas de estas redes están las "redes con testigo" (token rings) en las que un patrón de bits (testigo) se pasa de un procesador al siguiente, excepto en el caso de que alguno de ellos tenga algún mensaje que enviar, en cuyo caso retiene el testigo, envía el mensaje y al terminar, repone el testigo en el anillo.

La posibilidad de uso de cualquiera de las dos soluciones de redes locales presentadas implica que las distancias no sean grandes (inferiores a 10 Kilómetros), pues en el caso contrario, aumentan los retardos de propagación y se pierden las buenas características que presentan dichas redes. Vemos pues que la distancia entre los procesadores, o lo que es lo mismo, la dispersión geográfica del sistema a controlar, supone un elemento decisivo en el diseño de la red de comunicaciones. Por ello, cuando las distancias son superiores, se debe acudir a otras técnicas de transmisión que incluyen soportes tales como líneas telefónicas, equipos de radio, fibra óptica, transmisión vía satélite, etc. Estos canales pueden tener características half-duplex (comunicación alternativa en uno u otro sentido) o full-duplex (comunicación simultánea en ambos sentidos).

Mientras que en distancias cortas hemos visto que los canales permiten una comunicación a gran velocidad, ello deja de ser así en mayores distancias. En efecto, las técnicas de transmisión enunciadas para distancias medias y grandes tienen en común que,

o bien tienen poco ancho de banda (caso de líneas telefónicas), o bien teniendo gran ancho de banda, este debe ser repartido entre múltiples canales mediante técnicas de multiplexaje en tiempo o en frecuencia (caso de radios, satélites, fibra óptica, etc.). De acuerdo con el teorema de Nyquist, o el más elaborado teorema de Shannon, la velocidad de comunicación en un canal es directamente proporcional al ancho de banda del mismo. Por tanto, en distancias grandes, surge el problema de comunicaciones a baja velocidad, es decir, el canal se constituye en un recurso escaso. Como ya indicamos en la Introducción, este es el tipo de canal en cuyo estudio estamos interesados en el ámbito de esta Tesis.

La disposición global de la red de comunicaciones puede tomar forma de árbol (figura 2.4), estrella (figura 2.5), malla (figura 2.6), anillo (figura 2.7), etcétera. En todas ellas existe la característica común de existir líneas dedicadas que unen los procesadores del sistema. En los últimos años se han puesto en funcionamiento y extendido ampliamente el uso de redes de conmutación de paquetes (RCP), tanto públicas como privadas. El criterio que apoya su uso es el análogo al planteado en teléfonos. En efecto, el uso de líneas dedicadas es equivalente a tener un línea entre un teléfono y todos sus posibles interlocutores, lo cual es claramente ineficiente. Por ello se usan redes de teléfonos (públicas o privadas) que establecen la comunicación entre dos interlocutores cualesquiera que así lo soliciten y por el tiempo que necesiten. Este mismo planteamiento es transplantable (con las lógicas diferencias) a las redes para la comunicación de procesadores, constituyéndose las redes de conmutación de paquetes que frecuentemente son ofertadas y explotadas por las propias

compañías telefónicas.

Las RCP (figura 2.8) presentan un conjunto de nodos externos que son los que se comunican con el procesador del usuario y unos nodos internos que se enlazan entre si y con los nodos externos proporcionando rutas alternativas desde un procesador de usuario a otro. Los mensajes son divididos en paquetes y encaminados cada uno a su destino según los criterios de diseño y explotación de la propia red. Pocos sistemas complejos son actualmente controlados a través de este tipo de red, pero en los próximos años la estandarización y desarrollo de las mismas plantearán la cuestión de su uso o no frente a las líneas dedicadas. En la actualidad y en el campo de los despachos eléctricos, solo existen en el mundo 3 de ellos usando redes de conmutación de paquetes de compañías eléctricas de Suecia, Japón y España. En nuestra opinión el uso de las RCP ofrece una serie de ventajas reseñables:

- Se posibilita el uso de redes públicas para aquellas aplicaciones en las que el desarrollo y mantenimiento de una red de comunicaciones propias es inviable desde un punto de vista técnico o económico. En España existe ya una red pública (IBERPAC) que ha sido puesta en funcionamiento comercial muy recientemente por la Compañía Telefónica.

- Las RCP pueden usarse para integrar todas las necesidades de comunicación del usuario, y no solo aquellas específicamente relacionadas con el control del sistema complejo. En efecto, por la red pueden circular simul-

taneamente mensajes conteniendo informacion sobre los estados y medidas del sistema, y mensajes contables entre dos centros de la misma empresa.

- La propia estructura de la RCP es redundante, presentando rutas alternativas entre dos procesadores cualesquiera. Esto hace al sistema mas tolerante ante fallos.
- Si la distribucion de funciones originalmente asignadas a cada procesador cambia con el tiempo de modo que hacen necesarias comunicaciones inicialmente inexistentes y desapareciendo algunas de las actuales, se presenta la necesidad de una reconfiguracion de la estructura de dichas comunicaciones. Esta reconfiguracion es muy facilmente realizable en redes de conmutacion de paquetes.
- Mientras que con el uso de lineas dedicadas un procesador solo puede comunicarse con aquellos a los que esta unido a traves de una linea, si se usa una RCP es posible la comunicacion entre dos procesadores cualesquiera del sistema.
- Las redes de conmutacion de paquetes son en general mas faciles de controlar y mantener.

Frente a las ventajas señaladas, su uso presenta una serie de inconvenientes entre los cuales estan los siguientes :

- Dado que la red admite peticiones de diferentes procesadores, incluso de distintas aplicaciones, existe la posibilidad de congestión de la red por causas externas y fuera del control del sistema.

- Aunque la red opere en circunstancias normales, el tiempo que tarda un mensaje en transmitirse es una variable aleatoria con una distribución exponencial típica de la teoría de colas. Si bien el tiempo medio puede ser aceptable, existe la posibilidad de grandes retardos en algunos paquetes.

- Dado que los tiempos de transmisión son aleatorios, no se pueden transmitir por la línea mensajes de sincronización o congelación de información.

- Usando el mismo algoritmo de detección de errores, la posibilidad de error aumenta linealmente con el número de nudos que atraviesa el mensaje hasta llegar a su destino.

La topología concreta que debe aplicarse en cada caso, será elegida de acuerdo con las características de cada sistema, no pudiendo señalarse una fórmula general que se ajuste a todas las situaciones.

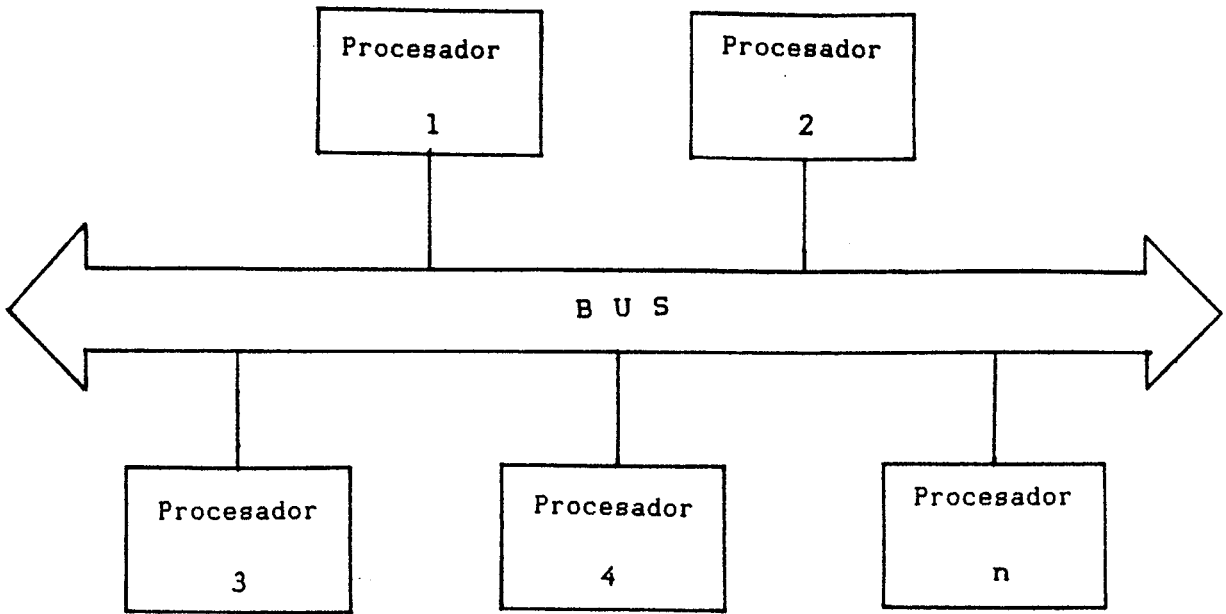


Fig. 2.2.- Comunicaciones a traves de un bus.

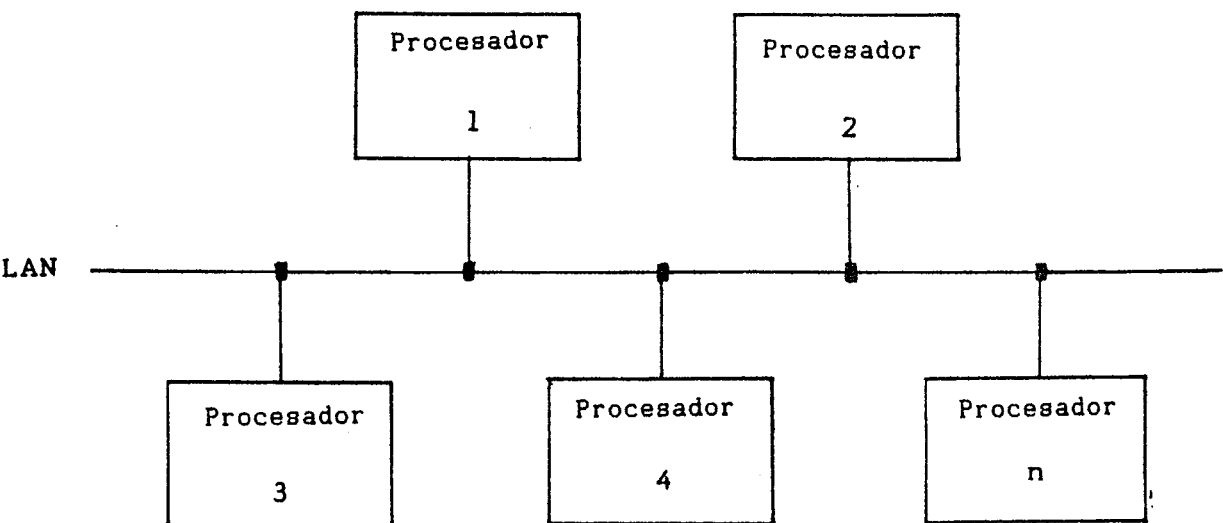


Fig. 2.3.- Comunicaciones por medio de redes locales (LAN).

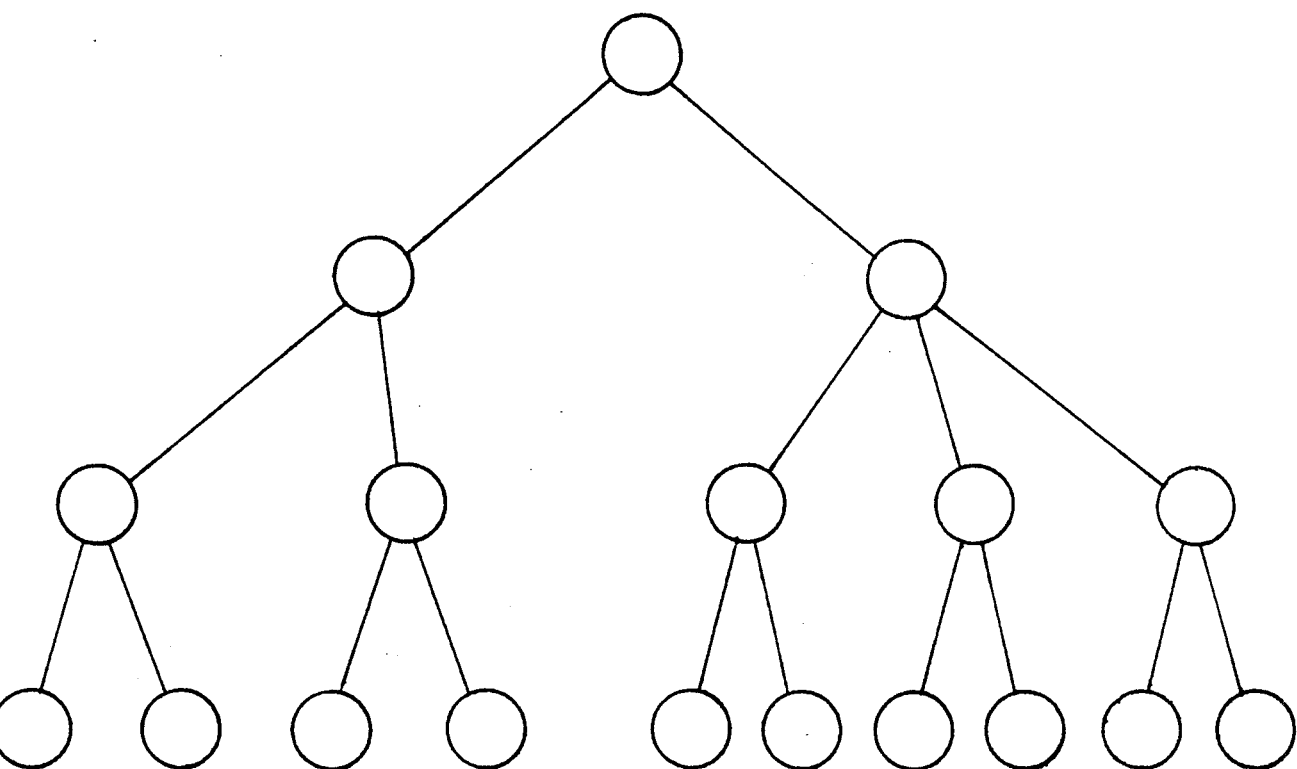


Fig. 2.4.- Topologia en arbol.

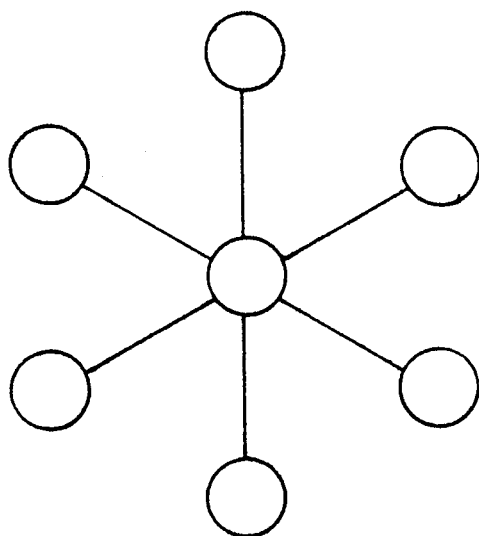


Fig. 2.5.- Topologia en estrella.

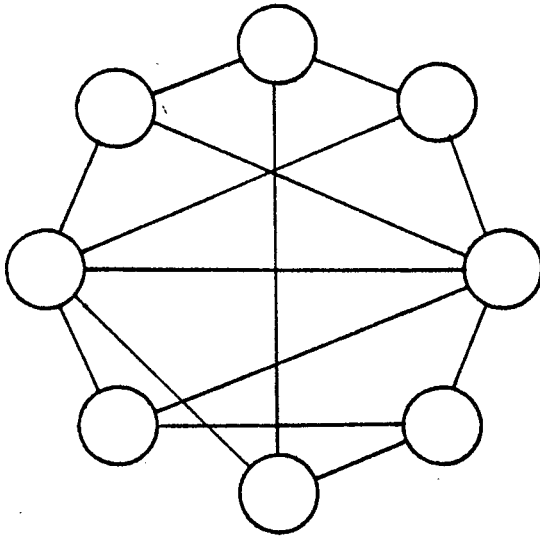


Fig. 2.6.- Topología en malla.

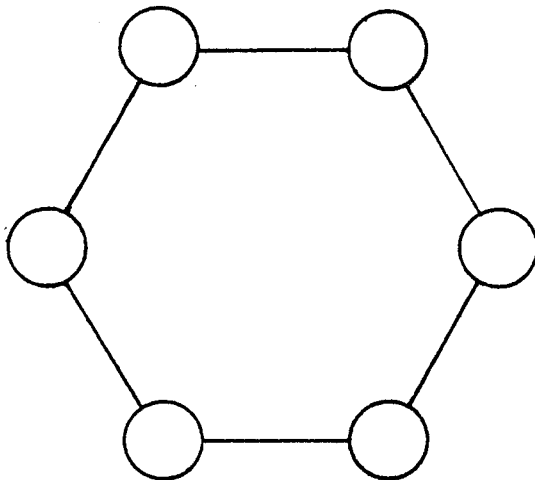


Fig. 2.7.- Topología en anillo.

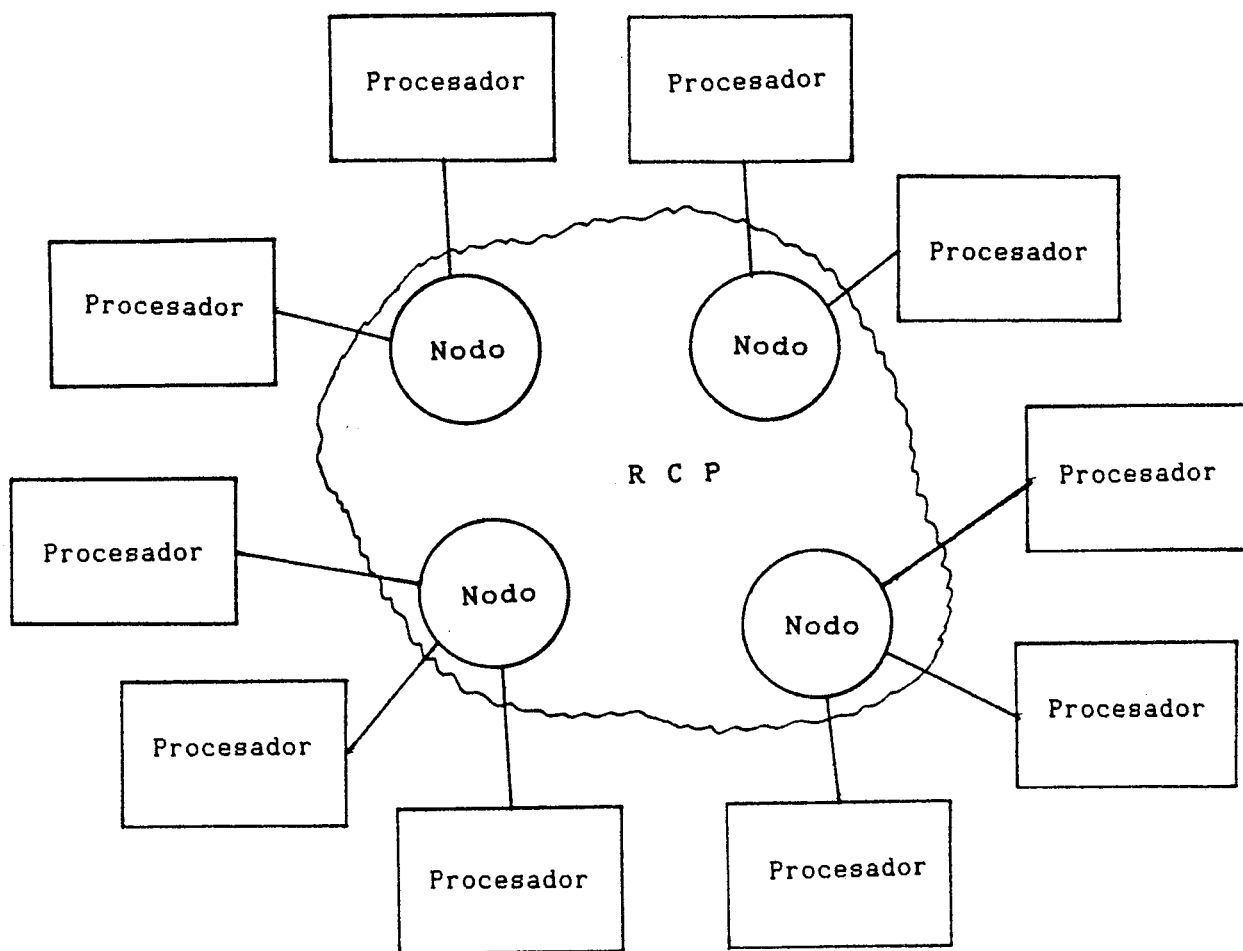


Fig. 2.8.- Red de conmutacion de paquetes (RCP).!

2.3.- Protocolos de comunicaciones.

Para que tenga lugar la comunicacion entre dos entes, es necesario que ambos se ajusten a unas normas de como sera esa comunicacion. Un ejemplo tipico lo constituyen dos personas que tratan de comunicarse por radio. En primer lugar, deben convenir las características técnicas de la transmision: tipo de modulacion, frecuencia, etcetera. Tambien convendran previamente el idioma empleado : español, ingles, u otro. Entre otros acuerdos previos se incluiran la forma de iniciar la comunicacion, la forma de terminarla, el cambio de emision a recepcion, etcetera. Todo este conjunto de reglas, normas y acuerdos necesarios para que la comunicacion sea posible recibe el nombre de protocolo de comunicaciones.

Cuando los entes que comunican son procesadores, el protocolo de comunicaciones recoge aspectos tales como tecnologia de la transmision, niveles electricos para representacion de los bits, forma y distribucion de los conectores, estructura de los mensajes, presentacion de la informacion, etcetera. Este complejo entramado de reglas y normas que constituyen el protocolo, se organiza frecuentemente en niveles, segun el aspecto de la comunicacion al que se refieran. El numero y características de estos niveles pueden tomar distintas formulaciones dependiendo de la red. Sin embargo en todas ellas el objeto de cada nivel es proporcionar una serie de servicios a los niveles superiores, descargandoles de los detalles concretos de realizacion de dichos servicios. En un procesador, el nivel n comunica con el correspondiente nivel n del otro procesador. Las reglas y convenios de esta comuni-

cacion se denominan protocolo de nivel n.

En realidad no existe transferencia directa de informacion entre el nivel n de un procesador y el nivel n del otro (excepto para el nivel mas bajo). Por el contrario, cada nivel pasa los datos y la informacion de control al nivel inferior, y asi sucesivamente hasta alcanzar el nivel mas bajo. A este nivel existe una comunicacion fisica con el otro procesador, en contraposicion a la comunicacion virtual que tiene lugar en los niveles superiores.

2.3.1.- Modelo ISO.

El numero de niveles y las funciones asignadas a cada uno de ellos no deja de ser una decision mas o menos arbitraria y con distintas soluciones presentes en el mercado. Para tratar de unificar criterios, la International Standards Organization (ISO) ha propuesto un modelo para la normalizacion de los diferentes protocolos. Este Modelo de Referencia para la Interconexion de Sistemas Abiertos (OSI segun la terminologia ISO), esta formado por 7 niveles (figura 2.9) los cuales presentamos a continuacion :

1) Nivel fisico.

Es el encargado de transmitir una hilera de bits a traves del canal de comunicaciones. Se encarga de asegurar que cuando un procesador transmite un bit a 1, en el otro lado es entendido como 1 y no como 0. Cuestiones propias de este nivel son cuantos voltios representan un 1 y cuantos un 0, cuantos microsegundos ocupa un bit, cuantos pines tiene el conector y para que sirve cada uno de ellos, etcetera.

2) Nivel de enlace de datos.

La tarea del nivel de enlace de datos es transformar la linea real de comunicaciones en un canal libre de errores a los ojos de los niveles superiores. Esto se realiza partiendo los datos en tramas (trozos de informacion), transmitiendolas secuencialmente y procesando los reconocimientos enviados por el otro lado. Se resuelven en este nivel problemas causados por el dete-

rioro, perdida o duplicidad de tramas de forma que el nivel 3 pueda asumir que esta trabajando con un canal virtual libre de errores.

3) Nivel de red.

En este nivel se tienen en cuenta las reglas necesarias para que exista una comunicacion entre dos procesadores a traves de una red. Se encarga de asegurar que los paquetes (unidad de informacion en este nivel) son recibidos correctamente en sus destinos y en el orden adecuado. Una de las funciones claves de este nivel es la determinacion de la ruta que debe seguir un paquete hasta alcanzar su destino, ofreciendose para ello desde soluciones cableadas (y por tanto dificilmente modificables) hasta algoritmos de "routing" dinamico basados en la configuracion de la red, experiencias con paquetes anteriores, carga de cada ruta, etcetera. Relacionado con este problema se halla tambien el de la congestion de la red y el manejo de cuellos de botella, que son resueltos igualmente en este nivel.

4) Nivel de transporte.

La funcion basica del nivel de transporte es aceptar datos de los niveles superiores, partirlos si fuera necesario en unidades mas pequeñas, pasar estas unidades al nivel de red y asegurarse de que llegan correctamente al otro extremo. La definicion mas popular del protocolo de transporte es la de aquel que proporciona un canal (virtual), punto a punto y libre de errores, que

entrega mensajes en el orden en el que fueron enviados. Regula tambien el flujo de informacion para evitar que un procesador rapido desborde a uno lento.

5) Nivel de sesion.

La principal mision que se lleva a cabo en este nivel es la "conexion logica" de los dos procesadores que desean conectarse. Para ello se intercambian una secuencia de mensajes segun el protocolo de este nivel. En este nivel se realizan tambien funciones como la identificacion de los procesadores, asi como sus usuarios y tareas, para control de derechos de acceso, lo cual es establecido no solo en el momento de la conexion sino durante toda la comunicacion. Otras posibles tareas de este nivel pueden ser sincronizacion y recuperacion despues de caida del sistema.

6) Nivel de presentacion.

Se atienden en este nivel los problemas relativos a la presentacion de la informacion, concepto en el que podemos englobar tareas tales como compresion de textos, cifrado de la informacion en aras de la seguridad, conversiones de codigo (ASCII a EBCDIC por ejemplo), adaptacion de formatos de ficheros, conversion de caracteres para terminales, etcetera.

7) Nivel de aplicacion.

El contenido de este nivel es definido por el usuario dependiendo de la aplicacion concreta a la que se dedi-

quen los procesadores. Cuando dos programas de usuario en maquinas diferentes deben comunicar, solo a ellos les compete determinar el conjunto de mensajes permitidos y las acciones a tomar en cada caso.

Esta separacion en niveles de las funciones realizada para la comunicacion de dos procesadores es el estandard aceptado internacionalmente y al que se ajustan (mejor o peor) los protocolos comercialmente en uso. Sin embargo, y para fijar un poco mas las ideas, nos gustaria presentar un ejemplo de comunicaciones y adaptarlo a este modelo. Para mayor generalidad y facilidad de comprension no nos referiremos a una comunicacion entre ordenadores.

En una reunion de filosofos en el siglo XVIII en Paris, se encuentran, entre otros, dos grupos con afinidades ideologicas, uno de ellos español e italiano el otro. Dado el interes suscitado por sus trabajos mutuos y la imposibilidad de prolongar la reunion, ambos grupos deciden mantener una cooperacion mediante el intercambio de sus respectivos avances en los temas de interes comun. Para hacer esto efectivo llegan a los siguientes acuerdos:

a) Protocolo de aplicacion.

Se intercambiara informacion de todos los trabajos y avances en Epistemologia, Metafisica y Teologia.

b) Protocolo de presentacion.

Todas las comunicaciones se haran en Latin. Dada la importancia de los temas tratados y el peligro que supon-

dria la caída en manos de la Inquisición de tales documentos, todos los informes irán cifrados, correspondiéndole a cada letra del alfabeto un número consecutivo, siendo el primero de ellos, correspondiente a la letra A, definido al comienzo de cada discusión.

c) Protocolo de sesión.

Cuando se desee comenzar la discusión de un tema, el jefe del grupo solicitante enviara un mensaje al jefe del otro grupo indicando su deseo y presentando a la persona que desea comunicarse mediante el nombre de la misma. Dicho nombre aparecera al pie de todos los informes subsiguientes. En esta solicitud inicial aparecera también el número asignado a la letra A para el cifrado de esa discusión, así como el propio número asignado a la discusión. Solo los sacerdotes podran establecer discusiones teológicas, estando los demás limitados a las epistemológicas y metafísicas, siendo rechazada cualquier petición que viole esta regla. La finalización de una sesión se hara por solicitud de cualquiera de las partes.

d) Protocolo de transporte.

Todos los informes irán numerados dentro de cada discusión. Así por ejemplo 5/3 indica el informe 5 de la discusión 3. Las páginas de cada informe irán igualmente numeradas, para asegurar el correcto orden de las mismas. Ninguna de las partes emitira un nuevo informe sin haber recibido contestación del anterior, para evi-

tar las sobrecargas de trabajo en la parte contraria.

e) Protocolo de red.

Un informe sera dividido en tantas paginas como sea necesario, entregando una a una estas hojas a los servicios reales de correos, con la direccion clara del destinatario. El servicio de correos encargara a uno de sus miembros que memorice el mensaje y emprenda el viaje en direccion al destino. Sin embargo sera relevado en la siguiente ciudad por otro correo que continuara con el mensaje, y asi sucesivamente hasta alcanzar el destinatario. En caso de escasez de correos en una ciudad, el servicio establecera las rutas alternativas del mensaje.

f) Protocolo de enlace de datos.

Cada pagina entregada a los correos esta compuesta por un conjunto de cifras que representan a las diferentes letras segun el codigo de cifrado usado. Dado que la transmision de un correo a su relevo es verbal (para eludir en lo posible a la Inquisicion) y que puede haber errores, se añade al final de cada pagina la suma de todas las cifras del texto, comprobandose en el receptor la calidad de los servicios reales de correos. En caso de transmision correcta se enviara un acuse de recibo y en caso contrario, un mensaje pidiendo repeticion.

g) Protocolo físico.

Cada página se entregará al servicio de correos en un papel de tamaño 30 x 20 cms., escrito por una cara a doble espacio, con pluma de ave y tinta azul. Será introducido en un sobre de tamaño mitad al del papel y debidamente lacrado.

Aunque algunos aspectos del ejemplo presentado pueden ser discutibles desde un punto de vista riguroso, esperamos que clarifique un poco la distribución en niveles de las funciones de un protocolo de comunicaciones.

Uno de los problemas resueltos por los protocolos de comunicaciones es el relativo al tratamiento de errores y al que, dada su incidencia en algunos de los temas tratados en esta Tesis, le dedicaremos los siguientes apartados a modo de enfoque de la cuestión.

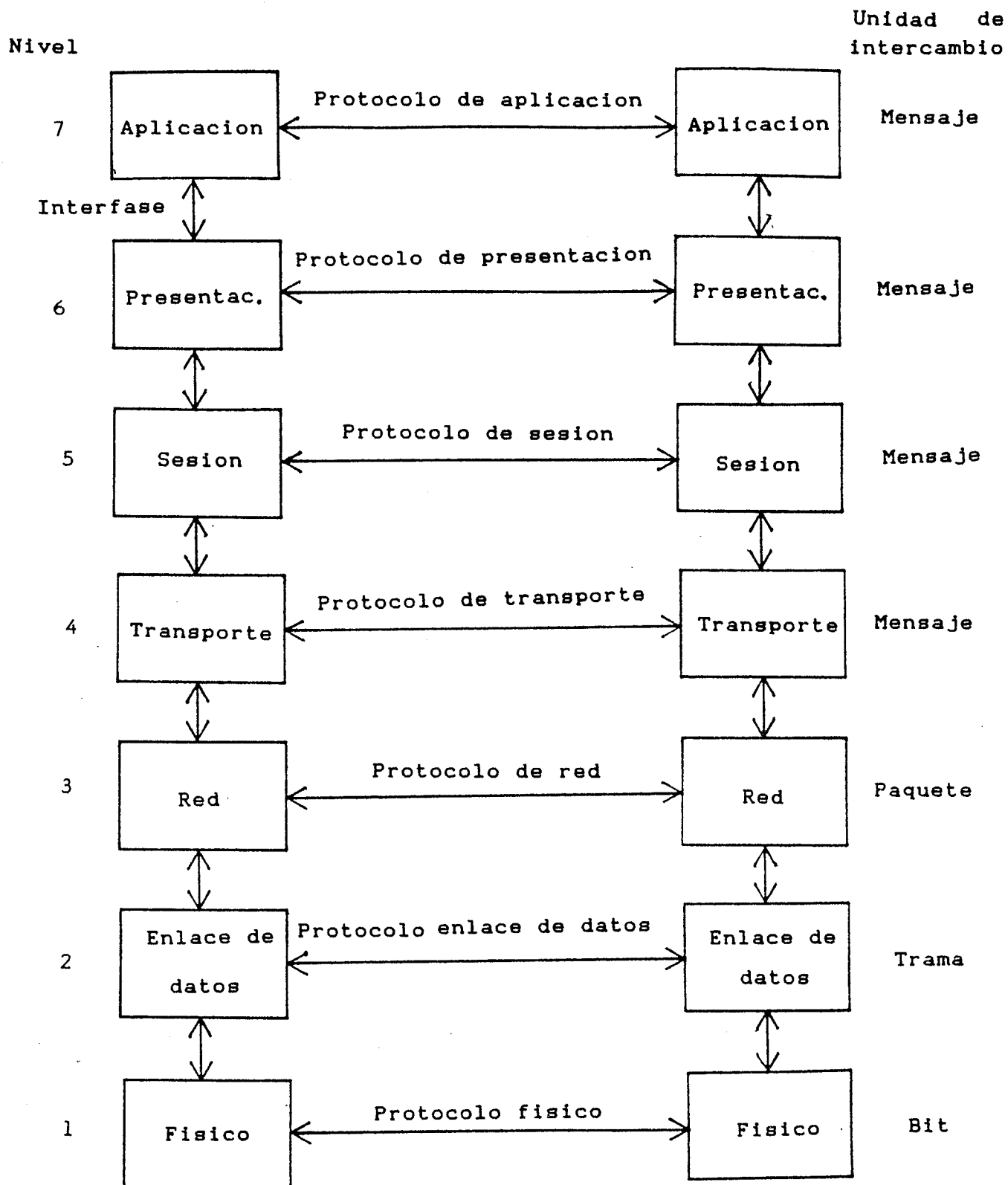


Fig. 2.9.- Modelo de referencia propuesto por ISO.

2.3.2.- Tratamiento de errores.

Las transmisiones de datos se materializan sobre canales físicos (radio, fibra óptica, cable, etcetera), que tienen todos una característica común: son ruidosos. Es decir, en mayor o menor medida la transmisión de un bit está sujeta a una probabilidad de error. Este error puede ser debido a múltiples causas, pero el mecanismo de actuación es siempre el mismo: se produce una alteración en la magnitud física representativa de la información, en cuantía tal que provoca que el receptor malinterprete dicha información. Para disminuir los efectos de estos errores se dispone de distintos mecanismos de actuación en los que, por su interés práctico, señalaremos los códigos detectores de errores y los métodos de control de la calidad de la señal.

El funcionamiento de los códigos detectores de errores consiste en el envío de la información significativa más una información redundante que puede ser generada matemáticamente por el emisor y comprobada por el receptor, decidiendo si el mensaje es aceptable o rechazable. Algunos de los códigos detectores más ampliamente usados son los códigos polinómicos y que por su importancia práctica comentaremos más adelante.

No se pretende aquí aportar ninguna novedad en estos temas, sino simplemente servir de recopilación de aquellos aspectos que serán usados a lo largo de este trabajo.

2.3.2.1.-Codigos polinomicos.

Un mensaje, supuesto binario, es una sucesion de unos y ceros que pueden ser facilmente considerados los coeficientes de un polinomio tambien binario. Asi el mensaje de 5 bits 10010 puede ser visto como el polinomio de grado 4

$$1 x^4 + 0 x^3 + 0 x^2 + 1 x^1 + 0 x^0$$

es decir

$$x^4 + x$$

Supongamos que se quiere transmitir por un canal ruidoso una informacion de k bits. Mediante un algoritmo matematico se calculan r bits redundantes y se añaden a los anteriores de forma que por la linea circula un mensaje de longitud

$$n = k + r$$

Aplicando la analogia entre mensajes y polinomios, podemos llamar A(x) al polinomio representativo de los k bits de informacion (grado k-1), B(x) al polinomio representativo de los r bits redundantes (grado r) y P(x) al polinomio representativo del mensaje completo (grado n-1). Podemos escribir, considerando siempre operaciones binarias,

$$P(x) = x^r A(x) + B(x)$$

Los codigos polinomicos son aquellos en los que los bits redundantes son calculados como el resto de la division polinomica binaria de los datos por un polinomio fijo, denominado polinomio generador G(x) (de grado r) de forma que

$$x^r A(x) = Q(x) G(x) + R(x)$$

y hacemos $B(x)=R(x)$ en los codigos polinomicos.

De ello podemos escribir, teniendo en cuenta que la resta y la suma de polinomios binarios son iguales,

$$P(x) = x^r A(x) + R(x) = Q(x) G(x)$$

Es decir, cualquier mensaje asi formado es divisible por el polinomio generador.

Las propiedades de deteccion de estos codigos polinomicos dependen del polinomio generador $G(x)$ elegido y de la longitud n del codigo. Veremos a continuacion que condiciones debe cumplir $G(x)$ para que el codigo obtenido tenga buenas propiedades.

En primer lugar definiremos el mensaje recibido $P_r(x)$ que valdra

$$P_r(x) = P(x) + E(x)$$

siendo $E(x)$ el polinomio de errores de transmision. Para que $P_r(x)$ sea un mensaje valido con errores no detectables, se debe verificar que sea divisible por el polinomio generador

$$P_r(x) = Q_r(x) G(x)$$

Sustituyendo

$$Q_r(x) G(x) = Q(x) G(x) + E(x)$$

$$E(x) = (Q_r(x) + Q(x)) G(x) = Q_e(x) G(x)$$

Es decir, para que el mensaje recibido sea dado por valido se tiene que cumplir que el polinomio de error sea divisible por $G(x)$. Una solución trivial, y la mas deseable, es aquella en la que $E(x)=0$, es decir, no hubo errores en la transmisión. Las otras posibles soluciones son errores no detectados.

Estableceremos ahora tres condiciones que debe cumplir $G(x)$ y las ventajas que de ello se derivan en el código generado.

a) $G(x)$ debe ser divisible por $(x-1)$.

Es decir $G(x) = (x-1) G_1(x)$. Si esto se cumple, se puede demostrar que $E(x)$ no puede tener un número impar de unos, esto es, el código detectara todo número impar de errores. En efecto

$$E(x) = Q_e(x) G(x) = Q_e(x) (x + 1) G_1(x)$$

Para $x=1$ se tiene

$$E(1) = Q_e(1) (1 + 1) G_1(1) = Q_e(1) 0 G_1(1) = 0$$

con lo cual el número de errores debe ser par, para que $E(1)$ sea cero.

b) $G(x)$ no debe ser divisible por x .

Si se cumple esta condición se puede demostrar que no existe ninguna rafaga (burst) de errores indetectados de longitud menor o igual al grado del polinomio generador. En efecto, una rafaga de longitud b que comienza en la posición i se puede escribir como

$$E(x) = x^i E_1(x)$$

siendo $E_1(x)$ un polinomio de grado $b-1$. Por tanto

$$E(x) = x^i E_1(x) = Q_e(x) G(x)$$

Esto puede ocurrir si:

$$x^i = Q_1(x) G(x)$$

o bien si

$$E_1(x) = Q_2(x) G(x)$$

Pero por una parte si x no es factor de $G(x)$ es evidente que x^i no puede ser divisible por dicho polinomio, para todo valor de i . Y por otro lado para que $E_1(x)$ sea divisible por $G(x)$ debera ser de grado mayor o igual al de $G(x)$. Esto es

$$b - 1 \geq r$$

Es decir, para que sea divisible se ha de verificar que $b > r$ como queriamos demostrar.

- c) La longitud del mensaje n debera ser menor o igual que el exponente e al que pertenece el polinomio generador $G(x)$: $n \leq e$. Si se cumple esta condicion y la anterior, se verifica que el codigo detecta todos los errores dobles. En efecto:

Se denomina exponente e al que pertenece un polinomio $G(x)$, al menor entero que hace que $x^e + 1$ sea divisible por $G(x)$, es decir

$$(x^e + 1) = Q(x) G(x)$$

Un error doble en las posiciones i y j se puede escribir como

$$E(x) = x^i + x^j = x^i (1 + x^{j-i})$$

suponiendo $i < j$.

Para que esto sea divisible por $G(x)$ deben verificarse una de las dos condiciones siguientes:

- 1) que x^i sea divisible por $G(x)$, lo cual es imposible en virtud de la segunda condicion impuesta a $G(x)$.
- 2) que $(1 + x^{j-i})$ sea divisible por $G(x)$. Pero

$$j - i \leq n - 1 \leq e - 1 < e$$

lo que hace imposible que sea divisible por propia definicion del exponente e , con lo cual se demuestra nuestra hipotesis.

En el caso de que $n = e$ se tiene el codigo mas largo (codigo maximo) que puede generar $G(x)$ detectando errores dobles. Este caso particular implica, segun se puede demostrar, que el codigo (n,k) asi formado, es ciclico. Esto quiere decir que la rotacion ciclica de cualquier vector del codigo da otro vector que tambien pertenece al codigo. Esta propiedad teorica, sin excesiva repercusion en la capacidad practica de deteccion de errores, es la que da nombre a este tipo de codigos como codigos ciclicos redundantes, siendo empleada esta expresion, a nuestro juicio de una forma poco ortodoxa,

a aquellos codigos en los que $n < e$ y que por tanto carecen de la propiedad ciclica. Se puede demostrar que el valor del exponente esta acotado por la expresion

$$e \leq 2^{n-k-1} - 1$$

denominandose polinomios maximos aquellos que hacen que esta expresion se verifique con signo de igualdad.

Como conclusion podemos decir que un codigo polinomico (n,k) de polinomio generador $G(x)$ y que cumpla las tres condiciones impuestas anteriormente, tiene las siguientes propiedades:

- Detecta todo numero impar de errores.
- Detecta todos los errores dobles.
- Detecta todas las rafagas de longitud $b \leq r$.

Dos de los codigos polinomicos que se manejaran mas adelante son

- a) CRC-CCITT $(x^{16} + x^{12} + x^5 + 1)$.
- b) CRC-16 $(x^{16} + x^{15} + x^2 + 1)$.

los cuales cumplen todos los requisitos anteriores y que ademas son maximos, es decir, que ambos pertenecen al exponente 32767, lo cual ha sido comprobado experimentalmente en el desarrollo de esta Tesis.

2.3.2.2.- Control de la calidad de la señal.

Otro metodo de deteccion de errores es el control de la calidad de la señal que se basa en supuesto teoricos completamente distintos. Se fundamenta en un control por hardware de la señal portadora de la informacion que debe encontrarse entre limites estrechos alrededor del valor teorico de cada bit.

En efecto, supongamos una transmision en el que los bits son codificados mediante dos valores S_0 para el cero y S_1 para el uno de la magnitud fisica M (amplitud, frecuencia, fase, etcetera). Supongamos que existe una distribucion normal de los valores de M con medias en S_0 y S_1 respectivamente, y desviacion tipica σ identica para ambos (canal simetrico).

En la figura 2.10 se recogen los graficos de la funcion de densidad en funcion del valor M para el bit "0" y el bit "1". Ambas curvas se cruzan en el punto medio A de abscisa $(S_0+S_1)/2$.

$$f_0(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(x - S_0)^2}{2 \sigma^2} \right]$$

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(x - S_1)^2}{2 \sigma^2} \right]$$

La probabilidad de que un bit a cero sea interpretado como uno es el area debajo de la curva 1 desde el punto A hasta el infinito. Es decir

$$p = \int_{\frac{S_0+S_1}{2}}^{\infty} f_0(x) dx$$

$$p = \int_{\frac{S_0+S_1}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - S_0)^2}{2\sigma^2} \right] dx$$

Haciendo el cambio de variable

$$u = \frac{x - S_0}{\sqrt{2} \sigma}$$

y llamando $S = S_1 - S_0$, podemos escribir

$$p = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{S}{2\sigma\sqrt{2}}}^{\infty} \exp[u^2] du$$

Pero si recordamos que la funcion de error complementada se define como

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp[u^2] du$$

tenemos que

$$p = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{S}{2\sigma\sqrt{2}} \right]$$

La probabilidad de que un bit llegue sin error sera

$$q = 1 - p$$

Hasta aquí hemos expresado matemáticamente el error de un bit por alteración de la magnitud física que lo "transporta". Sin embargo en la exposición queda de manifiesto que podemos establecer una banda de anchura ΔS alrededor de los valores S_0 y S_1 para decir que la señal tiene suficiente calidad y por tanto aceptar su información, o por el contrario rechazarla si se halla fuera de dichas bandas.

Vemos aquí que un bit puede ser procesado de tres formas:

- Ser aceptado siendo erróneo : probabilidad p' .
- Ser aceptado siendo correcto : probabilidad q' .
- Ser rechazado : probabilidad $1-p'-q'$.

La probabilidad de que un bit a cero sea aceptado erróneamente (recibido a uno) es el área debajo de la curva 1 entre los puntos A y B (figura 2.11). Las coordenadas de A y B son respectivamente

$$S_1 - \frac{\Delta S}{2} \quad \text{y} \quad S_1 + \frac{\Delta S}{2}$$

La probabilidad p' será:

$$p' = \int_{S_1 - \frac{\Delta S}{2}}^{S_1 + \frac{\Delta S}{2}} f_0(x) dx$$

o lo que es lo mismo

$$p' = \int_{S_1 - \frac{\Delta S}{2}}^{\infty} f_0(x) dx - \int_{S_1 + \frac{\Delta S}{2}}^{\infty} f_0(x) dx$$

De analogia forma al caso anterior podemos escribir

$$p' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{S - \frac{\Delta S}{2}}{\sigma\sqrt{2}}\right] - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{S + \frac{\Delta S}{2}}{\sigma\sqrt{2}}\right]$$

lo cual se puede formular tambien como

$$p' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{S}{\sigma\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\Delta S}{2S}\right)\right] - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{S}{\sigma\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\Delta S}{2S}\right)\right]$$

Si llamamos

$$\delta = \frac{\Delta S}{S}$$

y recordamos que

$$p = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{S}{2\sigma\sqrt{2}}\right]$$

con lo que

$$\frac{S}{\sigma\sqrt{2}} = 2 \operatorname{erfc}^{-1}(2p)$$

podemos sustituir obteniendo

$$p' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} [(2 - \delta) \operatorname{erfc}^{-1}(2p)] -$$

$$- \frac{1}{2} \operatorname{erfc} [(2 + \delta) \operatorname{erfc}^{-1}(2p)]$$

De analoga forma podemos obtener que

$$q' = 1 - \operatorname{erfc} [\delta \operatorname{erfc}^{-1}(2p)]$$

La influencia del parametro de control de calidad de la se-
 ñal sobre p' y q' puede verse en las figuras 2.12 y 2.13.

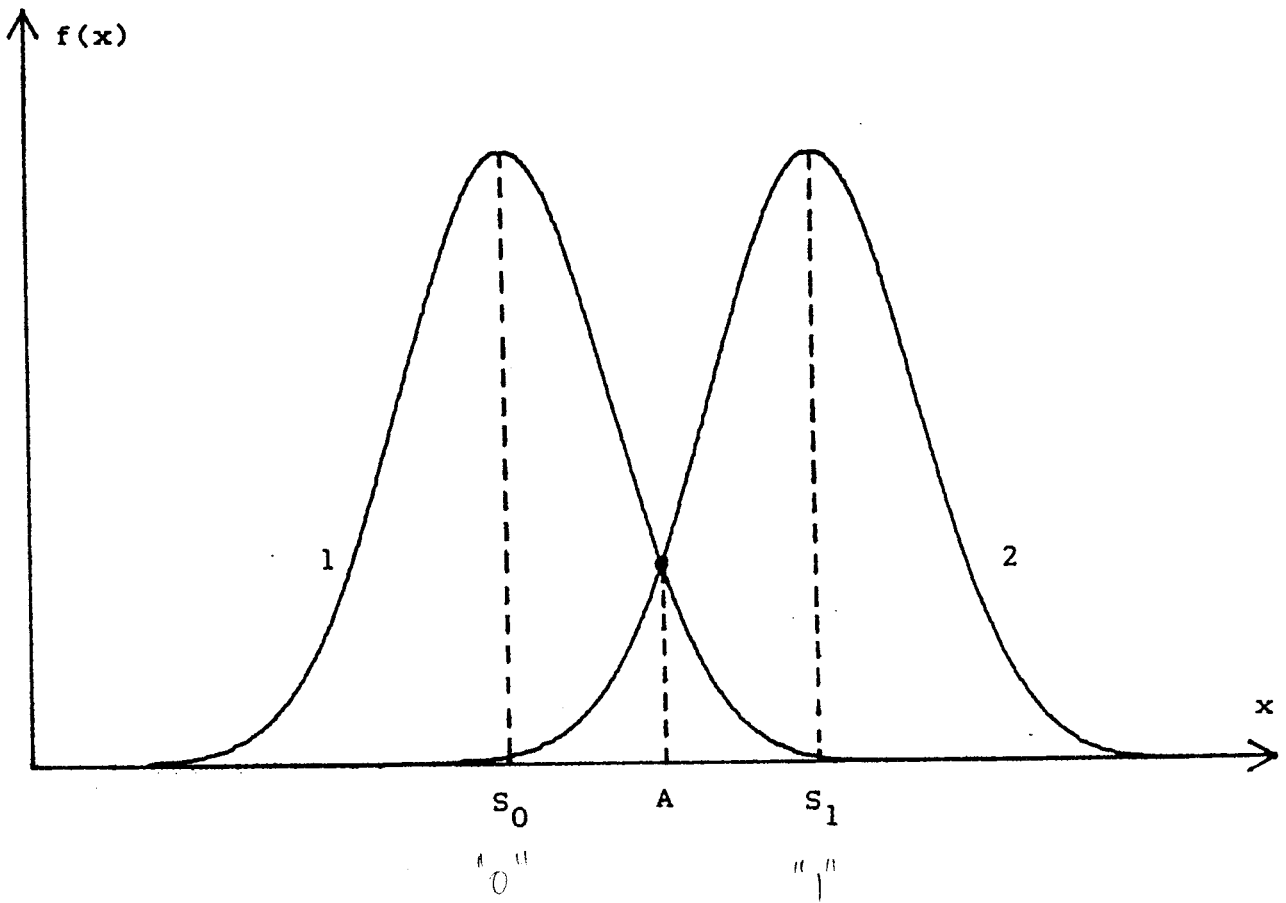


Fig. 2.10.- Comunicaciones sin control de calidad.

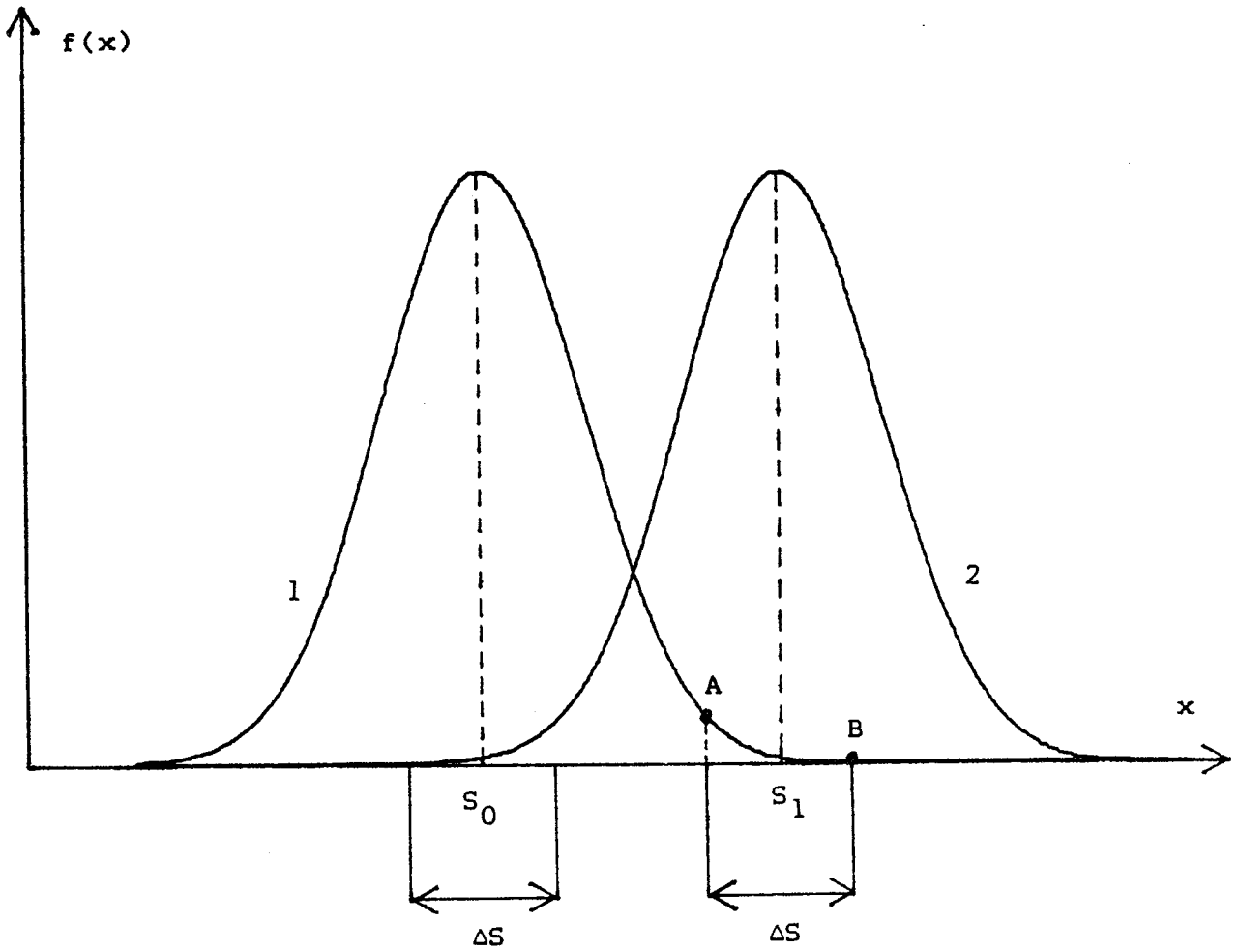
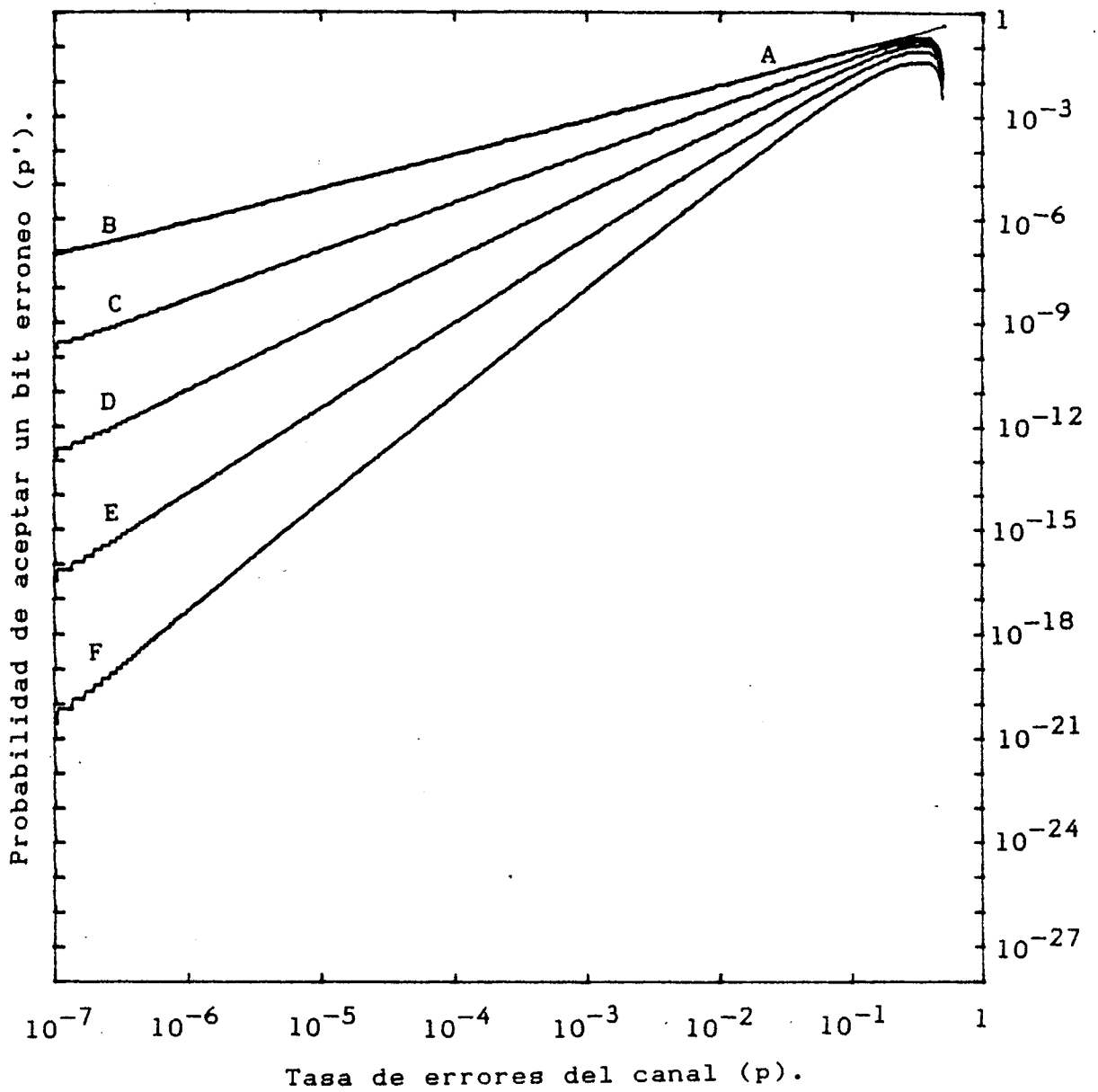
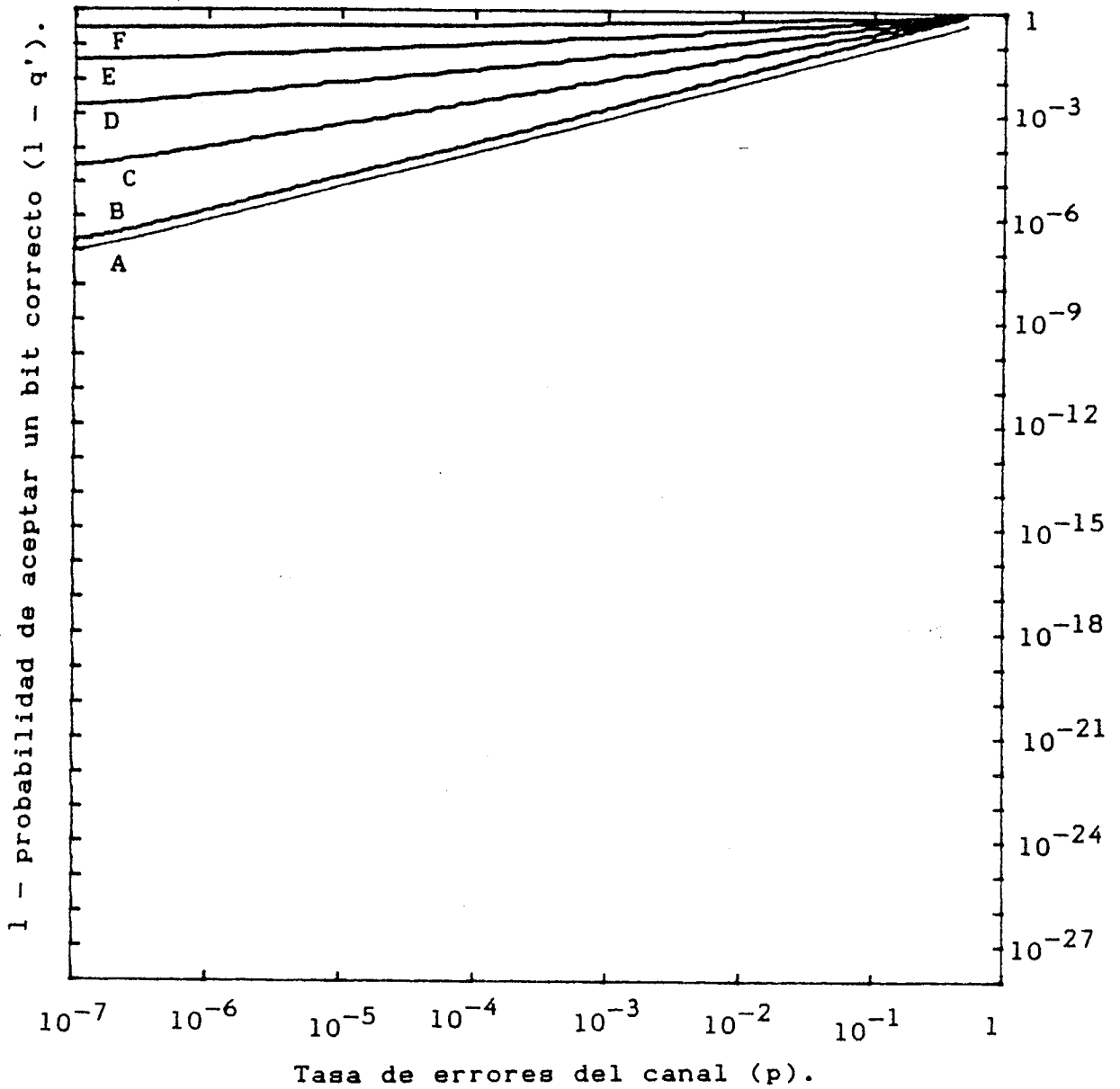


Fig. 2.11.- Comunicaciones con control de calidad.



- A.- Sin control de calidad.
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.4$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.2$

Fig. 2.12.- Efecto del control de calidad sobre p' .



- A.- Sin control de calidad
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.4$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.2$

Fig. 2.13.- Efecto del control de calidad sobre q' .

2.3.3.- Transmision de estados.

Los protocolos de aplicacion (nivel 7 del modelo ISO) de los equipos de control en tiempo real de sistemas complejos, presentan una serie de puntos comunes, entre los cuales encontramos que el tipo de informacion intercambiada se suele ajustar a los siguientes :

- Transmision de estados.
- Transmision de medidas.
- Transmision de ordenes.
- Funciones auxiliares.

Cada uno de estos tipos de informacion plantean requerimientos distintos, pero que tienen en comun que la capacidad del canal es la que limita dichos requerimientos. Trataremos por separado cada uno de ellos indicando, en su caso, el factor primordial a tener en cuenta.

En primer lugar diremos que entendemos por estado digital la situacion de un elemento que puede ser representado por un bit. Asi por ejemplo, seran estados digitales la posicion de interruptores, seccionadores, la situacion de alarma o no de algun elemento, etcetera. Aunque puede haber excepciones segun las peculiaridades del sistema, en la mayoria de ellos los cambios de estado son infrecuentes lo cual se tiene en cuenta en la forma de su transmision. A priori se presentan dos posibilidades para dicha transmision:

- Transmision ciclica de todos los estados.
- Transmision de los cambios de estados cuando se produzcan.

La primera de estas soluciones supone una sobrecarga inutil ante escasos cambios de estados. Ademas, en general, se tarda mas en detectar dicho cambio. Por el contrario, la transmision de estados por incidencias, disminuye la ocupacion del canal y permite conocer rapidamente esos cambios. El principal problema se presenta cuando en un sistema normalmente estable, se produce una perturbacion generalizada, que origina multiples cambios de estado casi simultaneos. Ello provoca una fuerte demanda de comunicaciones que usualmente satura los canales, provocando temporalmente retrasos en la captacion de incidencias. Por todo ello se debe buscar un compromiso entre ambos metodos para adaptarlos lo mejor posible al sistema a controlar.

Industrialmente, la solucion mas extendida es la de transmision de incidencias con refresco ciclico lento de seguridad y mecanismos paliativos del efecto de las avalanchas. En todos estos sistemas el parametro que se prima es la rapidez con que llega una incidencia al centro, contando desde el momento en que se produjo, es decir, el retardo en la captacion de incidencias.

Si el canal estuviese libre, su capacidad no influiria significativamente en dicho retardo. Pero al multiplexarse mensajes de incidencias de estados con otros de diferente tipo, (medidas, ordenes, etc.), una incidencia debe esperar que el canal se libere antes de poder ser transmitida. El tiempo que tardara en libe-

rarse dependera fundamentalmente de la longitud de los mensajes. Si los mensajes son largos debera esperar mucho y si son cortos la espera sera mas breve. Sin embargo, el precio a pagar al acortar los mensajes es una mayor ocupacion del canal, pues la eficiencia del mismo (en circunstancias normales) disminuye con la longitud. En resumen, a menor retardo mayor ocupacion del canal.

2.3.4.- Transmision de medidas.

Una problematica diferente presenta la transmision de medidas. Entenderemos por tales los valores que toman en un momento determinado distintas magnitudes del sistema como pueden ser tensiones, intensidades, potencias, temperaturas, velocidades, desplazamientos, presiones, etcetera. La adquisicion de estos valores suele hacerse mediante unos captadores que, adaptados a cada magnitud concreta que deba ser medida, la convierten a una señal electrica (tension o intensidad) funcion de la señal de entrada. La salida del captador es pasada a traves de un convertidor analogico/digital (usualmente de 12 bits) que entrega un valor digital susceptible de ser explorado por un procesador y tratado localmente y/o transmitido a niveles superiores (figura 2.14).

Dado que las medidas suelen evolucionar, con mayor o menor rapidez, pero no permanecen estaticas, los protocolos de comunicaciones no se pueden restringir, y asi ocurre industrialmente, a la comunicacion de incidencias de la medida ya que ante todo, este concepto de incidencia pierde toda su fuerza cuando no se tienen dos posibles estados o valores, sino muchos, como es el caso de las medidas. En los protocolos estudiados, la transmision de medidas se realiza ciclicamente, bien de una manera espontanea por el poseedor del dato o bien previa peticion de un centro de rango superior.

En muy contados sistemas se incluye tambien transmision de incidencias en medidas cuando la misma sobrepasa algun determinado limite. Esto sin embargo no es sustitutivo sino complementario

de la transmision ciclica. Lo que se suele hacer normalmente en estos casos es dividir todo el rango de variacion de la medida en distintas zonas, considerandose incidencia el paso de la medida de una zona a otra. Asi por ejemplo, si establecemos un limite superior y otro inferior para la medida, estamos definiendo una zona de alarma inferior, una zona normal y una zona de alarma superior.

Otra caracteristica observada en algunos sistemas es el uso de algun tipo de mecanismo de sincronizacion o congelacion de medidas para obtener un conjunto de los mismos lo mas homogeneo posible, con la importante repercusion que esto tiene en el funcionamiento de algoritmos de calculo tales como el de estimacion de estados que reseñaremos mas adelante. Esta sincronizacion se puede conseguir por sistemas mas o menos sofisticados que van desde la sincronizacion por satelite a la sincronizacion por relojes locales, pasando por sincronizacion por radio o sincronizacion por mensaje desde un centro de rango superior. Dependiendo del sistema usado se consiguen mayores o menores precisiones. En los sistemas electricos se esta experimentando muy recientemente el uso de sincronizacion via satelite para medidas de fases en la red, lo cual nos permite tener el vector de estado en una forma mucho mas directa y por tanto con menores errores.

El parametro mas importante a tener en cuenta en la transmision de medidas es que, dado su caracter ciclico y que por tanto constituyen la mayor parte de la informacion que se transmite, la ocupacion del canal sea minima para cada medida, pudiendo asi aumentar el numero de medidas por segundo que se transmiten por un

mismo canal, o bien aprovechar el canal libre para otras funciones como mejora en el retardo de incidencias de estados, seguridad de ordenes, etc.

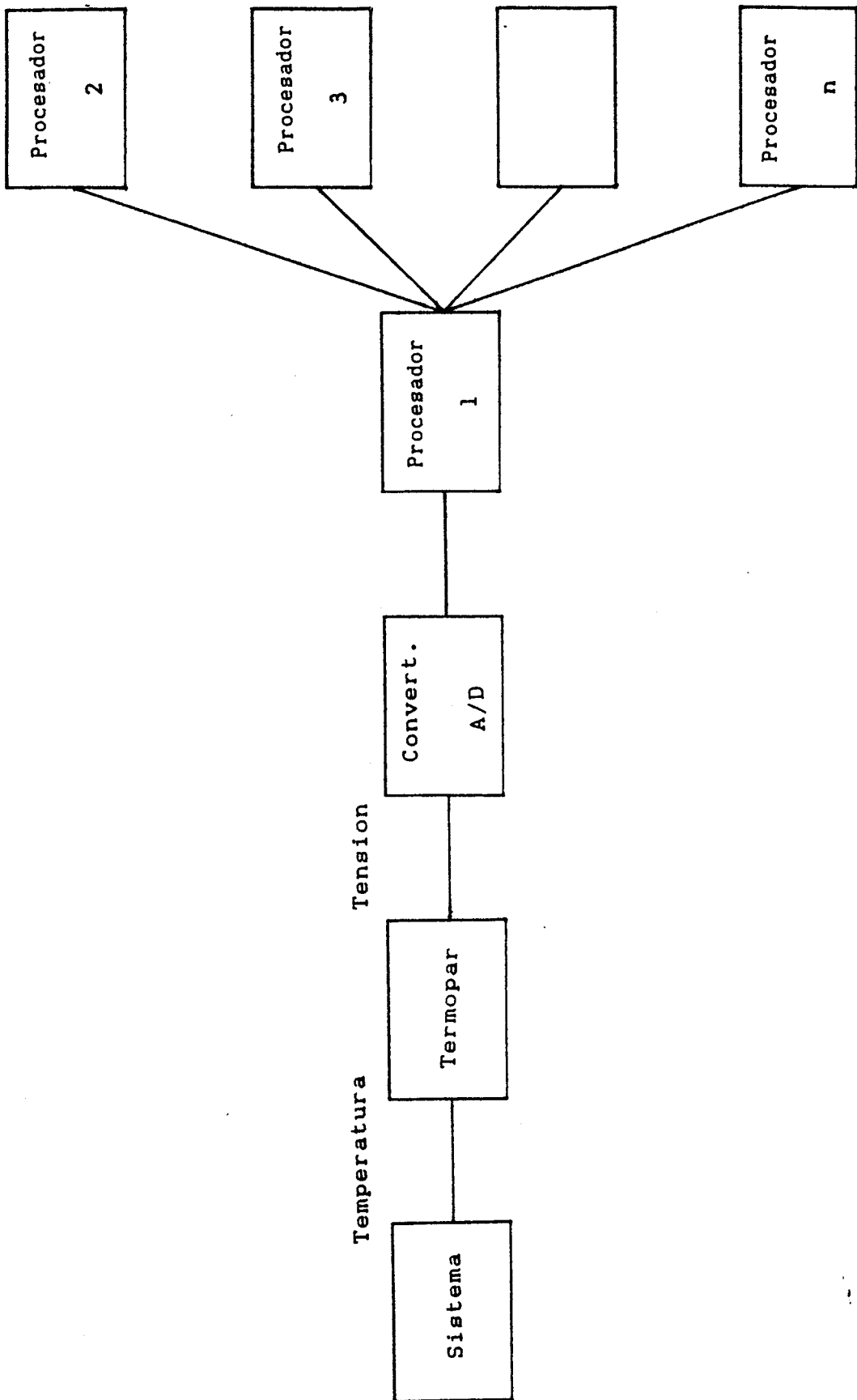


Fig. 2.14.- Esquema de captacion de una medida de temperatura.

2.3.5.- Transmision de ordenes.

La transmision de ordenes al sistema constituye una de las funciones mas importantes de un equipo de control y con seguridad la de mayor responsabilidad. La posibilidad de ejecucion de ordenes no deseadas por causa de errores en las comunicaciones debe ser minimizada a toda costa. Esta transmision de ordenes puede ejercitarse muy esporadicamente o con relativa frecuencia, segun las funciones que realice el equipo de control. La estrategia de comunicaciones en diferentes casos puede variar sensiblemente, pero de cualquier forma lo que es comun es que la transmision de ordenes constituye una parte poco importante (en volumen) del trafico total de informacion. Aqui el parametro objeto de interes es la seguridad.

Es frecuente que el protocolo de enlace de datos, comun para todo tipo de mensajes, ofrezca suficiente proteccion para mensajes de estados y medidas pero que dicha proteccion resulte insuficiente para el caso de ordenes. En ese caso se suele recurrir en el protocolo a la adicion de redundancia en este tipo de mensajes que incremente la seguridad hasta limites aceptables. Este aumento de la redundancia puede llevar a un mayor consumo de canal, aunque normalmente no resulta excesivo.

Industrialmente, este incremento de seguridad para las ordenes, o no se realiza, o se obtiene mediante el aumento redundante de la informacion que circula por el canal con el uso de distintos metodos y algoritmos.

2.3.6.- Funciones auxiliares.

En los últimos años, y a medida que los centros de control se interconectan mas y mas, aparecen funciones que, si bien son importantes y se ejecutan en tiempo real, no van encaminadas directamente al control del sistemas sino al intercambio de mensajes entre operadores, transmision de ficheros, comunicacion de imagenes, etcetera. Este tipo de comunicacion no especifica, es comun con otro tipo de sistemas ampliamente estudiados en la literatura tecnica y no sera objeto de estudio en esta Tesis.

2.4.- Sistemas de control de una red electrica.

Hemos tratado en los apartados anteriores cuestiones comunes a cualquier tipo de sistema complejo. Sin embargo, y como ya adelantamos en la introduccion de este Capitulo, siempre que necesitemos concretar sobre un tipo particular de sistema complejo, lo haremos refiriendonos a las redes electricas. Nos basamos para ello en las siguientes razones tecnicas:

- Presentan una notable complejidad.
- Son geograficamente dispersas.
- Su control se realiza mediante canales de baja velocidad.
- Presentan una problematica amplia y generalizable a otros sistemas.
- Etc.

A estas razones hay que sumarles otras de tipo logistico como son la experiencia del autor en este campo y la posibilidad de contrastes experimentales gracias al uso de sistemas reales de control. Por todo ello describiremos brevemente en los proximos apartados las características y peculiaridades de estos sistemas cuya representacion se observa en la figura 2.15, con unos procesadores que comunican directamente con la red y con otro u otros de nivel superior. Esta distribucion es unicamente a modo de ejemplo, pudiendo presentar topologias alternativas.

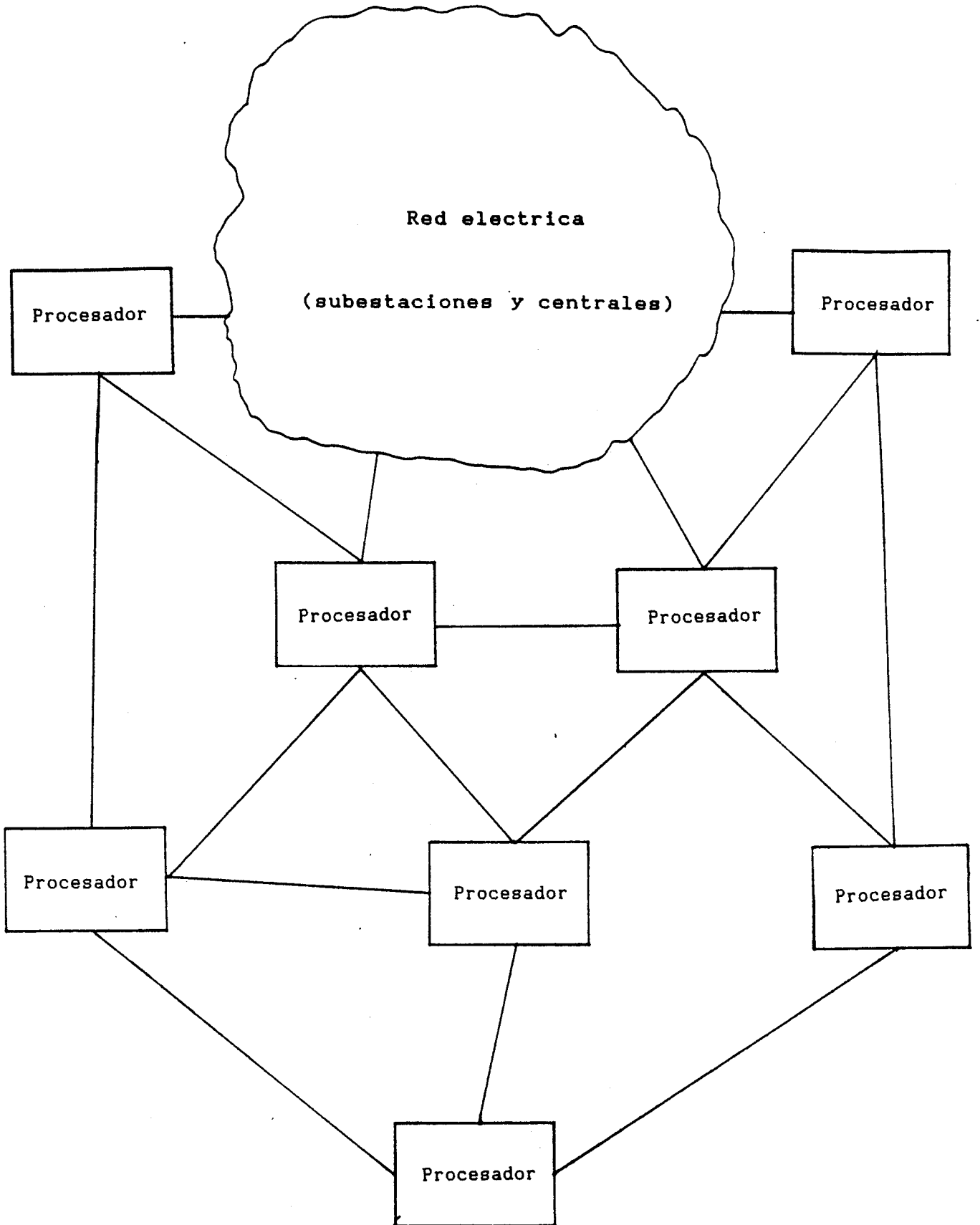


Fig 2.15.- Equipo de control de una red electrica.

2.4.1.- Perspectiva historica.

Aunque el conocimiento de la electricidad (incluso su etimología) proceden de la Grecia clasica, donde en el siglo VII a.C., Tales de Mileto hace referencia a este fenomeno, no seria hasta los siglos XVII, XVIII y sobre todo XIX cuando es objeto de un analisis cientifico por parte de autores como Coulomb, Volta, Ohm, Kirckhoff y Maxwell entre otros. Sin embargo es en el presente siglo donde el uso de la electricidad como fuente de energia para aplicaciones domesticas e industriales, ha crecido vertiginosamente, pasando en menos de medio siglo del laboratorio a constituirse en elemento cotidiano de nuestro entorno.

Las primeras aplicaciones de esta energia se hacian usando pequeños generadores de corriente continua que se hallaban cercanos a los puntos de consumo a los que llegaban a traves de lineas simples y de poca longitud. A medida que el consumo crecia, razones economicas, tecnicas, sociologicas, ecologicas y de otra indole, aconsejaron la creacion de centrales de generacion de media o gran potencia, geograficamente alejadas de los centros de consumo. Ello obliga al transporte de la energia desde los centros de produccion a los de consumo a traves de lineas de gran longitud (cientos o quizas miles de kilometros). Para disminuir en lo posible las perdidas que implica esta transmision se penso en aumentar la tension para asi disminuir la intensidad que circula por la linea, y por tanto disminuir sus perdidas.

Dadas las dificultades en la transformacion de tension de una corriente continua, se adopto la corriente alterna como nueva

forma de generacion, transporte y consumo de electricidad. Ademas se universalizo el uso trifasico de dicha corriente. Esta forma es la mas extendida hoy dia, aunque recientes investigaciones apuntan por un lado al uso de corriente continua en muy grandes distancias para disminuir las perdidas que supone la reactancia de la linea, y por otro lado el uso de 6 o 12 fases como alternativa a las tres classicas.

A medida que la produccion se concentraba y alejaba, y el consumo crecia mas y mas, se planteaba la necesidad de lineas de transporte y distribucion cada vez mas numerosas, constituyendo en muchos casos una tupida malla que lleva a la denominacion de red electrica. Este hecho se acrecienta cuando entra en consideracion la continuidad del servicio ante eventuales fallos de lineas, generadores y otros elementos a los que se les hace frente recurriendo al empleo de lineas o generadores alternativos, con lo que ello implica en cuanto a redundancia de la red.

Para incrementar aun mas la seguridad en la continuidad del servicio, se interconectan las redes de distintas compañías suministradoras, asi como las de distintos paises entre si. Podemos decir de una forma grafica aunque no rigurosa, que con las actuales redes electricas de potencia cuando se enciende una lampara en Moscu, el regulador de la turbina de Algeciras se abre un poco mas para contribuir con la parte de potencia necesaria.

Nos encontramos pues ante un sistema complejo de generadores y consumidores unidos a traves de una red de lineas y subestaciones, con el objetivo de suministrar la energia electrica demanda-

da. Este sistema esta sujeto a dos grandes condicionamientos. El primero de ellos es tecnico y nos dice que la potencia consumida en un instante (incluidas las perdidas en la transmision) debe ser igual a la generada en ese mismo instante. O lo que es lo mismo, la energia electrica no se puede almacenar (al menos como tal y en las condiciones de explotacion normales) y por tanto los generadores deben seguir a la demanda en sus variaciones instantaneas. El segundo condicionamiento de caracter economico y sociologico es que el suministro de energia electrica debe hacerse con la mayor seguridad posible en la continuidad del servicio.

Todo ello nos enfrenta con el ingente problema de la operacion y control de todo este complejo sistema. Hasta la decada de los 60 este problema se abordaba mediante un equipo muy numeroso de personas situadas en subestaciones y centros de generacion que comunicaban telefonicamente con un centro de control que impartia las ordenes y consignas adecuadas para el correcto funcionamiento del sistema. Este metodo de funcionamiento resulta, como es obvio, poco eficaz en el sentido de rapidez de respuesta, economia y seguridad de la red. Es a finales de esa decada de los 60 cuando empiezan a surgir los primeros centros de control con computadores con funciones inicialmente simples, pero que han ido ganando en complejidad durante estas dos decadas.

En los siguientes apartados presentamos las funciones mas significativas de los sistemas de control de redes de potencia y que tienen una correspondencia clara con otros tipos de sistemas complejos.

2.4.2.- Adquisición de datos.

Las iniciales inglesas de "Supervisory Control And Data Acquisition" constituyen lo que en la literatura se ha dado en llamar la función de SCADA. Dicha función es la primaria en un centro de control y consiste en la adquisición de los datos de estados y medidas de la red, su tratamiento, presentación al operador y ejecución de las órdenes del mismo sobre la red. Sobre los datos adquiridos por esta función es sobre los que trabajan las demás funciones que más adelante se presentan.

La función de SCADA es realizada por un computador central (generalmente en configuración dual) que enlaza mediante líneas telefónicas, radio, onda portadora, etcétera, con otros procesadores remotos situados en las subestaciones y centrales a controlar. Estas unidades remotas, mediante los convertidores e interfaces adecuados son capaces de conocer el estado y medidas de la subestación (o central generadora), así como de realizar mandos sobre la misma. Mediante el enlace de las remotas con el centro, este tiene conocimiento de los estados y medidas de la red que controla. Dichos datos son procesados, almacenados, presentados al operador y eventualmente enviados a otros centros asociados o de nivel superior. De la misma manera, el centro puede recibir datos no solo de las remotas sino también de otros centros de control. Tenemos pues un sistema complejo de procesadores que se comunican entre sí para el control de la red de potencia.

Notese que estas comunicaciones son la base fundamental sobre la que se cimentarán todas las demás funciones, y mientras

mas solidas, fiables y eficaces sean, mejores resultados se obtendran en el control de la red. Desde el punto de vista de comunicaciones la funcion de SCADA plantea dos problemas principales:

- Adquisicion de los datos de la red con la mayor rapidez posible.
- Envio de ordenes de la forma mas segura posible.

2.4.3.- Regulacion frecuencia-potencia.

A principio de los años 60, y casi simultaneamente con el SCADA, aparecieron los primeros centros de control de energia que incorporaban la funcion de AGC (iniciales de Automatic Generation Control). Este control automatico de la generacion viene a responder al condicionamiento tecnico ya planteado, segun el cual la potencia demandada en un instante debe ser generada en ese mismo instante. Dadas las características principalmente inductivas de las cargas, ante un aumento de la demanda no correspondido con un aumento de la generacion, la propia dinamica de la red responde con una disminucion de la frecuencia hasta que se alcanza un nuevo punto de equilibrio entre potencia generada y demandada.

Esta disminucion de la frecuencia es en primera instancia detectado por los reguladores locales de los distintos generadores los cuales actuan en el sentido de aumentar el flujo de energia de entrada (agua, vapor, ...) al propio generador, que tiende a restablecer la frecuencia nominal de la red. La variacion en las medidas que provoca, primero el aumento de la demanda, y despues la actuacion de los reguladores locales, es detectado por el centro de control que envia a los generadores las consignas necesarias para hacer frente definitivamente al aumento producido en la demanda. Este mecanismo descrito constituye la llamada regulacion pura en frecuencia, propia de redes pequeñas y cuyo diagrama de bloques podemos ver en la figura 2.16.

Las redes sin embargo raramente estan aisladas y cada vez es mas usual el uso de interconexion de redes para intercambio de

energía entre dos compañías. En estos casos, se pactan periódicamente las potencias que circularán por las interconexiones, bien en uno u otro sentido. Al aumentar el tamaño de la red, disminuye la sensibilidad de la frecuencia ante variaciones en la carga. Dicho en otras palabras, al aumentar la demanda lo que ocurre fundamentalmente es un aumento en la potencia consumida a través de las interconexiones. Esto, que supone una desviación frente a los valores comprometidos con las otras compañías, no es detectable por los reguladores locales de los generadores, sino que tiene que ser el centro de control el que, al notar dicha desviación, envíe consignas a los generadores para que restablezcan el equilibrio perdido. Este mecanismo constituye la regulación pura en potencia que, hasta hace muy pocos años, era la usada por todas las compañías españolas peninsulares, excepto Iberduero.

Sin embargo lo más frecuente es que se use un sistema mixto de control basado tanto en las desviaciones de la potencia a través de las interconexiones, como en las variaciones de la frecuencia de la red, introduciendo el concepto de error de control de área (ACE por seguir la nomenclatura más extendida) que toma la forma

$$\text{ACE} = \text{Error neto en interconexiones} + B_f \times \text{Error en frecuencia}$$

en el que B_f es el coeficiente que nos dice los Megawatios extras que hay que generar cuando la frecuencia cae un Hertzio. El objetivo del AGC es hacer que este error de control de área sea cero, enviando para ello consignas a los grupos generadores de la red. Este sistema se representa esquemáticamente en la figura 2.17.

La red peninsular española se comporta de esta forma desde que hace pocos años se implantó el sistema de regulación compartida nacional (RCN) en el que cada compañía se encarga no solo de mantener la potencia a través de las interconexiones en sus valores de consigna, sino que debe contribuir en cierta medida (factor B_f) a la estabilidad de la frecuencia. La proporción con la que cada compañía debe contribuir a la estabilidad de la frecuencia (y de las interconexiones con Francia y Portugal) es fijada mediante consignas que el centro de control de Iberduero envía a los centros de las demás compañías. En un futuro inmediato y cuando el centro de control eléctrico nacional (CECOEL) se encuentre en pleno servicio, dichas consignas serán enviadas por REDESA desde el mencionado centro. Estas consignas serán interpretadas por los despachos centrales de cada compañía que transmitirán las consignas pertinentes a cada uno de sus generadores a través de los procesadores asociados a los mismos.

Desde el punto de vista de comunicaciones el AGC plantea un reto importante en cuanto a la transmisión de órdenes que deben ser rápidas y muy seguras.

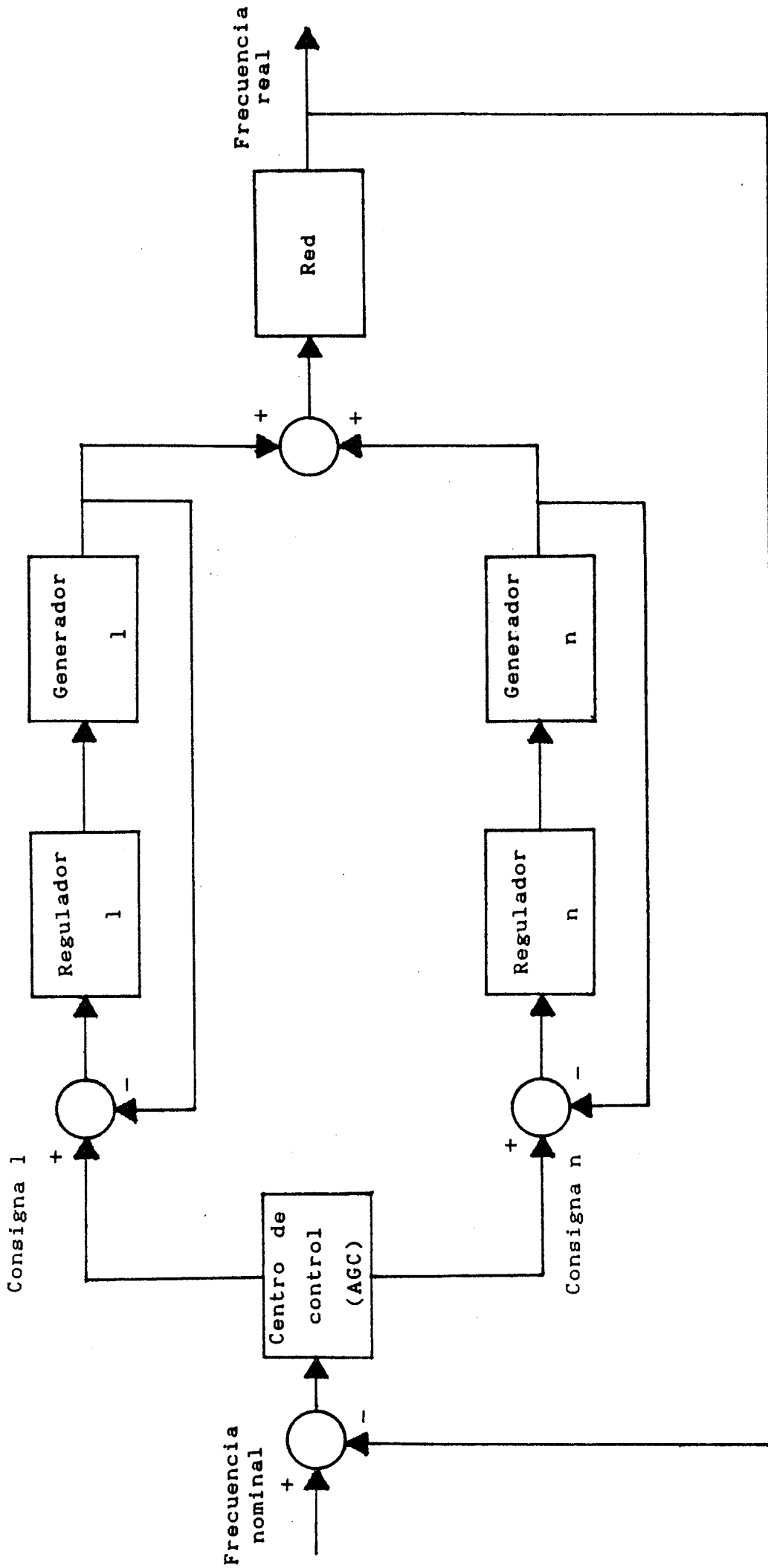


Fig. 2.16.- Esquema de regulacion en frecuencia.

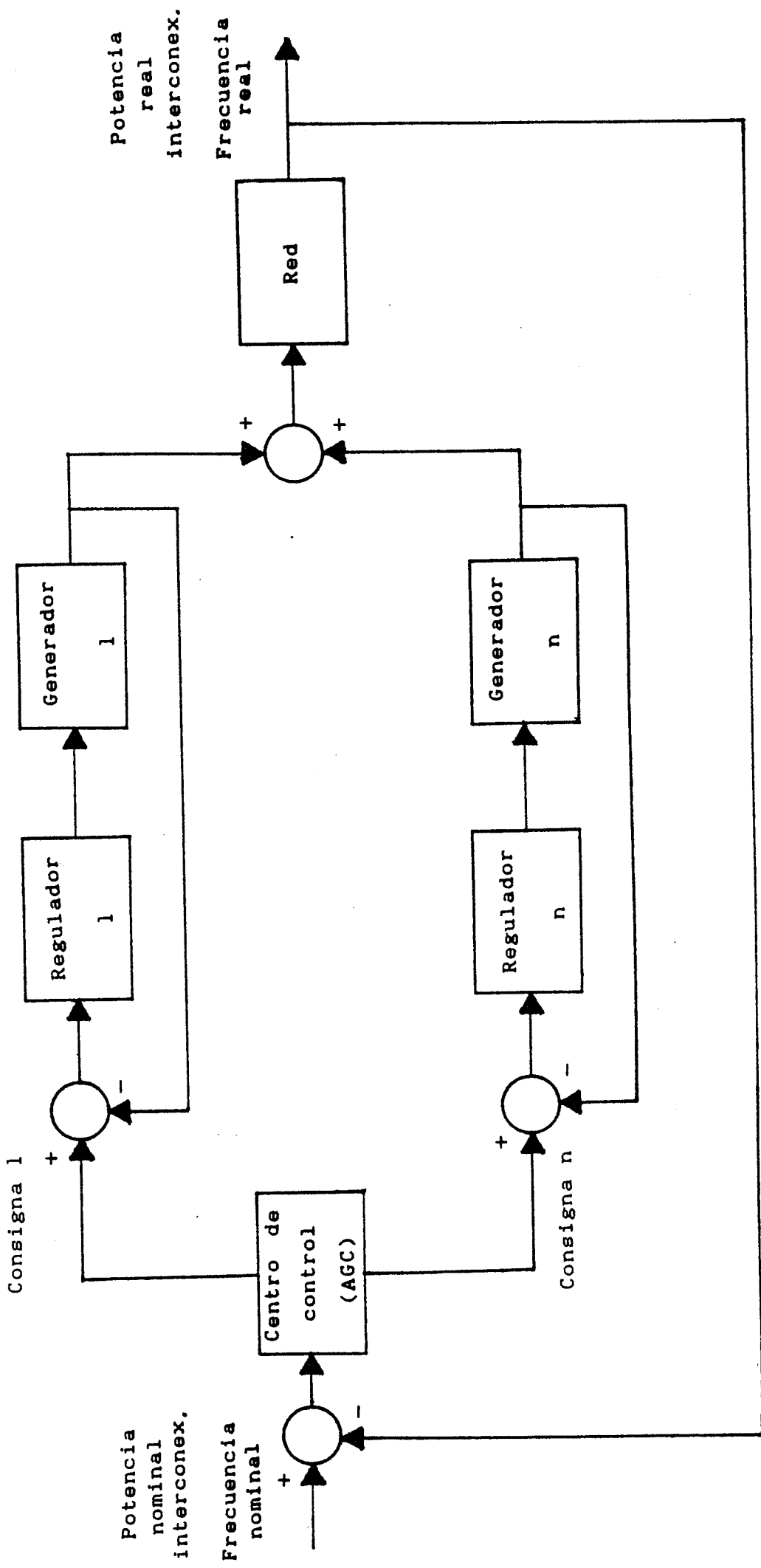


Fig.2.17.- Esquema de regulacion frecuencia-potencia.

2.4.4.- Estimacion de estados.

Los datos adquiridos por la funcion de SCADA constituyen (o deben constituir) informacion suficiente para conocer el estado de la red. Este estado toma usualmente la forma de las tensiones y fases en todos los nudos de la red, o bien las potencias activas y reactivas en dichos nudos. Sin embargo los datos teletransmitidos al centro no constituyen de por si un vector de estados, y ademas vienen afectados de un margen de error.

A principio de los años 70 y fundamentalmente a raiz del famoso "apagon de Nueva York" se comenzaron a estudiar tecnicas que permitiesen conocer el vector de estados a partir de las medidas suministradas por el SCADA. Dichas tecnicas, conocidas con el nombre de estimacion de estados, fueron por primera vez instaladas en un centro de control en 1.975, no siendo hasta fechas muy recientes cuando su uso se ha hecho mas general.

La estimacion de estados da un enfoque estadistico al problema planteado, suponiendo que las medidas son variables aleatorias de las cuales conocemos una muestra y con ella tratamos de encontrar la mejor estimacion del estado de la red. Dicha estimacion se obtiene minimizando un funcional del tipo

$$J(x) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} [z_i - f_i(x)]^2$$

siendo

x : Vector de estado.

- σ_i^2 : Varianza de la medida iesima.
 z_i : Medida iesima.
 $f_i(x)$: Valor calculado de la medida iesima.
 N : Numero de medidas (mayor que la dimension del vector de estados).

El vector asi estimado, puede usarse como estado de la red en funciones de calculo del centro de control como reparto de cargas, despacho economico, analisis de seguridad, etcetera. Como productos derivados de esta tecnica tenemos:

- Deteccion de datos falsos, definidos como aquellos en los que la diferencia entre su valor medido y calculado difieren por encima de un umbral de referencia. Esta falsedad es fundamentalmente debida a problemas en los equipos de medida y/o transmision, indicandose a los operadores la necesidad de revision de dichos equipos.
- Determinacion de zonas no observables de la red, bien por fallos momentaneos de la transmision, bien por problemas de diseño y eleccion de las medidas transmitidas.
- Calculo de datos no teletransmitidos para su representacion al operador, archivo historico u otros propositos.

Un problema especial que se plantea en la estimacion del estado de la red es la presencia de nudos de interconexion con otras redes. Este problema se suele abordar reduciendo la red externa por su equivalente. Para esta reduccion se pueden usar da-

tos calculados de la red externa en base a los valores de la red interna y que son suministrados por el propio algoritmo de estimación. Otra aproximación al problema es el intercambio de información entre centros de control adyacentes, que permiten evaluar el equivalente externo con mayor exactitud. En la práctica lo más frecuente es recurrir a técnicas mixtas de reducción de la red externa en base a datos de dicha red y datos de la red interna.

En España, el ya mencionado centro de control eléctrico nacional de REDESA, al conocer el estado general de la red peninsular, podrá suministrar, y de hecho así se preve, el equivalente externo a cada compañía en cada una de sus interconexiones.

Desde el punto de vista de comunicaciones, el principal problema que plantea la estimación de estados es contar con un conjunto de datos tomados en instantes los más cercanos posibles para obtener la mejor aproximación posible a una "fotografía" de la red. Aunque hay algunos estudios sobre el tema, no se puede predecir el efecto de datos desfasados sobre el algoritmo de estimación de estados.

CAPITULO 3

3.- CALIDAD DE LOS DATOS.

3.1.- Introduccion.

En un sistema complejo de control constituido por multiples procesadores, los datos son transmitidos de un procesador a otro en funcion de la organizacion del sistema y de la evolucion del propio fenomeno a controlar. Visto desde un procesador particular, un dato es recibido despues de recorrer una ruta mas o menos larga desde su captacion. Durante este trayecto ha ido sufriendo una serie de retardos por lo que llega al procesador un cierto tiempo despues. Podemos pues hablar de la edad de un dato en dicho procesador como un concepto intuitivo que luego formalizaremos. Esta edad es interesante conocerla para tener una orientacion de la calidad de la informacion que nos puede suministrar un procesador, así como comparar distintos sistemas de control. Por ejemplo si en un sistema de control de una red electrica decimos que la edad de una potencia generada por un alternador en el procesador que presenta los datos al operador de la central, es de 1 segundo, no es lo mismo que si decimos que dicha edad es de 1 minuto.

Si dos datos han seguido rutas distintas hasta llegar a un procesador, pueden haber sufrido retardos distintos, por lo que además de las edades respectivas cabe hablar de otro fenómeno que denominaremos el desfase entre ambos datos y que nos da una idea de cuanto se aproxima la imagen que el procesador tiene del sistema controlado a una fotografía del mismo en un instante dado. Este parametro nos da también una idea de la calidad de los datos y nos permite por tanto comparar distintos sistemas de control.

Estos valores de edad y desfase son muy importantes para muchos algoritmos de control que pueden dar mejores o peores resultados en función de que se mantengan ambos pequeños o no.

3.2.- Edad.

Sea un sistema complejo controlado por una red de procesadores. Sea un dato i que debe recorrer una ruta hasta llegar al procesador k . Sea un vector de parametros de transmision p , que define como y cuando se produce la transmision a traves de la ruta. Se define la edad del dato i en el procesador k en el instante t con parametros de transmision p , como

$$E_i^k(t,p) = t - t_i \quad \text{para } t \geq t_i$$

siendo t_i^0 o simplemente t_i el instante en que fue captado del "campo". En general t_i^k es el instante en el que fue captado del procesador k .

De la definicion anterior deducimos que la edad de cualquier dato en el campo es siempre cero:

$$E_i^0(t,p) = 0$$

Podemos expresar tambien la edad en un procesador en funcion de la edad en el procesador anterior de la ruta. Asi

$$E_i^k(t,p) = (t_i^{k-1} - t_i) + (t - t_i^{k-1})$$

expresion en la que el primer termino representa la edad i en el procesador $k-1$ en el instante de su captacion

$$E_i^k(t,p) = E_i^{k-1}(t_i^{k-1},p) + (t - t_i^{k-1})$$

El segundo termino representa el envejecimiento a\u00f1adido por pasar del procesador $k-1$ al procesador k . Por definicion

$$A_i^k(t,p) = t - t_i^{k-1}$$

sustituyendo

$$E_i^k(t,p) = E_i^{k-1}(t_i^{k-1},p) + A_i^k(t,p)$$

expresion que nos dice que la edad en un procesador es igual a la edad en el procesador anterior mas el envejecimiento añadido por pasar de un procesador a otro.

El valor de la edad vemos que es dependiente del tiempo y del vector de parametros de transmision. Sin embargo, y para que este concepto tenga una utilidad practica, deberemos definir aquellas cotas maxima y minima de la edad que se consiguen en un instante determinado y para unos valores del vector de parametros determinado. Para ello definimos las siguientes variables:

- E_i^k : Maxima edad del dato i en el procesador k .
- e_i^k : Minima edad del dato i en el procesador k .
- V_i^{k-1} : Maxima edad del dato i en el procesador $k-1$ cuando fue captado para su transmision al procesador k .
- v_i^{k-1} : Minima edad del dato i en el procesador $k-1$ cuando fue captado para su transmision al procesador k .
- A_i^k : Maximo envejecimiento añadido del dato i al pasar del procesador $k-1$ al k .
- a_i^k : Minimo envejecimiento añadido del dato i al pasar del procesador $k-1$ al k .

Notese que V_i^{k-1} no tiene porque coincidir con E_i^{k-1} y lo mismo ocurre con sus minimos. Igualmente se ha de notar que los valores E_i^k y e_i^k pueden no ser alcanzables en determinados sistemas

pero en cualquier caso definen unas cotas alcanzables o no de la edad de un dato. Asi

$$e_i^k \leq E_i^k(t,p) \leq E_i^k$$

De las definiciones es claro que

$$E_i^k = V_i^{k-1} + A_i^k$$

$$e_i^k = v_i^{k-1} + a_i^k$$

Como aplicacion de la anteriormente expuesto consideraremos varios ejemplos de transmision de datos.

1) En primer lugar consideremos que el procesador k solicita al $k-1$ el dato i a intervalos de tiempo T_i^k . Cuando el procesador $k-1$ recibe la peticion, toma el dato (instante t_i^{k-1}) y lo envia al procesador k , al cual llega despues de un tiempo δ_i^k . Tenemos que el envejecimiento añadido en un instante t sera

$$A_i^k(t,p) = \delta_i^k + t \quad 0 \leq t \leq T_i^k$$

que tomara su valor minimo en el instante siguiente a la recepcion del dato y su valor maximo en el instante precedente a la recepcion del dato del ciclo siguiente. Es decir

$$A_i^k = \delta_i^k + T_i^k \quad a_i^k = \delta_i^k$$

Si el procesador $k-1$ usa el mismo metodo de adquisicion de datos, vemos que

$$V_i^{k-1} = E_i^{k-1} \quad y \quad v_i^{k-1} = e_i^{k-1}$$

Por tanto

$$E_i^k = E_i^{k-1} + \delta_i^k + T_i^k$$

$$e_i^k = e_i^{k-1} + \delta_i^k$$

Si todo el sistema se comporta de igual forma podemos escribir recursivamente para el nivel n .

$$E_i^n = \sum_{k=1}^n \delta_i^k + \sum_{k=1}^n T_i^k$$

$$e_i^n = \sum_{k=1}^n \delta_i^k$$

con solo recordar que $E_i^0 = e_i^0 = 0$

2) Un segundo caso interesante de consideracion es aquel en el que el procesador $k-1$ recibe orden de lectura del dato i a intervalos de tiempo T_i^k . En este momento (instante t_i^{k-1}) toma el dato y lo almacena para enviarlo al procesador k , bien espontaneamente, bien previa peticion de este, al cual llega δ_i^k segundos despues de la lectura. Tenemos que el envejecimiento añadido en el instante t sera

$$A_i^k(t,p) = \delta_i^k + t \quad 0 \leq t \leq T_i^k$$

que tomara su valor minimo en el instante siguiente a la recepcion del dato y su valor maximo en el instante precedente a la recepcion del dato del ciclo siguiente. Es decir

$$A_i^k = \delta_i^k + T_i^k \quad a_i^k = \delta_i^k$$

3) Un tercer caso es aquel en el que el procesador $k-1$ envia el dato i al procesador k , α_i^k segundos despues de recibirlo del nivel anterior. El envio se produce cada T_i^k segundos y llega al

procesador k despues de δ_i^k segundos. En este caso el envejecimiento añadido en el instante t es

$$A_i^k(t,p) = \delta_i^k + t_i^k \quad 0 < t < T_i^k$$

cuyos valores maximo y minimo son respectivamente

$$A_i^k = \delta_i^k + T_i^k \quad a_i^k = \delta_i^k$$

Lo que se consigue con este sistema es que

$$V_i^{k-1}(t,p) = v_i^{k-1} = V_i^{k-1} = e_i^{k-1} + \alpha_i^k$$

4) Como una combinacion de los 2 casos anteriores es el caso de una red de procesadores en la cual el primer nivel usa una lectura periodica y los demas niveles una transmision del dato i despues de α_i^k segundos de recibirlo del nivel anterior. Para el primer nivel tenemos

$$E_i^1 = V_i^0 + A_i^1 \quad e_i^1 = v_i^0 + a_i^1$$

Recordemos que

$$A_i^1 = \delta_i^1 + T_i^1 \quad a_i^1 = \delta_i^1$$

$$V_i^0 = v_i^0 = 0$$

Por tanto

$$E_i^1 = \delta_i^1 + T_i^1 \quad e_i^1 = \delta_i^1$$

Para los demas niveles

$$E_i^k = V_i^{k-1} + A_i^k \quad e_i^k = v_i^{k-1} + a_i^k$$

Ya vimos que

$$v_i^{k-1} = v_i^{k-1} = e_i^{k-1} + \alpha_i^k$$

$$A_i^k = \delta_i^k + T_i^k \qquad a_i^k = \delta_i^k$$

Por tanto

$$E_i^k = e_i^{k-1} + \alpha_i^k + \delta_i^k + T_i^k$$

$$e_i^k = e_i^{k-1} + \alpha_i^k + \delta_i^k$$

$$E_i^{k-1} = e_i^{k-2} + \alpha_i^{k-1} + \delta_i^{k-1} + T_i^{k-1}$$

$$e_i^{k-1} = e_i^{k-2} + \alpha_i^{k-1} + \delta_i^{k-1}$$

.....

de donde, generalizando para el nivel n

$$E_i^n = \sum_{k=2}^n \alpha_i^k + \sum_{k=1}^n \delta_i^k + T_i^n$$

$$e_i^n = \sum_{k=2}^n \alpha_i^k + \sum_{k=1}^n \delta_i^k$$

3.3.- Desfase.

Sea un sistema complejo controlado por una red de procesadores. Sea un par de datos i, j que deben recorrer una ruta (en principio distinta para cada uno de ellos) hasta llegar al procesador k . Sea un vector de parametros de transmision p que define como y cuando se produce la transmision a traves de la ruta. Se define el desfase entre los datos i, j en el procesador k en el instante t con parametros de transmision p como

$$D_{ij}^k(t, p) = t_i - t_j$$

siendo t_i y t_j los instantes en que fueron captados del campo los datos i y j respectivamente. Recordando que

$$E_i^k(t, p) = t - t_i \quad \text{y} \quad E_j^k(t, p) = t - t_j$$

podemos escribir restando ambos que

$$E_j^k(t, p) - E_i^k(t, p) = (t - t_j) - (t - t_i) = t_i - t_j$$

por tanto

$$D_{ij}^k(t, p) = E_j^k(t, p) - E_i^k(t, p)$$

Definimos D_{ij}^k y d_{ij}^k como los valores maximo y minimo respectivamente del desfase entre los datos i, j en el procesador k .

El concepto intuitivo de la edad de un dato nos permite conocer cuan antiguo puede ser un valor en un momento dado. El desfase entre los datos es util para conocer las dificultades de convergencia que pueden tener los algoritmos de calculo en los distintos procesadores, en tanto que mide cuanto se aparta la

imagen del sistema de una "fotografia".

Pues bien, mientras la edad y sus cotas nos son utiles tal como las hemos definido, no ocurre asi con el desfase, pues los valores para un algoritmo de calculo son leidos de la memoria en un instante determinado, relacionado con el protocolo de comunicaciones del sistema. Sea t_m el emesimo instante de seleccion para el algoritmo de calculo. Definimos el desfase selectivo Φ de dos datos i, j en el nivel k con parametros p a la expresion

$$\Phi_{ij}^k(m, p) = D_{ij}^k(t_m, p)$$

que podemos escribir tambien como

$$\Phi_{ij}^k(m, p) = E_j^k(t_m, p) - E_i^k(t_m, p)$$

Definimos Φ_{ij}^k y φ_{ij}^k como los valores maximo y minimo respectivamente del desfase selectivo entre los datos i, j en el procesador k . Estas cotas, al igual que ocurría con las de la edad de un dato pueden no ser alcanzables. Se cumple que

$$\varphi_{ij}^k \leq \Phi_{ij}^k(m, p) \leq \Phi_{ij}^k$$

Notese que si no hay tal seleccion de datos en un instante dado se tiene que

$$\Phi_{ij}^k = D_{ij}^k \quad \text{y} \quad \varphi_{ij}^k = d_{ij}^k$$

Estudiemos algunos ejemplos de transmision de datos calculando el desfase selectivo en cada uno de ellos.

1) En primer lugar consideremos el caso del procesador k que solicita al nivel inferior $k-1$ los datos i y j a intervalos res-

pectivos T_i^k y T_j^k . La toma del dato se produce en los instantes t_i^{k-1} y t_j^{k-1} , llegando al procesador k después de un tiempo δ_i^k y δ_j^k respectivamente. Como se vio anteriormente

$$E_i^k = E_i^{k-1} + \delta_i^k + T_i^k$$

$$e_i^k = e_i^{k-1} + \delta_i^k$$

$$E_j^k = E_j^{k-1} + \delta_j^k + T_j^k$$

$$e_j^k = e_j^{k-1} + \delta_j^k$$

La selección para los algoritmos de cálculo se hace a intervalos fijos de T_s segundos, sin relación alguna con la adquisición de datos. Por tanto

$$\phi_{ij}^k = D_{ij}^k = E_j^k - e_i^k$$

$$\varphi_{ij}^k = d_{ij}^k = e_j^k - E_i^k$$

Si este sistema se mantiene durante toda la ruta vimos que

$$E_i^k = \sum_{r=1}^k \delta_i^r + \sum_{r=1}^k T_i^r$$

$$e_i^k = \sum_{r=1}^k \delta_i^r$$

$$E_j^k = \sum_{r=1}^k \delta_j^r + \sum_{r=1}^k T_j^r$$

$$e_j^k = \sum_{r=1}^k \delta_j^r$$

Por tanto

$$\phi_{ij}^k = \sum_{r=1}^k (\delta_j^r + T_j^r - \delta_i^r)$$

$$\varphi_{ij}^k = \sum_{r=1}^k (\delta_j^r - \delta_i^r - T_i^r)$$

Por otra parte si

$$\delta_i^r = \delta_j^r = \delta^r \quad \forall i, j, r$$

y

$$T_i^r = T_j^r = T^r \quad \forall i, j, r$$

tenemos que

$$\phi_{ij}^k = \sum_{r=1}^k T^r$$

$$\varphi_{ij}^k = - \sum_{r=1}^k T^r$$

2) Un segundo caso interesante es aquel en el que el procesador del nivel $k-1$ congela los datos i, j a intervalos periodicos T_{ij}^k . Esta congelacion puede ser espontanea o inducida por el procesador k . A continuacion envia los datos los cuales llegan al nivel k despues de δ_i^k y δ_j^k segundos respectivamente. Cuando lle-

gan los dos datos se procede a su captación para los algoritmos de cálculo. El desfase selectivo en todo este proceso es pues

$$\phi_{ij}^k = \phi_{ij}^{k-1}$$

$$\psi_{ij}^k = \psi_{ij}^{k-1}$$

3) Consideremos por último el caso de una red de procesadores en la cual el primer nivel usa una congelación periódica y los demás niveles una transmisión de los datos i, j después de α_{ij}^k de recibir el segundo de ellos (bien sea el i o el j). La captación de los datos para los algoritmos de cálculo tiene lugar cuando han llegado ambos. Para el primer nivel tenemos que

$$\phi_{ij}^1(m, p) = \phi_{ij}^0(m, p) = 0$$

y para todos los demás podemos escribir

$$\phi_{ij}^k(m, p) = 0$$

3.4.- Conclusiones.

Se ha presentado en este capítulo el cuerpo teórico que permite formalizar conceptos intuitivos de calidad de los datos, como son la edad y el desfase. Ello nos permite dado un sistema concreto analizarlo cuantitativamente con estos criterios buscando posibles vías de optimización o comparando soluciones alternativas.

Sin embargo es posible también establecer a priori ciertos criterios de diseño en base a los estudios anteriores. En primer lugar vemos que si usamos sistemas con congelación de datos y que captan los datos para los algoritmos de cálculo en el instante en que han llegado todos ellos, obtenemos un desfase selectivo nulo

$$\Phi_{ij}^k(m,p) = 0 \quad \forall i,j,k$$

Por otra parte llamando

$$\delta_i = \sum_{k=1}^n \delta_i^k$$

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^n \alpha_i^k$$

$$T_i = \sum_{k=1}^n T_i^k$$

vemos que la edad mínima del dato i depende de los tiempos de transmisión δ_i^k y de retención α_i^k , mientras que la edad máxima lleva un sumando adicional función de los periodos de envío de

datos entre procesadores de niveles adyacentes. De todos los sistemas estudiados, aquel que nos da menor valor en la edad maxima es el de transmision del dato i despues de una retencion de α_i^k segundos. La expresion de la edad maxima en el procesador n es

$$E_i^n = \delta_i + \alpha_i + T_i^n$$

Podriamos preguntarnos el sentido de la retencion α_i^k , pues el menor valor de E_i^n se obtiene para $\alpha_i = 0$. Sin embargo, aunque teoricamente ello es posible, en la realidad resulta poco operativo enviar un dato inmediatamente despues de recibirlo, pues lo normal es que la eficiencia del canal de transmision obligue a agrupar varios datos antes de ser enviados, con lo cual algunos de ellos deberan ser retenidos en espera del volumen suficiente de informacion. Asi por ejemplo, si suponemos que cualquier mensaje entre dos procesadores lleva 40 bits fijos (cabecera, direccion, longitud, deteccion de errores, etc.) y que un dato ocupa 16 bits, la eficiencia del canal si enviamos un solo dato sera del 29%, del 44% con 2 datos, del 62% con 4 datos, del 76% con 8 datos y del 86% con 16 datos. El valor de α_i^k debe ser pues elegido mediante un compromiso entre la edad de los datos y la eficiencia del canal de transmision. Si, como demostraremos en los capitulos siguientes, es posible optimizar la ocupacion del canal, los nuevos recursos disponibles pueden ser usados en que el parametro α_i^k ^o se mas pequeño y por tanto la edad de los datos disminuya, o tambien y principalmente, en disminuir los periodos T_i^k de envio de datos entre procesadores, con analogo efecto en la disminucion de la edad de dichos datos.

Asi pues, en nuestra opinion, el sistema elegido debe responder a la siguiente descripcion:

"Red de procesadores en la que se producen ordenes simultaneas y periodicas de congelacion de datos en el nivel mas bajo de la red, y transmision de un nivel a otro con retenciones tan pequenas como permita una correcta eficiencia de los distintos canales."

Esta conclusion que puede parecer obvia, esta sin embargo escasamente difundida en los sistemas industriales en funcionamiento.

CAPITULO 4

4.- TRANSMISION DE MEDIDAS.

4.1.-Introduccion.

En la mayoria de los sistemas complejos cuyo control tratamos de estudiar y optimizar, se presenta la cuestion de la transmision de medidas entre los procesadores encargados de dicho control. Esta transmision debe ser ademas de caracter ciclico respetando los criterios enunciados en el capitulo anterior relativos a la edad y desfase de los datos. El caracter ciclico de la transmision, con frecuencia a intervalos de tiempo cortos, hace que se constituyan en el mensaje que ocupa el canal mayoritariamente, con ocupaciones que, dependiendo del sistema, pueden ser superiores al 95% del total de la informacion que circula por dicho canal.

El enfoque tipico de este problema es la transmision de las medidas de un nivel a otro tal cual las posee el nivel emisor, pero agrupadas varias de ellas en un mensaje atendiendo a periodos de muestreo, velocidad del canal, tasa de errores, etc. Sin embargo, se pretendiera en este capitulo ofrecer un enfoque diferente del problema para obtener menores ocupaciones del canal.

Para ello estudiaremos en primer lugar las series temporales y a continuacion los sistemas discretos que nos ofrecen planteamientos duales del mismo problema. Con ello trataremos de predecir los valores de las medidas y, aprovechandonos de esta prediccion, reducir la ocupacion del canal mediante un protocolo mejorado.

4.2.- Estudio mediante series temporales.

Tengamos una variable que toma distintos valores a lo largo del tiempo. Tomemos los valores de dicha variable en unos instantes determinados (usualmente a intervalos fijos). Obtenemos de esa manera un conjunto de valores que denominamos una serie temporal. Mas generalmente podemos tener un conjunto de variables dependientes que evolucionan en funcion de otro conjunto de variables independientes (por ejemplo espacio-temporales) y de las cuales tomamos unas muestras discretizadas.

El analisis de estas series temporales es una rama de las Matematicas que pretende explotar la informacion inherente a la serie y obtener consecuencias de ella. En particular, este analisis, relacionado con el analisis espectral, es ampliamente usado en econometria y en analisis de señales.

Si la variable $Y(t)$ es una variable aleatoria para cualquier valor de t , el conjunto de valores de $Y(t)$ se denomina un proceso estocastico o tambien una funcion aleatoria. Un proceso estocastico se dice estacionario hasta el orden m si todos los momentos hasta el de orden m existen y son iguales para cualquier valor de t . Como caso particular y mas frecuente, se dice que un proceso estocastico es estacionario hasta el orden 2 si la media, varianza y covarianza permanecen constantes a lo largo del tiempo. Gran parte de la teoria de analisis de series temporales se basa en la suposicion de procesos estacionarios. En algunos casos en que la serie original no es estacionaria, se puede conseguir otra estacionaria a partir de ella, y estudiar luego la serie asi obteni-

da. Una de estas tecnicas consiste en obtener las diferencias entre dos valores consecutivos de la serie original.

Si tenemos un proceso estocastico, a los efectos que perseguimos, nos interesa obtener un modelo del mismo. Para ello se proponen en la literatura varios modelos patron, que se suelen usar como referencia cuando se desconoce la naturaleza del proceso. Veremos los mas interesantes de ellos.

Supongamos que tenemos un proceso estocastico estacionario $Y(t)$ y una muestra del mismo en el instante k formado por los valores

$$y_k, y_{k-1}, y_{k-2}, \dots$$

Supongamos que dicho proceso tiene media nula (en caso contrario se puede obtener una serie asociada que si la tenga con solo restarle la media a la serie original). Un primer modelo es aquel que considera

$$y_k = a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} + \dots + a_r y_{k-r} + \epsilon_k$$

donde y_i representa el valor de la variable aleatoria en el instante i , a_i son los parametros del modelo y ϵ_k es un ruido inco-relado de media nula y varianza σ^2 . Este modelo se denomina autoregresivo o AR.

Un segundo modelo se expresa en la forma

$$y_k = b_0 \epsilon_k + b_1 \epsilon_{k-1} + \dots + b_m \epsilon_{k-m}$$

expresion en la que los b_i representan los parametros del modelo

y ϵ_i es un ruido de las mismas características que el anterior, es decir incorrelado de media nula y de varianza σ^2 . Este modelo se denomina de media móvil o MA (del inglés "moving average"). La diferencia cualitativa fundamental entre ambos modelos es que en el MA el valor en el instante k depende solo del pasado reciente hasta el orden m , mientras que en el modelo AR depende de toda la historia pasada del proceso.

Una combinación de ambos nos lleva al modelo ARMA cuya formulación es

$$y_k = \sum_{i=1}^r a_i y_{k-i} + \sum_{i=0}^m b_i \epsilon_{k-i}$$

Por último Box y Jenkins introdujeron el modelo ARMA integrado o modelo ARIMA en el que el proceso original no es estacionario pero si lo es su diferencia de orden d . Este modelo ARIMA está ampliamente extendido y puede ser aplicado a gran variedad de casos.

Si tenemos una serie temporal y queremos ajustarle un modelo ARIMA, nos encontramos con el problema de la estimación de los parámetros, que son a_i , b_i , σ^2 , r , m y d . El problema se aborda en dos pasadas. En primer lugar supondremos conocidos los valores de r , m y d , es decir el orden del modelo. Podemos ahora obtener las estimaciones de a_i , b_i y σ^2 mediante el método de mínimos cuadrados o el de máxima verosimilitud.

Akaike ha desarrollado varios criterios para, una vez que somos capaces de estimar a_i , b_i y σ^2 para un orden del modelo da-

do, determinar dicho orden basandose, por decirlo sencillamente, en elegir aquel que minimiza el valor de $\hat{\sigma}^2$. En realidad, estos criterios son mas elaborados, siendo el mas universalmente aceptado el AIC que se formula como

$$\text{AIC} = (N - r) \log \hat{\sigma}^2 + 2 (r + m + 1)$$

siendo N el numero de valores de la serie de diferencias de orden d, r el orden del modelo autoregresivo y m el orden del modelo de media movil. Segun este criterio, se estiman r, m y d como los valores que minimizan la funcion AIC asi definida.

Si tenemos el modelo de comportamiento de la serie temporal, podemos plantearnos la prediccion del siguiente o siguientes valores de la serie. Esta prediccion sera, en terminos generales, el valor mas probable teniendo en cuenta los valores anteriores. Existen varias aproximaciones al problema de la prediccion y entre ellas contamos las de Kolmogorov, Wiener, Wold y Box-Jenkins. Particularmente interesante se presenta la ultima de ellas que, considerando modelos ARIMA nos da predicciones recursivamente, de forma que ante la llegada de un nuevo valor no es necesario recalcular toda la prediccion sino que se basa en las predicciones en el paso anterior. Para sistemas en tiempo real que van adquiriendo los valores de la serie temporal de una forma secuencial este algoritmo resulta de un valor indudable.

Si llamamos $\hat{Y}_i(j)$ a la prediccion hecha en el instante i del valor de Y despues de j intervalos de tiempo, podemos escribir para la prediccion del valor siguiente

$$\begin{aligned}
& \hat{Y}_k(1) + b_1 \hat{Y}_{k-1}(1) + \dots + b_m \hat{Y}_{k-m}(1) = \\
& = (b_1 - a_1) Y_k + \dots + (b_m - a_m) Y_{k-m+1} - \\
& - a_{m+1} Y_{k-m+2} - \dots - a_r Y_{k-r+1}
\end{aligned}$$

asumiendo que $r > m$.

Las principales restricciones que se plantean en la formulacion anterior son las características de estacionarias y lineales que se presumen a las series bajo estudio. Dado que el estudio de series no estacionarias y/o no lineales no esta suficientemente desarrollado, asumimos ambas condiciones, bien directamente, bien mediante transformaciones y linealizaciones de la serie original.

4.3.- Estudio mediante transformadas en z.

En el control digital (o discreto en general) de sistemas dinámicos se introduce la formulación mediante transformadas en z, que son el equivalente a la transformada de Laplace de sistemas continuos. Supongamos que tenemos un clásico sistema de control con una entrada $u(t)$ y una salida $x(t)$. Si el sistema es lineal e invariante en el tiempo podemos formular su funcionamiento en base a sus transformadas en z, mediante la expresión

$$x(k) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k)$$

siendo $D(z^{-1})$ y $A(z^{-1})$ dos polinomios en z^{-1} con coeficientes independientes del tiempo. Esta formulación se puede demostrar que es equivalente a

$$a_0 x_k + a_1 x_{k-1} + \dots + a_r x_{k-r} = d_0 u_k + d_1 u_{k-1} + \dots + d_p u_{k-p}$$

Supongamos igualmente que la observación de $x(t)$ no es directa sino a través de $y(t)$, valor que viene afectado de un error $e(t)$. En general (figura 4.1) podemos expresar sus transformadas mediante

$$y(k) = x(k) + \frac{B(z^{-1})}{C(z^{-1})} e(k)$$

Si asumimos que $C(z^{-1}) = A(z^{-1})$ y sustituyendo tenemos

$$y(k) = \frac{D(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(k)$$

o lo que es lo mismo

$$A(z^{-1}) y(k) = D(z^{-1}) u(k) + B(z^{-1}) e(k)$$

Se puede demostrar igualmente que esta formulacion es equivalente a

$$\begin{aligned} a_0 y_k + \dots + a_r y_{k-r} &= d_0 u_k + \dots + d_p u_{k-p} + \\ &+ b_0 e_k + \dots + b_m e_{k-m} \end{aligned}$$

Si consideramos que el sistema es automantenido, es decir, que no tiene ninguna entrada, tenemos que $u(t) = 0$ y por tanto

$$a_0 y_k + \dots + a_k y_{k-r} = b_0 e_k + \dots + b_m e_{k-m}$$

lo cual es una formulacion equivalente a la de los modelos ARMA de las series temporales.

El tema de la estimacion del modelo (o identificacion en la terminologia de control) es abordado ampliamente por distintos metodos y probablemente con mayor generalidad que el encontrado en el analisis de series temporales. Sin embargo las ideas basicas son coincidentes y se usan fundamentalmente el metodo de los minimos cuadrados, el de maxima verosimilitud, o bien alguna variante de ellos.

Franklin y Powell presentan una estimacion recursiva del modelo por el metodo de minimos cuadrados. Esta caracteristica de recursividad le confiere un enorme atractivo para sistemas en tiempo real como ya discutimos anteriormente. En el caso de que el sistema no sea invariante, sino que evolucionen sus parametros en el tiempo, se puede introducir un factor de olvido que da mas peso a los valores mas recientes que a los mas antiguos.

El uso del factor de olvido puede dar lugar en ciertas circunstancias a algunos problemas numericos por lo que se introducen diversas tecnicas que basicamente hacen variar el factor de olvido en funcion de la dinamica del propio sistema, consiguiendo resultados muy interesantes aplicados al campo del control adaptativo.

Una vez conocido el modelo y considerando que

$$e_i = \hat{y}_i - y_i$$

podemos plantearnos el problema de la prediccion de un forma casi trivial en la expresion

$$a_0 \hat{y}_k + a_1 y_{k-1} + \dots + a_r y_{k-r} = b_0 e_k + \dots + b_m e_{k-m}$$

que coincide con la prediccion de Box-Jenkins para modelos ARIMA en series temporales.

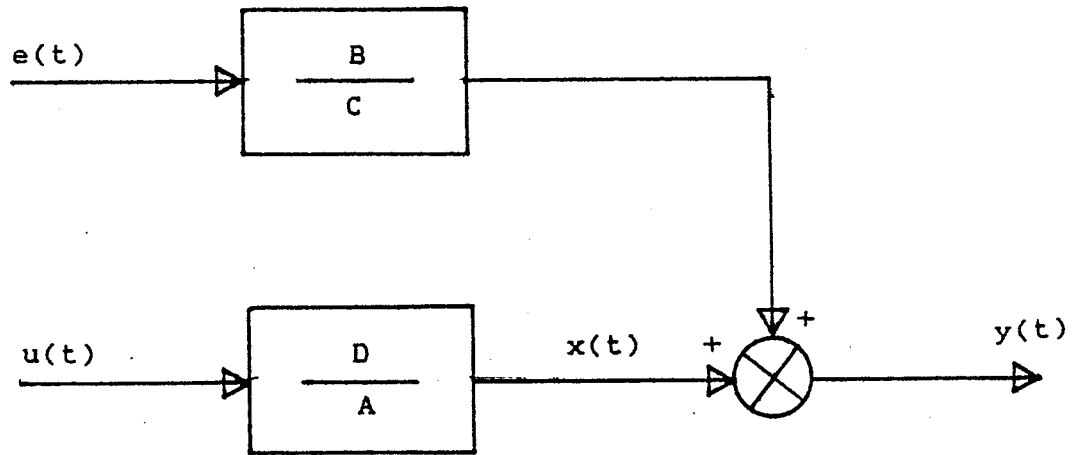


Fig. 4.1.- Representacion del modelo del sistema.

4.4.- Tratamiento de la media de la serie.

Como hemos visto, el estudio de series temporales y el de transformadas en z presentan formulaciones duales del mismo problema, pudiendo elegirse uno u otro planteamiento sin restricciones desde el punto de vista teorico. En adelante tomaremos de cada uno de ellos aquellos enfoques que se consideren mas adecuados a cada situacion.

Una de las hipotesis de trabajo mas usuales en las formulaciones anteriores es que la serie temporal sea estacionaria. Tengamos una serie temporal $y(t)$ que se ajusta a un modelo ARMA segun la siguiente expresion

$$y_k = \sum_{i=1}^r a_i y_{k-i} + \sum_{i=0}^m b_i \epsilon_{k-i}$$

Tomando esperanza matematica en ambos miembros tenemos

$$E[y_k] = \sum_{i=1}^r a_i E[y_{k-i}] + \sum_{i=0}^m b_i \mu$$

siendo

$$E[\epsilon_i] = \mu \quad \forall i$$

Si procedemos recursivamente llegaremos a una expresion de la forma

$$E[y_k] = f(a_i, b_i, \mu, k)$$

En concreto para modelos AR(1) se formula como

$$E[y_k] = \mu \frac{1 - a^k}{1 - a} \quad \text{para } a < 1$$

Vemos que el sistema es claramente no estacionario, pues la media de la serie varia con k . Sin embargo si $\mu = 0$ tenemos que

$$E[y_k] = 0 \quad \forall k$$

y la serie es estacionaria hasta el orden 1. Ello nos lleva a preferir modelar series de media nula que pueden obtenerse facilmente como

$$z(t) = y(t) - \bar{y}$$

siendo \bar{y} una estimacion no sesgada de la media de $y(t)$. En efecto vemos que

$$\begin{aligned} E[z(t)] &= E[y(t)] - E[\bar{y}] = \\ &= \mu_y - \mu_y = 0 \end{aligned}$$

Una vez hecha la transformacion de variables podemos ajustar un modelo ARMA a la serie asi obtenida de forma que

$$z_k = \sum_{i=1}^r a_i z_{k-i} + \sum_{i=0}^m b_i \epsilon_{k-i}$$

en el que los coeficientes a_i y b_i no tienen que coincidir en general con los de la serie original. Viendo que

$$y_k = z_k + \bar{y}_k$$

donde \bar{y}_k es la estimacion de la media de $y(t)$ hasta el instante

k. Podemos sustituir y obtener

$$y_k = \bar{y}_k + \sum_{i=1}^r a_i z_{k-i} + \sum_{i=0}^m b_i \epsilon_{k-i}$$

o bien

$$y_k = \bar{y}_k + \sum_{i=1}^r a_i (y_{k-i} - \bar{y}_k) + \sum_{i=0}^m b_i \epsilon_{k-i}$$

En esta formulacion el termino \bar{y}_k corresponde, como dijimos, a una estimacion insesgada de la media de la serie $y(t)$ hasta el instante k . El estimador

$$\bar{y}_k = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k}$$

es el clasico estimador de la media que tiene la propiedad de ser insesgado. Si la serie evoluciona en el tiempo puede ser interesante darle mas peso a los valores mas recientes frente a los mas antiguos. Para ello se construye el siguiente estimador

$$\bar{y}_k = \frac{\sum_{i=1}^k \gamma^{k-i} y_i}{\sum_{i=1}^k \gamma^{k-i}} \quad 0 < \gamma < 1$$

en el que γ representa un factor de olvido de los valores mas antiguos. Demostraremos que este estimador es tambien insesgado. En efecto

$$E[\bar{y}_k] = \frac{E[\sum_{i=1}^k \delta^{k-i} y_i]}{E[\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}]}$$

$$E[\bar{y}_k] = \frac{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i} E[y_i]}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}$$

$$E[\bar{y}_k] = \frac{\mu_y \sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}} = \mu_y$$

En sistemas en tiempo real resultaria sumamente interesante el poder disponer de un metodo recursivo de estimacion de esta media. Para ello escribimos

$$\bar{y}_k = \frac{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i} y_i}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}$$

$$\bar{y}_k = \frac{y_k + \sum_{i=1}^{k-1} \delta^{k-i} y_i}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}$$

$$\bar{y}_k = \frac{y_k + \delta \sum_{i=1}^{k-1} \delta^{k-1-i} y_i}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}$$

Por otra parte

$$\bar{y}_{k-1} = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \delta^{k-1-i} y_i}{\sum_{i=1}^{k-1} \delta^{k-1-i}}$$

por lo que sustituyendo tenemos

$$\bar{y}_k = \frac{y_k + \delta \bar{y}_{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} \delta^{k-1-i}}{\sum_{i=1}^k \delta^{k-i}}$$

LLamando

$$\delta_k = \sum_{i=1}^k \delta^{k-i}$$

podemos escribir

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\delta_k} y_k + \frac{\delta_{k-1}}{\delta_k} \delta \bar{y}_{k-1}$$

A medida que el sistema evoluciona y k crece, tenemos que asintoticamente

$$\delta_k = \frac{1}{1 - \delta} \qquad \frac{\delta_{k-1}}{\delta_k} = 1$$

y por tanto

$$\bar{y}_k = \alpha \bar{y}_{k-1} + (1 - \alpha) y_k$$

Esta ultima expresion nos permite estimar la media recursivamente, y con caracter insesgado, ponderando las medidas mas recientes.

4.5.-Análisis de medidas en sistemas complejos.

En un sistema complejo, una medida llega al centro repetitivamente, constituyéndose en una serie temporal o en el registro de evolución de un sistema discreto, según se prefiera. Basados en los planteamientos ofrecidos en los apartados anteriores, trataremos de analizar la serie de valores de una medida de forma que consigamos obtener mejoras en las comunicaciones entre los procesadores del sistema.

Tengamos dos procesadores de control del sistema y una medida concreta, la cual es enviada ciclicamente desde uno de ellos (emisor) al otro (receptor). En un instante determinado ambos procesadores poseen k valores de la medida y se trata de predecir en ambos el valor $k+1$ de dicha medida, indicando el procesador emisor al receptor la diferencia entre el valor real y el predicho, entendiendo que la transmisión de dicha diferencia implica normalmente una menor ocupación del canal. Es de notar, que ambos procesadores harán la misma predicción si usan el mismo algoritmo y poseen la misma información sobre los valores anteriores de la medida.

El proceso a seguir consta de los siguientes pasos:

- Modelar el sistema (o la serie).
- Estimar los parámetros del modelo.
- Calcular la predicción del próximo valor de la medida.

Para modelar el sistema (o la serie) se usara cualquiera de las tecnicas de modelado conocidas, basandonos en el conocimiento sobre la estructura fisica del sistema y un conjunto de datos historicos. En particular podemos ensayar modelos ARIMA estimando por el metodo de maxima verosimilitud los parametros de la serie para distintos ordenes del modelo. A continuacion, mediante la aplicacion del criterio AIC de Akaike, determinamos el orden del modelo que mejor ajusta los datos historicos que poseemos. Con ello tenemos el modelo de la serie. Todo este proceso se realiza off-line y una sola vez al diseñar el sistema de control especifico.

El paso siguiente consiste en construir un algoritmo, preferiblemente recursivo, que estime on-line los parametros del modelo partiendo de los valores iniciales obtenidos en la identificacion de la estructura del modelo. En particular, para modelos ARIMA podemos estimar la media segun se describe en el epigrafe anterior y el resto de los parametros mediante identificacion recursiva por minimos cuadrados con factor de olvido variable, en concordancia con las tecnicas usadas en control adaptativo.

Por fin, en el ultimo paso, calculamos la prediccion del valor siguiente de la medida, usando los parametros estimados del modelo y los valores anteriores de la misma. En el caso particular de modelos ARIMA podemos usar la prediccion recursiva formulada por Box-Jenkins y presentada anteriormente. La diferencia entre el valor real y esta prediccion es enviada del emisor al receptor de acuerdo con el protocolo que se establezca entre ambos. Una propuesta de dicho protocolo se presenta a continuacion.

4.6.-Protocolo para transmision de medidas.

De acuerdo con la terminologia ISO, nos referiremos aqui al protocolo de presentacion entre dos procesadores, uno de los cuales (emisor) envia medidas al otro (receptor). Suponemos resueltos los niveles inferiores de la comunicacion, esto es:

- Nivel fisico.
- Nivel de enlace de datos.
- Nivel de red.
- Nivel de transporte.
- Nivel de sesion.

Por tanto se supone que tenemos un enlace activo entre los dos procesadores, libre de errores y capaz de transmitir mensajes sin alterar el orden y sin perder ninguno. Es a traves de este canal virtual por el que comunican los dos procesadores y del que trataremos de optimizar su ocupacion. Esta mejora repercutira evidentemente en la ocupacion del canal real, en mayor o menor medida, segun los protocolos usados en los niveles inferiores, pero cuyo estudio no es objeto de esta Tesis.

La estructura mas usual de los sistemas que deseamos controlar presenta una serie de medidas que son adquiridas mediante captadores que la traducen a una señal electrica. Esta señal es pasada a traves de convertidores analogico/digitales para obtener un valor discreto normalmente en 12 bits, con o sin signo. El convertidor es controlado por el procesador de nivel mas bajo de la red, que toma el valor discretizado de la medida y lo almacena

en su memoria para procesamiento local y/o transmision a otros procesadores de la red.

Todos los protocolos que hemos tenido ocasion de estudiar presentan una transmision periodica de las medidas, frecuentemente en valor primario (valor a la salida del convertidor A/D), y ocupando cada una de ellas 8, 12 o mas usualmente 16 bits. Suelen agruparse varias medidas en cada mensaje para mejor aprovechamiento del canal.

En algunos sistemas tienen lugar comunicaciones en valores de ingenieria (despues de aplicarle factores de conversion) con formato de punto flotante, usualmente en 32 bits. Este tipo de transmision suele presentarse entre los procesadores de nivel mas alto dentro de la red. En cualquier caso, se produce siempre una transmision del valor completo de la medida, en cualquiera que sea su formato.

El protocolo de presentacion para transmision de medidas que se propone, tiene en cuenta el valor de la medida que se debe transmitir y la prediccion de dicha medida de acuerdo con el algoritmo enunciado anteriormente. Esta diferencia entre valor real y valor predicho es la que se transmite por la linea, siendo reconstruida en el otro extremo con la prediccion calculada por el receptor (que coincide con la del emisor). El numero de bits necesarios para transmitir la diferencia es variable, en un rango que puede variar entre 0 bits (igualdad entre valor real y predicho) y el numero de bits necesarios para transmitir la medida completa.

El numero de bits que ocupa cada diferencia concreta es se-ñalado por unos bits de control en una zona especial del mensaje. A su vez el numero de bits de control de cada medida nos indica el numero de tamaños distintos con que podemos transmitir una diferencia. La eleccion de cada uno de estos tamaños se hara en cada sistema de acuerdo con criterios de ocupacion minima del canal. Asi por ejemplo, si usamos un bit de control podemos transmitir una diferencia en dos formatos. Si el numero de bits de control es 2, podemos transmitir las diferencias en 4 formatos. Y asi sucesivamente.

Los estudios sobre el tamaño optimo de la zona de control y el tamaño de cada uno de los formatos se realizan sobre datos obtenidos off-line y una vez fijados permanecen inalterables a menos que se revise el protocolo de presentacion. Es decir, estos parametros no se modifican on-line. Si el mensaje de medidas contiene m medidas, el tamaño de la zona de control es de z bits por medida y la longitud del formato de la medida i es f_i , el mensaje comenzara por $m \cdot z$ bits de control en el orden prefijado para las medidas, que indican cada uno de ellos el tamaño del formato en el que a continuacion aparecera la diferencia relativa a esa medida. Seguidamente apareceran f_1 bits para expresar la diferencia de la primera medida, despues f_2 bits para la segunda y asi sucesivamente hasta f_m bits para la ultima medida del mensaje (figura 4.2).

Como salvedad se calculara la longitud del mensaje asi obtenido y si fuera superior al equivalente de la transmision clasica con el valor completo de la medida, se enviara este ultimo. Ello

nos permite garantizar que el nuevo protocolo de presentacion siempre mejora o iguala al clasico, y en condiciones adversas del sistema se evita la degradacion de las comunicaciones con respecto a dicho sistema clasico. La eficacia relativa de este protocolo de presentacion dependera del sistema concreto y, en particular, de la distribucion de las diferencias entre prediccion y valor real, con valores tipicos de ocupacion del canal del 30% de la ocupacion que se tendria con protocolos clasicos.

El lado negativo de este metodo lo constituyen la mayor necesidad de CPU y memoria que es necesario usar para ejecutar el algoritmo de prediccion y el ensamblaje y desensamblaje de los mensajes de medidas. Sin embargo, y como ya hemos comentado, en las modernas arquitecturas encontramos procesadores dedicados a gestionar las comunicaciones que pueden realizar esta tarea sin excesivo problema y descargando a la CPU principal de esta funcion. En general se trata de una cuestion economica en la cual el recurso "linea" es mas costoso que el recurso "CPU" o el recurso "memoria" por lo que se prefiere sacrificar estos ultimos en beneficio del primero. Se puede considerar un 10% el valor tipico en el que se incrementa el consumo de CPU por efecto del uso de este protocolo.

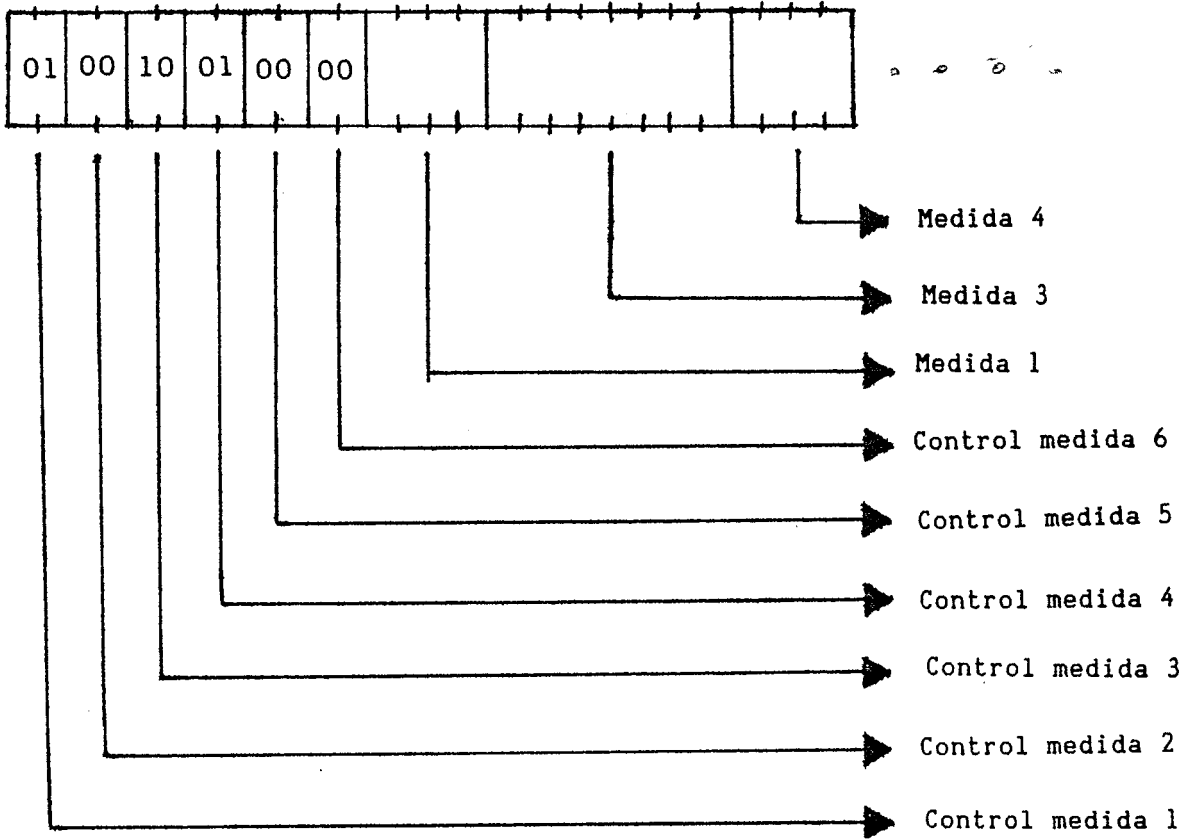


Fig. 4.2.- Estructura del mensaje de medidas.

4.7.- Transmision de medidas en despachos electricos.

Como ya hemos enunciado con anterioridad, los despachos de energia electrica constituyen un claro ejemplo de sistema complejo del tipo estudiado en esta Tesis. Las medidas que se hallan en este tipo de sistemas son principalmente tensiones, intensidades, potencias activas y potencias reactivas, tomadas en lineas, barras, trafos, etc. La dinamica de estas medidas esta dominada por una evolucion lenta (siguiendo la curva de carga del dia) con pequeñas variaciones aleatorias y saltos bruscos en determinados momentos. Aparece pues a priori como dificilmente modelable.

Para contrastar las ideas expuestas en este capitulo con un sistema real, hemos contado con la valiosa colaboracion de la Compañia Sevillana de Electricidad que nos permitio realizar una toma de datos reales en su Centro Provincial de Maniobras de Sevilla. Dicho Centro se encarga del control de la red de reparto y distribucion de la mencionada provincia, con tensiones tipicas de 66, 50, 20 y 10 KV. Fue puesto en servicio en el año 84 y cuenta con capacidad para 50 subestaciones con un total de 10.000 estados y 1.600 medidas. En el momento de la toma de datos (29 de Agosto de 1.985) estaban en servicio 18 subestaciones a traves de 5 lineas de comunicaciones con un volumen total de 544 medidas de todo tipo y nivel de tension. Durante la toma de datos se recibieron 2.962 mensajes de medidas con un total de 47.426 valores. Se dispone de un promedio de 87 valores de cada medida siendo esta cantidad de 50 en el caso mas desfavorable. Dado el importante volumen que ello supone, alli donde razones de presentacion lo aconsejen, nos referiremos a 4 medidas elegidas aleatoriamente

dentro de cada tipo y cuya evolucion se refleja en las figuras 4.3 a 4.6. Por las mencionadas razones de presentacion y dado el elevado numero de tablas y figuras obtenidas, recogemos en este capitulo aquellas consideradas mas significativas, reservando al apendice B la presentacion completa de la informacion. Las medidas seleccionadas son pues:

- 1.- Medida de tension del trafo 2 (132/20 KV) de la subestacion "Calonge".
- 2.- Medida de intensidad de la linea de 20 KV "Roca 2-Mass" de la subestacion "Polo".
- 3.- Medida de potencia activa del trafo 1 (132/66 KV) de la subestacion "Palacios".
- 4.- Medida de potencia reactiva del trafo 2 (50/16 KV) de la subestacion "Sanlucar".

Tal como describimos anteriormente, nuestro primer objetivo sera intentar modelar off-line el sistema con los datos de los que se disponen. Para ello ajustaremos a cada medida un modelo ARIMA. La primera condicion que debe cumplir la serie es no presentar comportamiento estacional, es decir, que no tenga componentes ciclicos. Esto se comprueba mediante un test de no estacionalidad como por ejemplo el de Noether, que nos da el nivel de confianza de que la serie no sea estacional. Este test ha sido aplicado a los valores de la serie original y a los de las series en diferencias de hasta orden 4, obteniendose que las medidas no presentan comportamiento estacional (en el periodo observado) con niveles de confianza muy altos. La tabla 4.1 recoge los resultados de este test para las medidas tipo.

Una vez que asumimos la no estacionalidad de las series, les aplicaremos el criterio AIC para determinar el orden del modelo ARIMA, cuyos parametros estimaremos mediante el metodo de maxima verosimilitud no recursivo. Con ello vemos que, para el mismo numero de parametros, los modelos AR puros se comportan mejor (menor valor del AIC) que los MA o los mixtos, y mejor los modelos sin diferenciar que los diferenciados. Las tablas 4.2 a 4.9 contienen estos resultados para las medidas tipo.

Nos centraremos pues en modelos AR de distintos ordenes, ensayando hasta el de orden 20 (recuerdese que de algunas medidas se disponen solo de 50 valores). En la mayoria de las medidas no se presenta un minimo del AIC para los ordenes estudiados, y'en el resto de ellas lo presenta para ordenes muy altos (de 15 a 20), lo que desde un punto de vista practico resulta poco interesante. Entre los ordenes bajos del modelo no existen grandes diferencias en el valor del AIC, por lo que preferimos no basarnos en ello para elegir el orden del modelo. Los resultados para las medidas tipo se presentan en la tabla 4.10.

Para solucionar este problema decidimos simular que nos encontramos en circunstancias reales y que nos estan llegando una serie de valores por comunicaciones (o tenemos que transmitir dichos valores). Para ello usaremos como criterio para seleccionar el modelo, las diferencias (en valor absoluto) entre el valor real y el predicho, haciendo estimacion recursiva de los parametros del modelo por el metodo de minimos cuadrados con factor de olvido variable y prediccion recursiva de Box-Jenkins. Al iniciar el algoritmo no consideramos el primer valor de cada medida por

no tener prediccion fiable de la misma. Por razones que quedaran de manifiesto mas adelante, tomaremos tambien en consideracion el modelo AR de orden 1 y con parametro fijo e igual a la unidad, unido a una prediccion recursiva de Box-Jenkins. En la tabla 4.11 se recogen los valores medios de estas diferencias para las medidas tipo. De mayor riqueza informativa es la distribucion porcentual de la diferencias en tramos elegidos convenientemente para que representen el numero de bits necesarios para su transmision. Estos resultados, promediados para el conjunto de las medidas del sistema se presentan en la tabla 4.12.

Si usamos el protocolo para transmision de medidas propuesto en el apartado 4.6, y teniendo en cuenta los datos hasta ahora analizados, vemos que el tamaño de la zona de control puede ser de 1, 2 o 3 bits, definiendo respectivamente 2, 4 u 8 formatos diferentes de transmision de una diferencia. Existen multiples posible combinaciones, pero aquella que da una solucion optima es la que obtiene la minima longitud media para transmision de una diferencia, incluyendo la zona de control. Esta solucion se puede obtener por simulacion a partir de la distribucion de las diferencias. Los resultados obtenidos para distintos modelos se reflejan en la tabla 4.13.

A la vista de lo anterior, observamos que el mejor de los modelos estudiados es el autoregresivo de orden 1 con parametro fijo e igual a la unidad, superando a los modelos de igual o superior orden con parametros estimados. Esto que, a primera vista, puede parecer sorprendente, lo unico que nos dice es que los metodos de estimacion no son los idoneos para nuestros propositos,

pues si bien las diferencias medias entre valor real y predicho no son significativamente dispares entre los modelos, si lo son las longitudes medias para transmision de las mismas, lo cual nos indica que las diferencias grandes y poco numerosas "atraen" la estimacion. Por otra parte la eleccion del modelo que ha resultado optimo no es casual, ya que el modelo general

$$y_k = \bar{y} + a (y_{k-1} - \bar{y}) + \xi_k$$

se convierte en el caso de $a = 1$ en

$$y_k = y_{k-1} + \xi_k$$

y la prediccion recursiva de Box-Jenkins toma la forma

$$\hat{y}_{k+1} = y_k$$

Dicho con palabras, la prediccion sera igual al ultimo valor de la medida, siendo la diferencia que debe transmitirse por la linea, aquella existente entre el valor actual y el valor anterior. Esta formulacion tan simple tiene enorme importancia en cuanto al esfuerzo de calculo necesario para la prediccion del siguiente valor, lo cual se refleja para distintos modelos en la tabla 4.14 por medio del tiempo de CPU necesario para dicha prediccion. Estos valores deben tomarse a titulo indicativo, pues los algoritmos respectivos no han sido preparados para un entorno en tiempo real sino para analisis off-line de los resultados.

Al ruido ξ_k se le han efectuado distintos analisis estadisticos mostrando un comportamiento segun una normal de media nula. Ello ha sido comprobado mediante el test de ajuste de Kolmogorov

con obtencion de niveles de confianza aceptables, segun se muestra en la tabla 4.15 para las medidas tipo. En las figuras 4.7 a 4.10 se comparan la funcion de distribucion teorica con la obtenida de la muestra para dichas medidas tipo.

Hemos visto pues que la solucion mas aconsejable es el uso de modelos AR de orden 1 con parametro unidad asociado con un protocolo de transmision de medidas segun se propone en el apartado 4.6, con 2 bits de control por medida que posibilitan 4 formatos de transmision de 0, 4, 8 y 16 bits de longitud respectivamente. Teniendo en cuenta los valores obtenidos de la medidas del sistema tenemos una longitud media de 5.16 bits por medida, frente a los 16 clasicos, lo que supone una ocupacion relativa del canal del 32.25% con respecto a la existente. Esta ocupacion se calcula a partir de la distribucion de las diferencias. Si calculamos exactamente la ocupacion del protocolo propuesto frente al clasico, en el caso de que se hubiesen transmitido los mismos datos recogidos en la muestra, obtenemos un valor de la ocupacion relativa del canal del 33.55% con respecto al existente, lo cual concuerda sensiblemente con el valor deducido probabilisticamente.

En este despacho electrico de Sevilla las medidas son captadas por convertidores de 12 bits. Sin embargo la precision real requerida, y con frecuencia la suministrada por los aparatos de medidas, no es tan alta. Si se acepta renunciar a toda la precision, se puede ir aun mas lejos en la optimizacion del canal. Para ello fijaremos un "umbral" que en caso de ser superado por la diferencia entre valor real y predicho, tiene lugar la trans-

mision de dicha diferencia, y en caso contrario se considera que la diferencia es nula. El umbral 0 implica conservar toda la precision, coincidiendo con el algoritmo presentado hasta ahora. A medida que aumentamos el umbral, disminuye la ocupacion del canal pero ello es a costa de perdida de precision. En la tabla 4.16, se presentan los valores de la ocupacion relativa del canal, obtenidos para distintos umbrales.

Ya señalamos que el lado negativo de este protocolo de presentacion lo constituye la carga de CPU que puede suponer su manejo, siendo en nuestra opinion asumible dicha desventaja si atendemos a las actuales tendencias en arquitecturas multiprocesadores de bajo costo y a la relacion precio de CPU frente a precio del canal. En el sistema estudiado la gestion del protocolo es realizado por un PDP-11/34, consumiendo un 1% de CPU cada canal de comunicaciones con una velocidad equivalente de 10 medidas por segundo en cada canal. Teniendo en cuenta que la capacidad aproximada de esa CPU es de 300 Kiloinstrucciones por segundo vemos que la gestion del protocolo existente necesita 300 instrucciones por medida. La gestion del protocolo de presentacion propuesto puede realizarse con una rutina de aproximadamente 30 instrucciones por medida. Es decir el protocolo propuesto hace aumentar un 10% el consumo de CPU para gestion de las comunicaciones, cifrandose en el 1.1% por canal para la velocidad anteriormente citada.

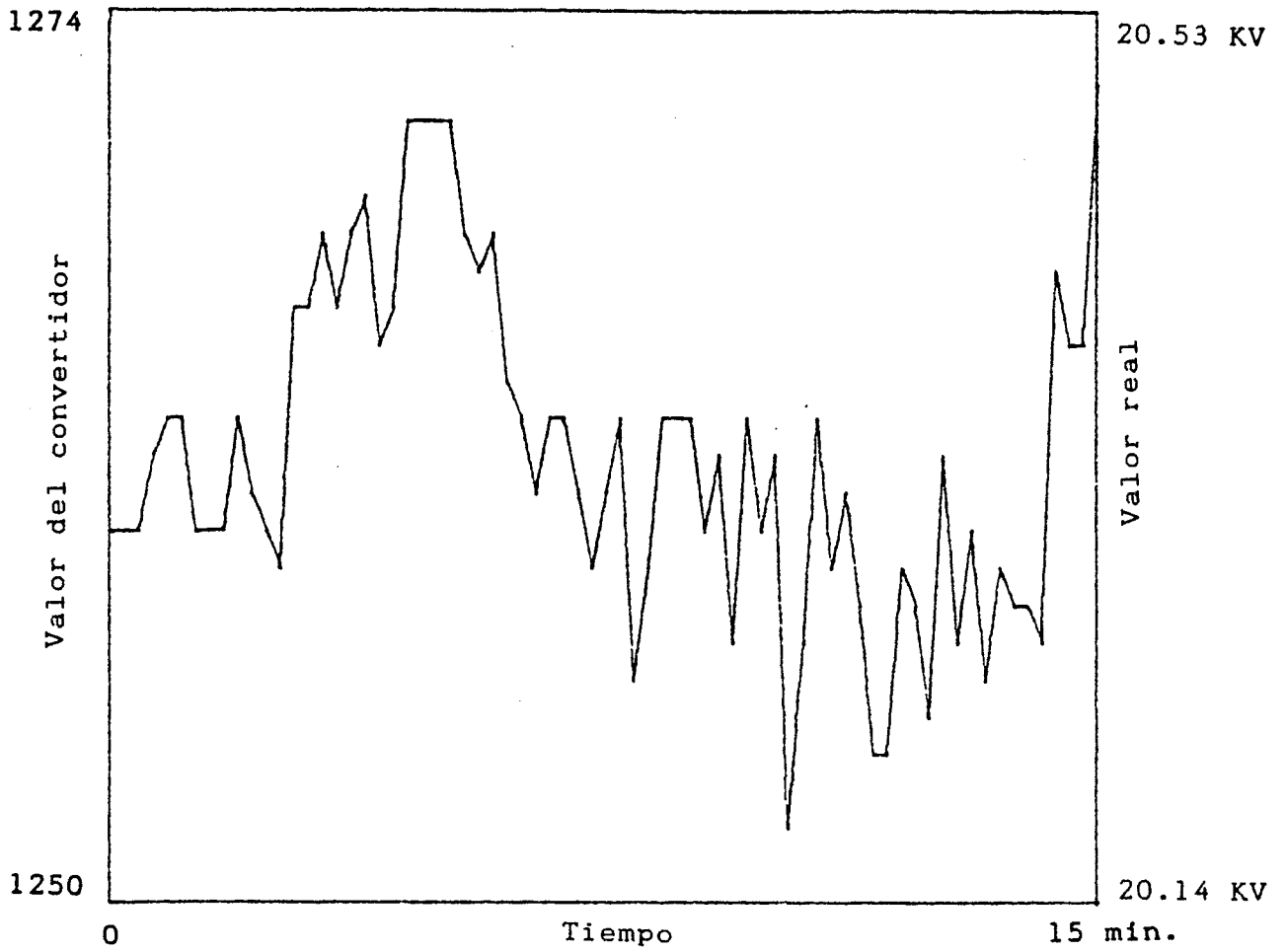


Fig. 4.3.- Evolucion de la medida 1 (tension).

Modelo	Longitud	No. bits control	Formato	No. bits datos
AR=1*	5.1636	2	1	0
			2	4
			3	8
			4	16
AR=1	5.3592	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=2	5.3078	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=3	5.2886	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=4	5.2788	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=5	5.2725	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16

* Con parametro unidad.

Tabla 4.13.- Soluciones optimas del protocolo de presentacion de medidas.

NOTA: El minimo valor de la longitud se consigue para AR=1 .

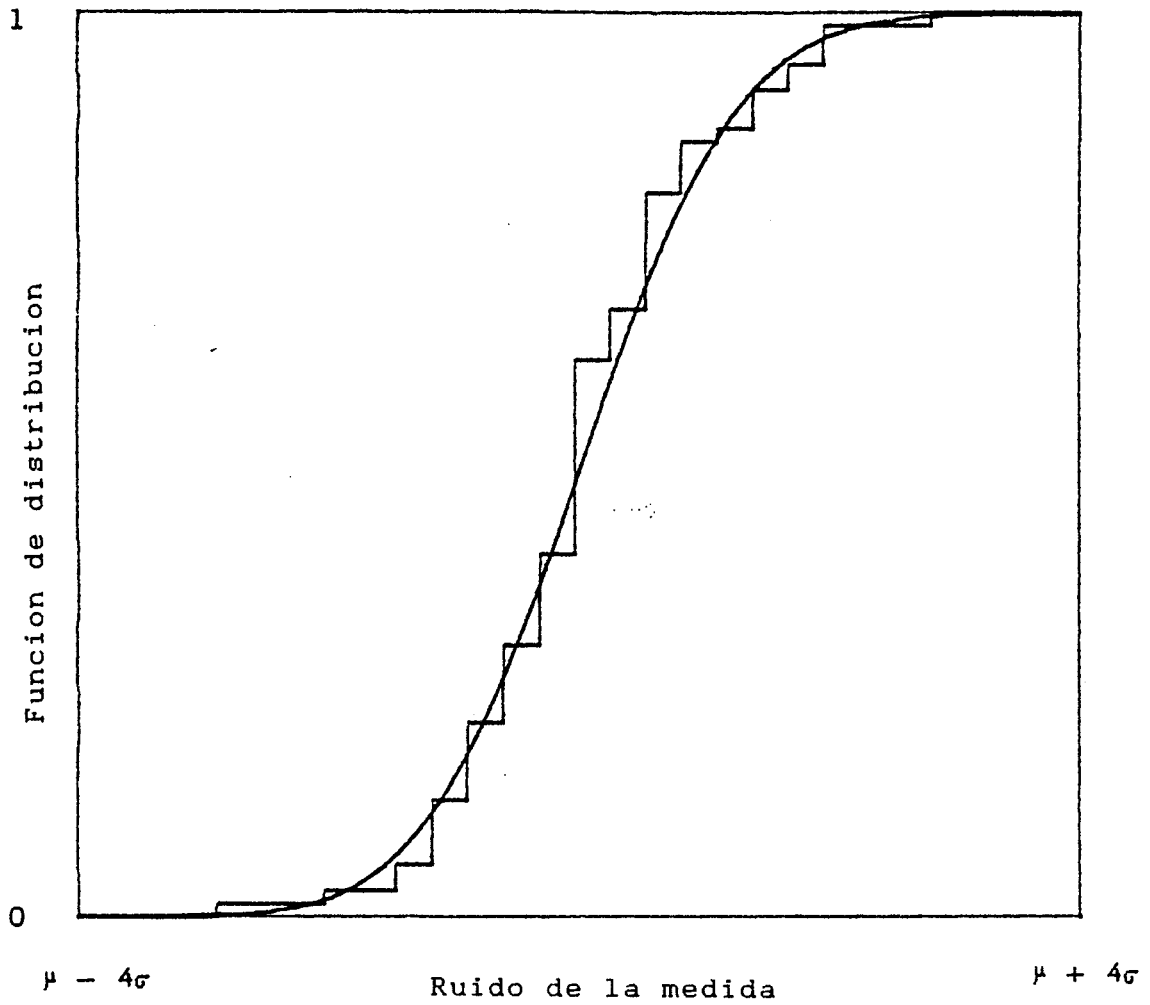


Fig. 4.7.- Funciones de distribucion teorica y experimental para el ruido de la medida 1 (tension).

Umbral	Ocupacion
0	33.55%
1	29.09%
2	26.95%
3	25.54%
4	24.39%
5	23.55%
6	22.88%
7	22.09%
8	21.22%

Tabla 4.16.- Ocupacion del canal para distintos umbrales de transmision.

4.8.- Conclusiones.

Se presenta en este capitulo un enfoque para la transmision de medidas en sistemas complejos, basado en la diferencia entre valor real y valor previsto, siendo este ultimo valor calculado mediante tecnicas conjuntas de analisis de series temporales y control de sistemas discretos.

Se propone un protocolo de presentacion para transmision de medidas en sistemas complejos que trata de optimizar la ocupacion del canal. Dicho protocolo consiste en la transmision de cada medida como la diferencia entre valor real y predicho, en formatos de longitud variable. La longitud del formato de cada medida es indicada por unos bits de control.

Por ultimo se aplican estos principios a los datos reales tomados de un despacho electrico, mostrando que la eleccion optima de parametros del protocolo de presentacion propuesto, proporciona valores de la ocupacion del canal del 33.55% con respecto al existente, lo cual supone a nuestro juicio, una sensible mejora. El canal que de esta manera resulta liberado puede ser usado en aumentar el numero de medidas por unidad de tiempo que el sistema es capaz de transmitir, en disminuir el retardo de incidencias de estados, en disminuir la edad de los datos tal como se presentaba en el capitulo anterior, en aumentar la seguridad de las ordenes añadiendo mayor redundancia a la transmision, o bien, en dejarlo libre para otras posibles funciones.

Si todo el canal liberado se dedica a disminuir la edad de los datos sin modificar ni el numero de medidas tratadas ni el retardo de incidencias, debemos mantener la longitud de los mensajes de medidas, con lo cual disminuimos las edades (mas estrictamente el envejecimiento añadido) a la tercera parte de su valor. Si por el contrario todo el esfuerzo se dedicase a disminuir el retardo de incidencias sin modificar los demas parametros, se puede conseguir, disminuyendo la longitud de cada mensaje de medidas, bajar a la mitad dicho retardo. Este dato se da presuponiendo una eficiencia inicial del canal del 80% que despues de la disminucion de la longitud del mensaje seria del 57%. Son posibles tambien alternativas mixtas que mejoren simultaneamente distintos criterios.

CAPITULO 5

5.- TRANSMISION DE ORDENES.

5.1.- Introduccion.

En gran numero de los sistemas de control, una de la funciones mas importantes es el envio de ordenes o consignas desde un procesador a otro, normalmente de un nivel jerarquico superior a otro inferior. Esta es en muchos casos la funcion mas importante del sistema y aunque puede no ejercitarse continuamente, todo debe estar dispuesto para que en el momento necesario, bien el operador, bien los programas de control automatico puedan ordenar las maniobras necesarias de una forma rapida y segura. Y si cabe el factor mas importante de diseño de un sistema es precisamente la seguridad de la ejecucion de sus ordenes. Para ello se le dotan de una serie de mecanismos que van desde redundancias especiales en el dialogo hombre-maquina, hasta comprobaciones hardware en el ultimo eslabon directamente sobre el elemento a controlar.

El sistema de comunicaciones no podia ser ajeno a esta necesidad de seguridad y se le imponen a este tipo de mensajes las maximas restricciones en cuanto a probabilidad de fallo. Entendemos que un mensaje de ordenes ha fallado cuando el receptor en-

tiende una orden distinta de la que se emitió, desencadenando la ejecución de una maniobra no deseada.

5.2.- Descripcion formal.

Formalicemos el concepto de seguridad en la transmision de ordenes. Para ello haremos algunas definiciones.

Supongamos que la transmision se realiza por un canal simetrico sin memoria con una tasa de errores p . Es decir, la probabilidad de que un bit se reciba erroneamente es p , siendo independiente de los anteriores y del estado del bit (1 o 0).

El estudio de errores en el canal no implica presuncion de la naturaleza de los mismos pues cualquiera que esta sea puede modelarse suponiendo una tasa de errores variable con el tiempo. En efecto, si consideramos que debido a un fallo transitorio, una rafaga (burst) de bits es erronea, lo unico que ocurrira es que durante ese intervalo de tiempo el valor de la tasa de errores sera mas alto, tomando el valor 0.5 en el caso de que sea totalmente incierto el contenido de dichos bits.

Supongamos que para la transmision de la orden usamos un mensaje M de longitud total n , con m bits de datos y r bits redundantes segun el algoritmo A .

Se verifica que $n = m + r$. Sin embargo de los m bits de datos hay k bits que son los realmente portadores de la orden (bits criticos), y que en caso de ser alterados y no detectados provocarian la recepcion de una orden valida distinta de la que se emitio: un fallo en la transmision de la orden.

Por otra parte existen c bits no criticos que en caso de ser alterados y no detectados provocarian la no ejecucion de la orden pero no una ejecucion distinta de la que se pretende. Se cumple que

$$m = c + k$$

$$n = c + k + r$$

Denominaremos probabilidad residual de error (P_r) en la transmision de ordenes, a la probabilidad de un fallo en la transmision de la orden, es decir, a la probabilidad de que algun bit critico sea alterado y no detectado por el algoritmo A.

Es claro que P_r sera funcion de la estructura del mensaje M (valores de c , k y r), del algoritmo A de deteccion de errores y de la tasa de errores del canal

$$P_r = f(A, M, p)$$

y si fijamos A y M tenemos que

$$P_r = f(p)$$

Segun las definiciones anteriores, para que haya un fallo en la transmision de una orden, los c bits no criticos del mensaje deben no ser alterados, mientras que debe haber una o varias alteraciones en los bits criticos, asi como en los de redundancia, para que el mensaje sea valido a los ojos del algoritmo A.

Sea i el numero de bits criticos y redundantes alterados en un mensaje valido. La probabilidad de que ese mensaje ocurra es

$$p^i q^{n-i}$$

siendo $q = 1 - p$.

Sea B_i el numero de mensajes validos con i bits criticos erroneos. La probabilidad de un mensaje con dichos errores es

$$B_i p^i q^{n-i}$$

Por tanto la probabilidad residual de error P_r en la transmision de ordenes sera

$$P_r = \sum_i B_i p^i q^{n-i}$$

Entre los sistemas estudiados se observan claramente 2 formas de incrementar la seguridad de la transmision de las ordenes. El primero de ellos es la repeticion del mensaje (en uno o ambos sentidos) hasta un total de "a" mensajes. En este caso la expresion de la probabilidad residual es

$$P_r = \sum_i B_i p^{ai} q^{a(n-i)}$$

El segundo metodo es la repeticion dentro del mensaje de los bits criticos, generando de esta manera mayor numero de bits redundantes que para un mensaje normal.

El primero de los metodos, como veremos despues, nos da resultados aceptables para valores de "a" relativamente bajos, pero nos lleva a una ocupacion del canal y un retardo en la posibilidad de envio de otros mensajes muy superiores. Nos tememos que su eleccion radica en muchas ocasiones en un factor psicologico de "seguridad que se ve" frente a otros sistemas mas eficientes pero menos evidentes.

El segundo de los metodos lleva a menor ocupacion del canal y menor retardo, aunque en ocasiones no da tan buenos resultados como el anterior. Ello se puede obviar (aunque ninguno de los sistemas estudiados lo hace) con una repeticion multiple de los bits criticos.

5.3.- Metodos con adicion de bits redundantes.

Llegados a este punto, y viendo que en el segundo metodo se esta usando como algoritmo complementario de deteccion de errores la repeticion de los bits criticos, cabe preguntarse si es este el mejor algoritmo complementario que se puede usar. La respuesta es evidentemente negativa y encontramos aqui una via de posible optimizacion del sistema de comunicaciones.

Hasta aqui hemos conducido el discurso de este capitulo desde un punto de vista lo mas general posible. Sin embargo, y para obtener algunos resultados mas concretos, descenderemos a hacer algunas suposiciones practicas que nos conduzcan a resultados facilmente transplantables a otros supuestos, o en su defecto, habremos mostrado un camino para estudiar supuestos diferentes.

Para ello estudiaremos lo que podria ser un mensaje tipico de ordenes con 4 bytes de cabecera (32 bits no criticos), 1 o 2 bytes de definicion de la orden (8 o 16 bits criticos) y los bits redundantes dependientes del algoritmo usado. Los bytes no criticos los elegimos con valores tipicos, por ejemplo:

"275,"2,"15,"22

Los bytes criticos se eligieron aleatoriamente siendo:

"152,"203

Nuestro objetivo sera calcular la probabilidad residual de error para distintos algoritmos de deteccion de errores, sin pretender ser exhaustivo y admitiendo de antemano que otros algoritmos pueden dar mejores resultados que los aqui presentados. Los algoritmos elegidos son los siguientes:

- 1.- CRC-16 del mensaje completo
- 2.- Repeticion simple de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 3.- Repeticion doble de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 4.- Repeticion triple de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 5.- CRC-32 del mensaje completo
- 6.- CRC-16 de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 7.- Suma mas paridad del mensaje completo
- 8.- Suma mas paridad de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 9.- Suma del mensaje completo

- 10.- Paridad del mensaje completo
- 11.- Suma de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 12.- Paridad de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 13.- CRC-CCITT de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 14.- Suma mas paridad de los bits criticos mas
CRC-CCITT de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 15.- Suma de los bits criticos mas
CRC-CCITT de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 16.- Paridad de los bits criticos mas
CRC-CCITT de los bits criticos mas
CRC-16 del mensaje completo
- 17-32.- Iguales a los anteriores sustituyendo el CRC-16 por
CRC-CCITT y viceversa

Recordando que

$$P_r = \sum_i B_i p^i q^{n-i}$$

es decir que P_r es función de p , lo que nos interesa es calcular el valor de los coeficientes B_i para cada algoritmo y de esta manera poder tabular, obtener graficas o en general manipular la función $P_r = f(p)$.

Para ello el método utilizado se describe de la forma siguiente:

- 1.- Poner todos los contadores B_i a cero
- 2.- Tomar los m bits de datos y aplicarles el algoritmo A hasta obtener los r bits redundantes
- 3.- Provocar una alteración simulada a los k bits críticos
- 4.- Al mensaje así alterado aplicarle el algoritmo A de forma que se obtengan los r bits redundantes necesarios para que el mensaje alterado sea indetectable
- 5.- Comparar el mensaje original con el alterado calculando el número de bits en los que difieren. Incrementar el contador B_i correspondiente
- 6.- Repetir los pasos 3 al 5 para todas las posibles alteraciones a los k bits críticos

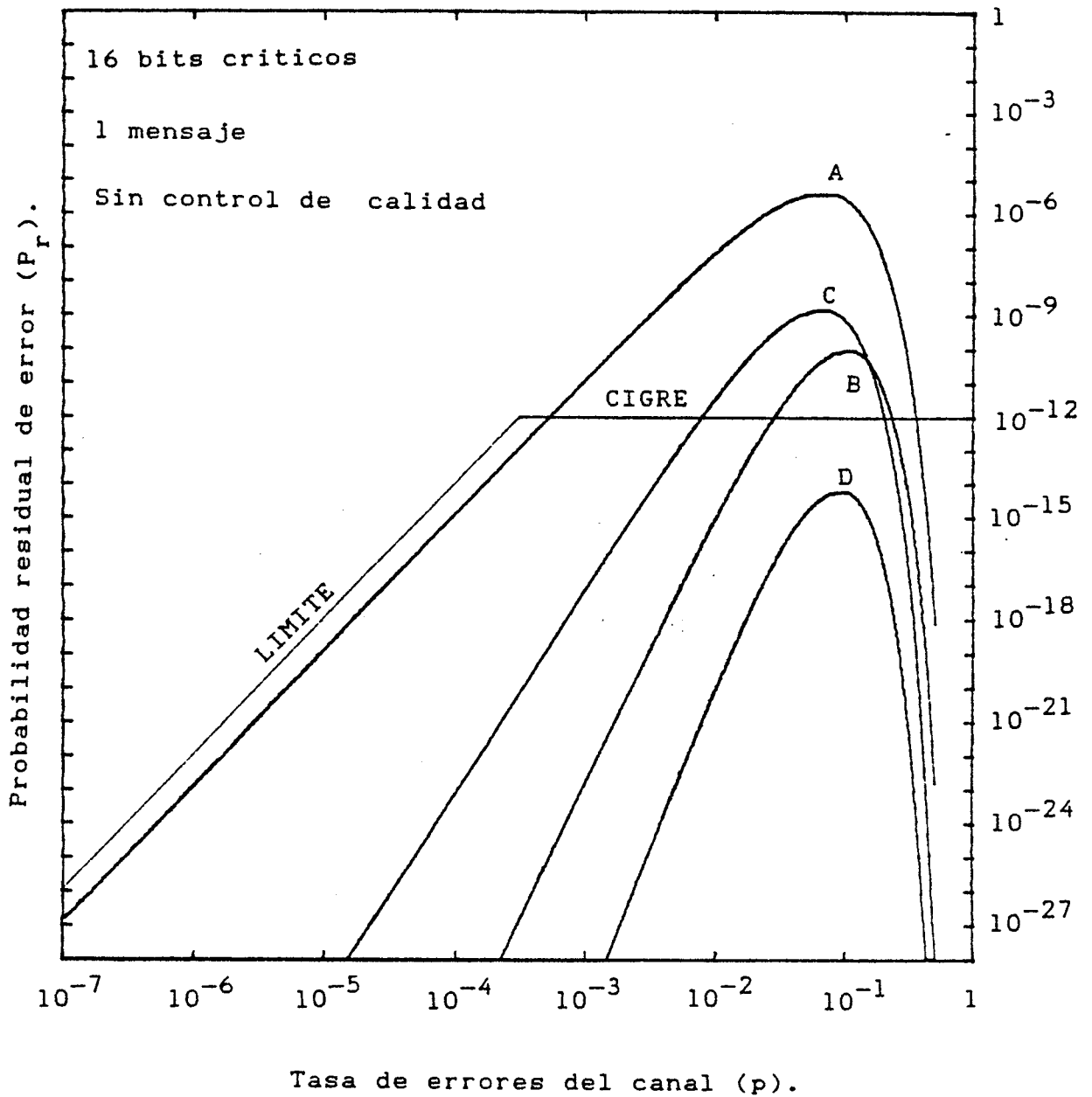
Los valores obtenidos de B_i se recogen en las tablas 5.1 y 5.2 según se trate de mensajes con 8 o 16 bits críticos. Por razones de presentación, y dado el elevado número de métodos y al-

goritmos ensayados recogemos en este capitulo las tablas y figuras mas significativas, reservando al apendice B la presentacion completa de la informacion.

La CIGRE establece una zona en el plano (P_r, p) en el cual debe encontrarse en todo momento la funcion $P_r = f(p)$ para transmision de ordenes. Esta zona, que tiene un maximo en $P_r = 10^{-12}$, viene determinada por la linea quebrada de las figuras 5.1 a 5.8, donde se representan la probabilidad residual para los distintos algoritmos.

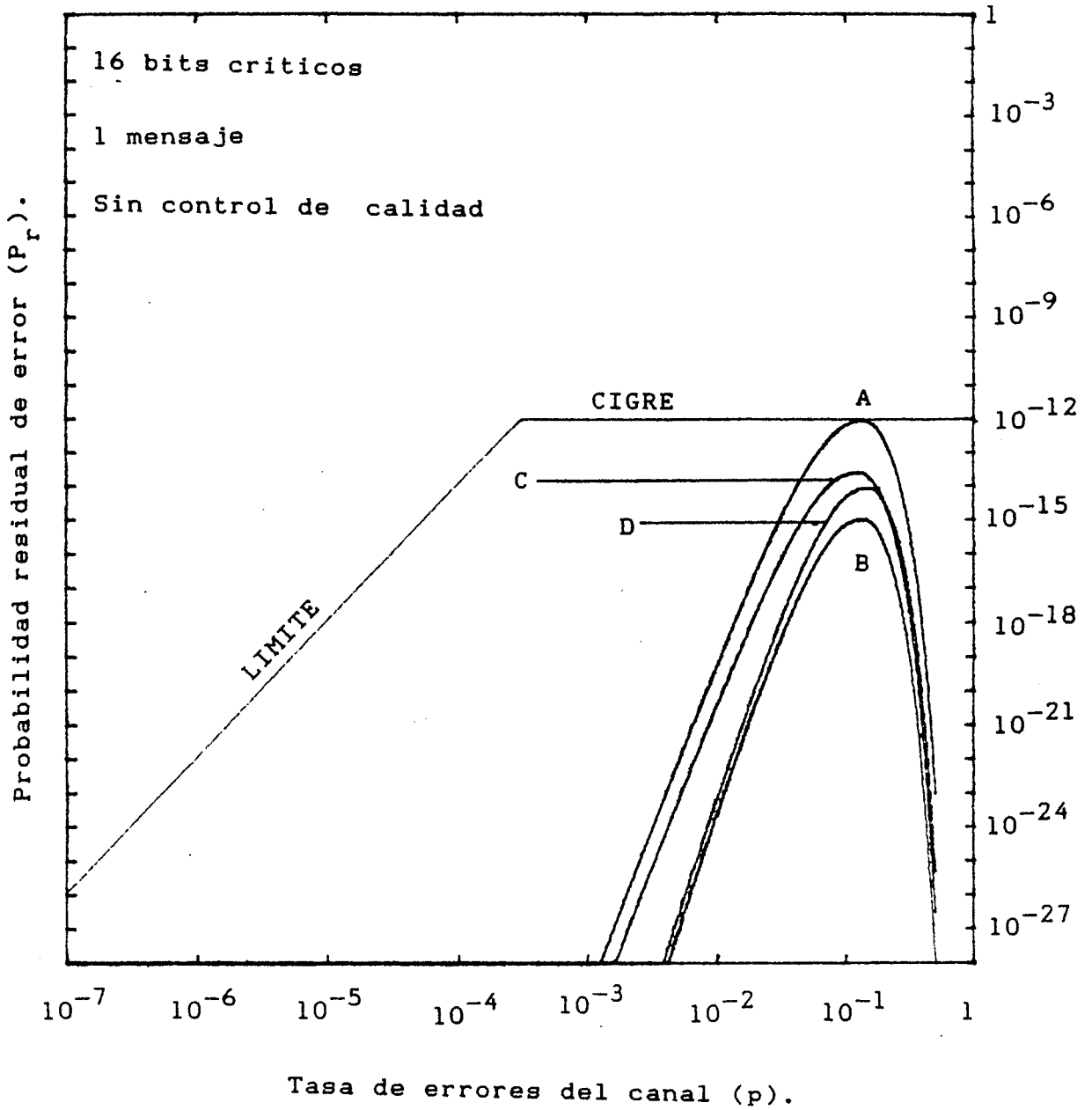
En estos graficos vemos que varios de los algoritmos estudiados no cumplen los requisitos minimos de seguridad exigidos por la CIGRE. Uno de ellos es el de repeticion de los bits criticos, cuyo uso esta muy extendido industrialmente. Vemos que solo unos cuantos algoritmos estan por debajo de 10^{-12} (limite de la CIGRE). Entre ellos sugerimos la eleccion del algoritmo 30 que:

- Cumple los limites de la CIGRE
- Los ultimos 2 bytes de redundancia corresponden al CRC-CCITT con lo cual es compatible con otro tipo de mensajes (por ejemplo transmision de medidas) que requieren menor seguridad y que se adaptan al standard CCITT.
- Usa tan solo 6 bytes de redundancia, mientras que con el algoritmo de repeticion serian necesarios mas bytes.



- A.- Algoritmo 17 (CRC-CCITT).
- B.- Algoritmo 18 (Repetición simple + CRC-CCITT).
- C.- Algoritmo 19 (Repetición doble + CRC-CCITT).
- D.- Algoritmo 20 (Repetición triple + CRC-CCITT).

Fig. 5.5.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 17 a 20.



- A.- Algoritmo 29 (CRC-16 + CRC-CCITT).
 B.- Algoritmo 30 (suma + paridad + CRC-16 + CRC-CCITT).
 C.- Algoritmo 31 (suma + CRC-16 + CRC-CCITT).
 D.- Algoritmo 32 (paridad + CRC-16 + CRC-CCITT).

Fig. 5.8.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 29 a 32.

5.4.- Metodos con repeticion de mensajes.

Todo el estudio del apartado anterior podemos hacerlo extensivo a aquellos metodos que para incrementar la seguridad en la transmision de las ordenes usan la repeticion del mensaje "a" veces.

Recordemos que para este caso

$$P_r = \sum_i B_i p^{ai} q^{a(n-i)}$$

con lo cual podemos aprovechar el calculo de los coeficientes B_i hecho anteriormente

Estudiaremos aqui tres algoritmos de deteccion de errores que son:

- 1.- CRC-16 del mensaje completo
- 7.- Suma mas paridad del mensaje completo
- 17.- CRC-CCITT del mensaje completo

En las figuras 5.9 a 5.11 se representa el comportamiento de estos algoritmos y se comparan con el elegido en el apartado anterior. Igualmente se recogen en las tablas 5.3 y 5.4 los maximos de P_r para distinto numero de mensajes implicados.

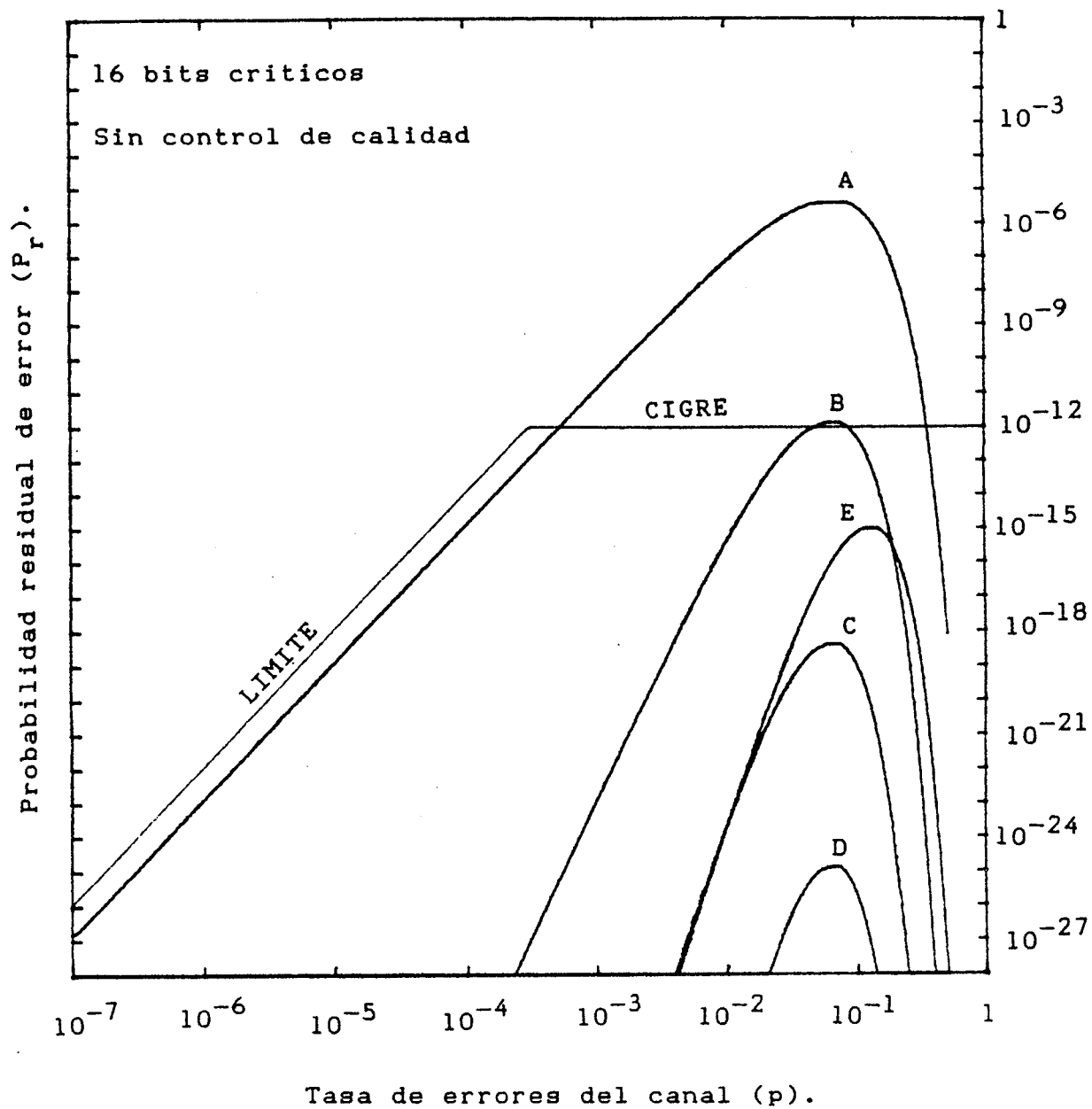
A la vista de estos resultados, y dentro del metodo de repeticion de mensajes, sugerimos la eleccion del algoritmo 17 con

triple mensaje ya que:

- Cumple los limites de la CIGRE
- Usa el CRC-CCITT como detector de errores lo cual se ajusta al standard definido por la CCITT
- Usa el minimo numero de repeticiones de mensajes para cumplir los requisistos de seguridad de la CIGRE

ALGORITMO	NUMERO DE MENSAJES			
	1	2	3	4
1	7.87E-06	2.42E-12	7.68E-19	2.44E-25
2	1.53E-06	1.93E-13	2.44E-20	1.48E-29
3	7.96E-12	8.46E-24	5.82E-36	0.00E+00
4	3.04E-14	6.98E-29	0.00E+00	0.00E+00
5	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
6	3.10E-06	3.85E-13	4.88E-20	2.95E-29
7	7.44E-04	9.33E-08	1.27E-11	1.73E-15
8	1.71E-09	9.27E-19	5.15E-28	0.00E+00
9	3.17E-03	5.45E-07	9.75E-11	1.74E-14
10	4.36E-03	7.69E-07	1.38E-10	2.46E-14
11	9.85E-07	1.91E-13	3.73E-20	7.29E-27
12	1.58E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
13	1.04E-12	7.93E-26	0.00E+00	0.00E+00
14	1.21E-14	1.37E-28	0.00E+00	0.00E+00
15	6.06E-14	1.73E-27	0.00E+00	0.00E+00
16	1.22E-13	3.47E-27	0.00E+00	0.00E+00
17	5.15E-06	1.61E-12	5.12E-19	1.63E-25
18	1.15E-10	5.67E-22	2.88E-33	0.00E+00
19	1.80E-09	3.20E-19	5.73E-29	0.00E+00
20	7.41E-15	1.61E-29	0.00E+00	0.00E+00
21	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
22	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
23	7.44E-04	9.33E-08	1.27E-11	1.73E-15
24	2.25E-09	1.24E-18	6.86E-28	1.14E-37
25	3.17E-03	5.45E-07	9.75E-11	1.74E-14
26	4.36E-03	7.69E-07	1.38E-10	2.46E-14
27	7.84E-07	1.53E-13	2.98E-20	5.83E-27
28	1.18E-06	2.29E-13	4.48E-20	8.75E-27
29	1.27E-12	8.61E-26	0.00E+00	0.00E+00
30	1.21E-15	2.30E-31	0.00E+00	0.00E+00
31	3.75E-14	8.70E-28	0.00E+00	0.00E+00
32	1.13E-14	6.12E-30	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 5.4.- Maximos de P_r para distinto numero de mensajes ($k = 16$).



- A.- 1 mensaje.
- B.- 2 mensajes.
- C.- 3 mensajes.
- D.- 4 mensajes.
- E.- Algoritmo 30 con 1 mensaje.

Fig. 5.11.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 17 (CRC-CCITT) con distinto numero de mensajes.

5.5.- Metodos con control de calidad de la señal.

Aparte de los dos metodos que se encuentran con mas frecuencia en los sistemas estudiados, cabe señalar la existencia de un tercer metodo consistente en usar el control de la calidad de la señal como una ayuda al sistema de deteccion de errores.

Usando todos los resultados anteriores y teniendo en cuenta lo dicho al tratar el tema del control de la calidad de la señal, se estudiaron los siguientes algoritmos:

- 1.- CRC-16 del mensaje completo.
- 7.- Suma + paridad del mensaje completo.
- 17.- CRC-CCITT del mensaje completo.

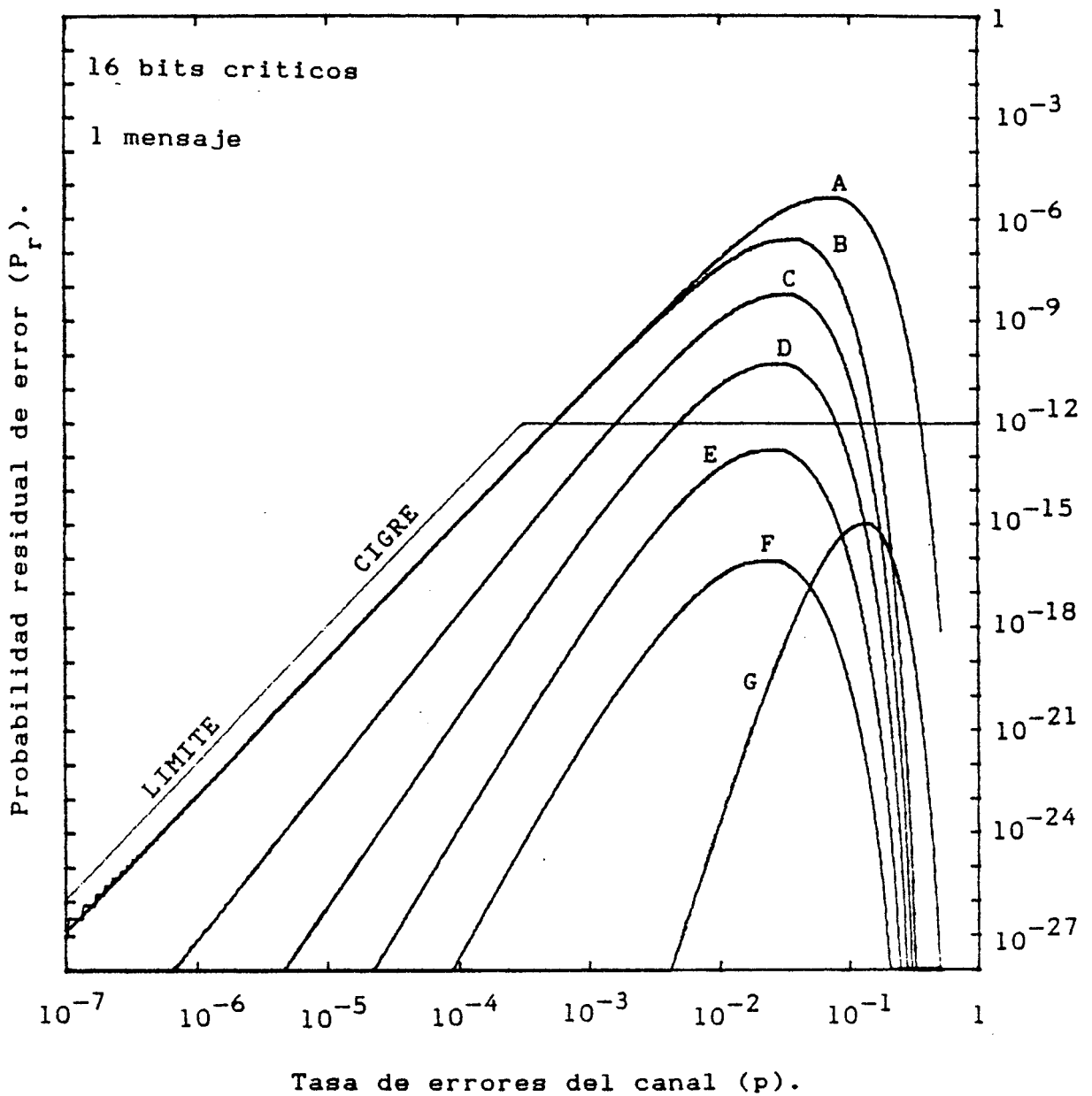
En las figuras 5.12 a 5.14 se representa el comportamiento de estos algoritmos y se comparan con el elegido para metodos con adiccion de bits redundantes. Igualmente se recogen en las tablas 5.5 y 5.6 los maximos de P_r para distintos valores del parametro de control de calidad. A la vista de estos resultados y dentro de los metodos de control de calidad de la señal, sugerimos la eleccion del algoritmo 17 con valor del parametro de control igual a 0.7, ya que:

- Cumple los limites de la CIGRE.
- Usa el CRC-CCITT como detector de errores, lo cual se ajusta al standard definido por la CCITT.
- Usa el maximo valor del parametro de control para cumplir los requisitos exigidos por la CIGRE. Recuerdese

que a medida que disminuye el parametro de control,
disminuye tambien la eficiencia del protocolo.

ALGORITMO	NO	CONTROL DE CALIDAD				
		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
1	7.87E-06	4.80E-07	1.13E-08	1.05E-10	2.91E-13	1.59E-16
2	1.53E-06	9.51E-08	1.56E-09	8.63E-12	1.13E-14	2.05E-18
3	7.96E-12	3.03E-14	4.29E-17	1.38E-20	6.64E-25	1.02E-33
4	3.04E-14	2.95E-17	1.07E-20	6.78E-25	2.80E-33	0.00E+00
5	2.05E-06	1.27E-07	2.08E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
6	3.10E-06	1.91E-07	3.11E-09	1.73E-11	2.25E-14	4.11E-18
7	7.44E-04	1.78E-04	1.50E-05	6.24E-07	9.74E-09	3.77E-11
8	1.71E-09	2.62E-11	1.48E-13	2.50E-16	8.80E-20	3.97E-24
9	3.17E-03	7.74E-04	7.39E-05	3.66E-06	7.30E-08	4.08E-10
10	4.36E-03	1.08E-03	1.04E-04	5.15E-06	1.03E-07	5.76E-10
11	9.85E-07	6.12E-08	1.19E-09	8.46E-12	1.58E-14	4.87E-18
12	1.58E-06	9.79E-08	1.90E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
13	1.04E-12	9.65E-16	1.31E-18	5.00E-22	3.95E-26	4.34E-31
14	1.21E-14	1.15E-17	7.71E-21	1.12E-24	3.49E-31	5.98E-37
15	6.06E-14	5.79E-17	5.45E-20	1.26E-23	5.11E-28	1.27E-34
16	1.22E-13	1.16E-16	1.09E-19	2.53E-23	1.02E-27	2.54E-34
17	5.15E-06	3.19E-07	7.52E-09	7.02E-11	1.94E-13	1.06E-16
18	1.15E-10	4.40E-13	1.11E-15	7.97E-19	1.16E-22	2.20E-27
19	1.80E-09	2.80E-11	1.02E-13	9.19E-17	1.34E-20	3.45E-31
20	7.41E-15	6.90E-18	2.49E-21	1.91E-28	6.67E-34	0.00E+00
21	2.05E-06	1.27E-07	2.08E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
22	2.05E-06	1.27E-07	2.07E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
23	7.44E-04	1.78E-04	1.50E-05	6.24E-07	9.74E-09	3.77E-11
24	2.25E-09	3.48E-11	1.97E-13	3.33E-16	1.17E-19	5.29E-24
25	3.17E-03	7.74E-04	7.39E-05	3.66E-06	7.30E-08	4.08E-10
26	4.36E-03	1.08E-03	1.04E-04	5.15E-06	1.03E-07	5.76E-10
27	7.84E-07	4.89E-08	9.52E-10	6.77E-12	1.26E-14	3.89E-18
28	1.18E-06	7.34E-08	1.43E-09	1.01E-11	1.90E-14	5.84E-18
29	1.27E-12	1.08E-15	1.45E-18	5.47E-22	4.31E-26	4.72E-31
30	1.21E-15	2.89E-19	1.05E-22	8.33E-27	1.19E-32	0.00E+00
31	3.75E-14	3.06E-17	2.81E-20	6.42E-24	2.58E-28	6.71E-35
32	1.13E-14	2.55E-18	1.38E-21	1.86E-25	4.53E-30	4.52E-36

Tabla 5.6.- Maximos de P_r con control de calidad ($k = 16$).



- A.- Sin control de calidad.
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.9$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.7$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- G.- Algoritmo 30 sin control de calidad.

Fig. 5.14.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 17 (CRC-CCITT) con control de calidad.

5.6.- Comparacion de metodos.

Hasta aqui hemos presentado y analizado 3 metodos para la mejora de la deteccion de errores. Hemos incluso propuesto un algoritmo concreto para cada uno de ellos. Es ahora pues, el momento de comparar dichos metodos entre si. Para ello usaremos como criterio el tiempo que se halla ocupado el canal para la transmision de un orden, criterio que de alguna forma implica conceptos de eficiencia, retardo de ejecucion de la orden, retardo en envio de otros mensajes, etc.

Supongamos el caso mas general en el cual para la transmision de una orden se hallan implicados "a" mensajes portando la orden. Los mensajes se dirigen alternativamente de centro a remota y viceversa. Cada mensaje de ida y vuelta constituye lo que denominaremos una fase de la orden. El numero de mensajes "a" debe ser impar, es decir, que el ultimo de ellos sera en sentido centro-remota. A la recepcion en la remota de este ultimo mensaje con la orden, se procede a la ejecucion de la misma y a su confirmacion mediante un mensaje remota-centro. El mensaje de ordenes tiene n bits y el de confirmacion m .

Suponemos tambien que usamos un canal ruidoso simetrico sin memoria, con velocidad de transmision V y probabilidad p de error en un bit. Se usa igualmente un sistema de control de la calidad de la señal de parametro δ que nos da una probabilidad p' de que un bit aceptado sea erroneo, una probabilidad q' de que un bit aceptado sea correcto y una probabilidad d de que un bit sea rechazado. Se cumple que

$$p' + q' + d = 1$$

Cuando el centro envia un mensaje y la remota no contesta, espera que se produzca un time-out T_0 para cualquier fase de la transmision y T_0' para la ultima fase. Una vez que se cumple el time-out se vuelve a enviar el mensaje en curso pero no las fases anteriores.

Se considera que ademas de los tiempos propios de la transmision se producen otros retardos como tiempos de atencion de interrupciones, tiempos de propagacion, tiempos de estabilizacion de la portadora, etc. La suma de todos estos tiempos la llamamos I y la consideramos independiente de la longitud del mensaje.

Para que una fase de la transmision se ejecute correctamente se necesita un par de mensajes correctos y R pares de mensajes incorrectos, siendo R el numero medio de repeticiones necesarias. En la ultima fase este numero medio de repeticiones lo denominamos R' . El tiempo que ocupa el canal un par de mensajes sera en una de las fases intermedias

$$t_i = \frac{n}{V} + I + \frac{n}{V} + I = \frac{2n}{V} + 2I$$

El tiempo que ocupa el canal un par de mensajes incorrectos es

$$t_f = \frac{n}{V} + I + T_0$$

Si se ajusta T_0 para optimizar el canal tenemos que este tiempo es

$$t_f = \frac{n}{V} + I + \frac{n}{V} + I = \frac{2n}{V} + 2I = t_i$$

El tiempo medio que ocupa el canal una de las fases de la transmision es pues

$$T = t_i + R t_f = t_i + R t_i = (1 + R) t_i$$

$$T = (1 + R) \left(\frac{2n}{V} + 2I \right)$$

Por otra parte, la probabilidad de que falle un par de mensajes en una fase, y por tanto de que haya repeticion, es

$$f = 1 - Q Q = 1 - Q^2$$

siendo Q la probabilidad de que un mensaje llegue correctamente, y que es

$$Q = q^n$$

Por tanto

$$f = 1 - q^{2n}$$

La probabilidad de que una fase necesite k pares de mensajes (1 correcto y r erroneos) es

$$P_k = (1 - f) f^{k-1} \quad \text{siendo} \quad k = r + 1$$

El valor medio de k , que denominamos K_m , es

$$K_m = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k$$

$$K_m = \sum_{k=1}^{\infty} k (1 - f) f^{k-1}$$

$$K_m = (1 - f) \sum_{k=1}^{\infty} k f^{k-1}$$

De las leyes de la progresion geometrica sabemos que

$$1 + f + f^2 + f^3 + \dots = \frac{1}{1 - f}$$

Elevando al cuadrado ambos miembros tenemos

$$1 + f^2 + f^4 + \dots + 2f + 2f^2 + 2f^3 + \dots +$$

$$+ 2f^3 + 2f^4 + \dots + 2f^5 + \dots = \frac{1}{(1 - f)^2}$$

Agrupando terminos en el primer miembro

$$1 + 2f + 3f^2 + 4f^3 + 5f^4 + \dots = \frac{1}{(1 - f)^2}$$

Es decir

$$\sum_{k=1}^{\infty} k f^{k-1} = \frac{1}{(1 - f)^2}$$

Sustituyendo en la expresion de K_m tenemos

$$K_m = R + 1 = (1 - f) \frac{1}{(1 - f)^2} = \frac{1}{1 - f}$$

$$K_m = \frac{1}{1 - (1 - q)^{2n}} = \frac{1}{q^{2n}}$$

lo cual nos permite escribir que el tiempo medio de ocupacion en una fase es

$$T = \frac{1}{q^{2n}} \left(\frac{2n}{V} + 2I \right)$$

Por analogo razonamiento, para la ultima fase de la transmision, el tiempo medio sera

$$T' = \frac{1}{q^{n+m}} \left(\frac{n+m}{V} + 2I \right)$$

El tiempo medio total sera la suma de los tiempos de todas las fases, es decir

$$T_m = \frac{a-1}{2} T + T'$$

$$T_m = \frac{a-1}{2} \frac{1}{q^{2n}} \left(\frac{2n}{V} + 2I \right) + \frac{1}{q^{n+m}} \left(\frac{n+m}{V} + 2I \right)$$

Si expresamos la ocupacion en numero de bits en vez de en segundos, multiplicando por la velocidad del canal tenemos que

$$0 = \frac{a-1}{2} \frac{1}{q^{2n}} (2n + 2W) + \frac{1}{q^{n+m}} (n+m + 2W)$$

siendo $W = V * I$, que llamaremos ocupacion por propagacion.

Aplicaremos ahora esta expresion a cada uno de los tres metodos propuestos:

A) Metodos con adiccion de bits redundantes

El algoritmo elegido tiene los siguientes valores

$$a = 1 \quad n = 96 \quad m = 48 \quad q' = q$$

Con todo esto tenemos

$$0 = \frac{1}{q^{96+48}} (96 + 48 + 2 W) = \frac{144 + 2 W}{q^{144}}$$

B) Metodos con repeticion de mensajes

El algoritmo elegido se presenta con los siguientes valores

$$a = 3 \quad n = 64 \quad m = 48 \quad q' = q$$

por lo que podemos escribir

$$0 = \frac{128 + 2 W}{q^{128}} + \frac{112 + 2 W}{q^{112}}$$

C) Metodos con control de la calidad de la señal

Para este caso los valores del algoritmo elegido son

$$a = 1 \quad n = 64 \quad m = 48 \quad q' = f(q, 0.7)$$

por lo que la ocupacion toma la forma siguiente

$$0 = \frac{112 + 2 W}{q'112}$$

Las figuras 5.15 y 5.16 nos muestran la ocupacion en funcion de la tasa de errores del canal para distintos valores del parametro de ocupacion por propagacion. En estos graficos se ve que los metodos 1 y 3 son claramente superiores al 2, mientras que el 1 y 3 tienen un punto de corte que establecen zonas en las que uno es superior al otro o viceversa.

Para ello estudiemos como se desplaza el punto de corte de ambas curvas cuando varia la ocupacion por propagacion. En el punto de corte se verifica que

$$\frac{144 + 2 W}{q^{144}} = \frac{112 + 2 W}{q'112}$$

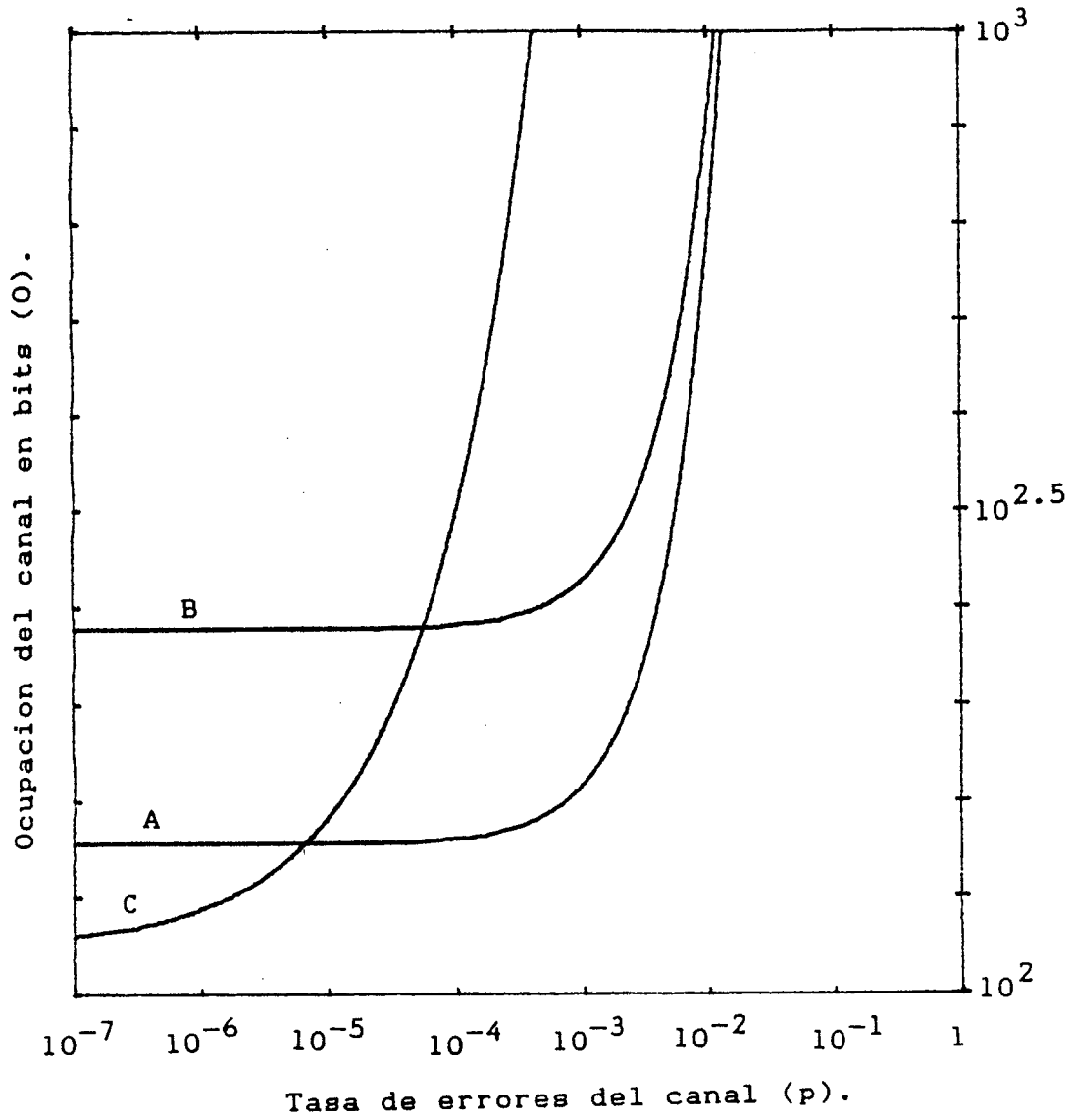
$$144 q'112 + 2 W q'112 = 112 q^{144} + 2 W q^{144}$$

$$W = \frac{112 q^{144} - 144 q'112}{2 (q'112 - q^{144})}$$

Esta curva (figura 5.17) nos define 2 zonas en el plano (p,W). En la zona superior el metodo 1 se comporta mejor y en la zona inferior es el metodo 3 el que tiene mejor comportamiento. Es pues optativo elegir uno u otro metodo en funcion de la zona de trabajo del sistema. Sin embargo varias razones nos impulsan a sugerir la eleccion del metodo 1 y son estas:

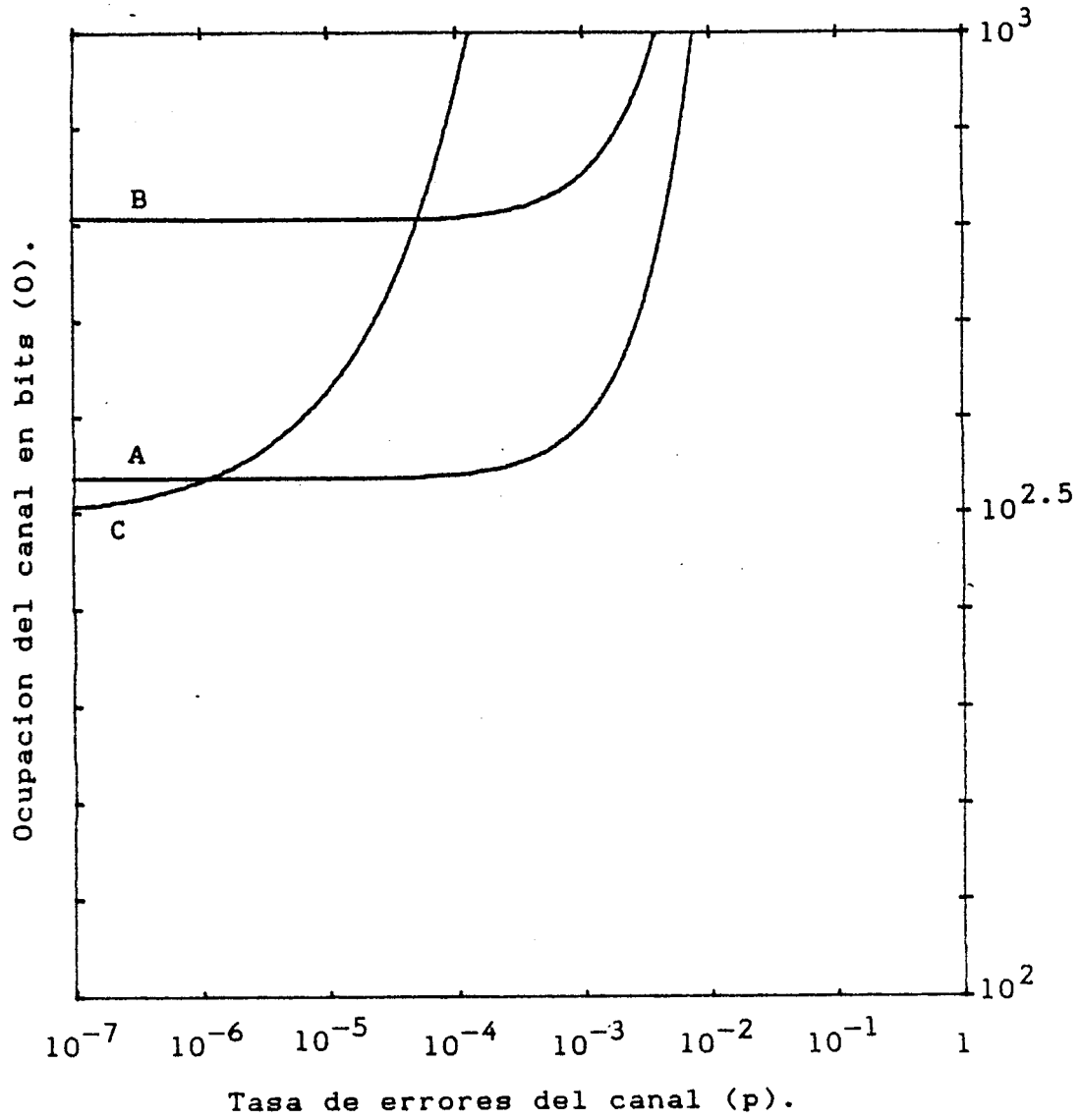
- Para tasas de error superiores a 10^{-5} se comporta siempre mejor. En la literatura se suele admitir como valor tipo de la tasa de errores el valor de 10^{-4} , aunque esta logicamente depende de multiples factores.

- La naturaleza del metodo 3 (control de calidad de la señal) tiene una fuerte componente hardware que hace dificil la variacion dinamica del parametro de control de calidad δ en funcion del tipo de mensaje. Ello lleva a que para mensajes de medidas, estados, etc. en los que no se requiere tan alta seguridad, se esta ocupando el canal innecesariamente. Incluso en el caso en el que tecnicamente el equipo de comunicaciones fuese capaz de ajustar el parametro δ en funcion de una consigna del procesador, nos queda sin resolver el problema de que el receptor no sabe "a priori" si el mensaje que va a recibir es de ordenes o no, con lo cual dificilmente puede enviar la consigna de ajuste del parametro δ .



- A.- Metodo 1 (adicion de bits redundantes).
 B.- Metodo 2 (repeticion de mensajes).
 C.- Metodo 3 (control de calidad).

Fig. 5.15.- Ocupacion del canal para distintos metodos de transmision de ordenes ($W = 0$).



A.- Metodo 1 (adicion de bits redundantes).

B.- Metodo 2 (repeticion de mensajes).

C.- Metodo 3 (control de calidad).

Fig. 5.16.- Ocupacion del canal para distintos metodos de transmision de ordenes ($W = 100$).

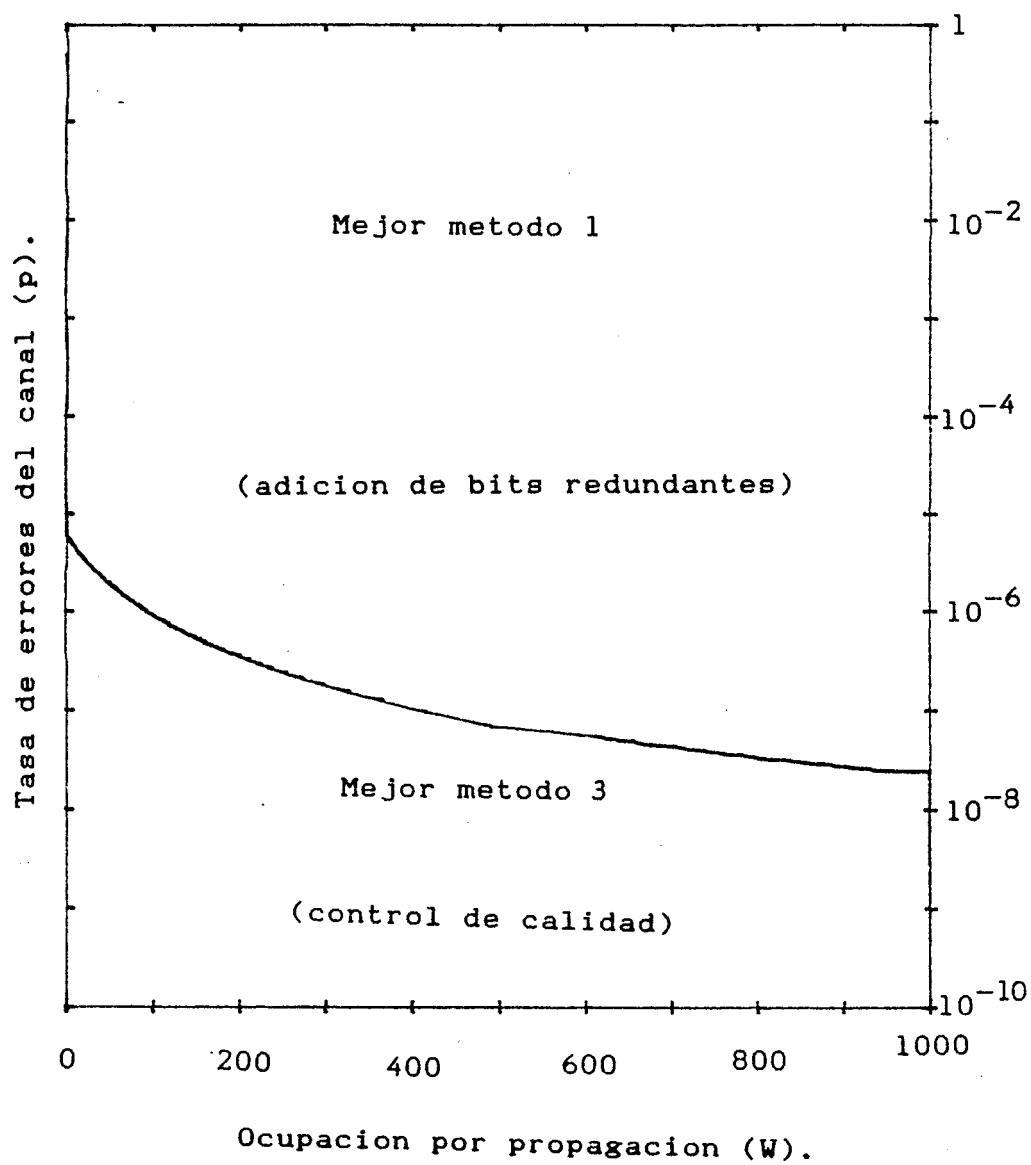


Fig. 5.17.- Comparacion de metodos de transmision de ordenes.

5.7.- Conclusiones.

Se presentan en este capítulo diferentes métodos y algoritmos para la transmisión de órdenes que son estudiados bajo un doble prisma: que tengan una seguridad considerada aceptable por los organismos internacionales y que representen la mínima ocupación posible del canal. Los métodos y algoritmos estudiados se dividen en tres tipos:

- Métodos con adición de bits redundantes.
- Métodos con repetición de mensajes.
- Métodos con control de la calidad de la señal.

Por todo lo dicho a lo largo del capítulo sugerimos para la transmisión de órdenes, la elección de métodos con adición de bits redundantes y en concreto uno que use detección de errores por la combinación de:

- Suma más paridad de los bits críticos
- CRC-16 de los bits críticos
- CRC-CCITT del mensaje completo

Con ello conseguimos por un lado que la probabilidad de que se den órdenes no deseadas sea menor de 10^{-12} (límite de la CI-GRE) para cualquiera que sea la tasa de errores del canal. Por otra parte se consigue disminuir al mínimo la ocupación del canal que dicha transmisión conlleva con valores típicos del 60% de la ocupación de un método clásico de similar seguridad. Al igual que se apuntó en el capítulo anterior, este canal que resulta libera-

do puede emplearse con diferentes propositos, con la salvedad de que la transmision de ordenes suele constituir un porcentaje pequeño del volumen total de informacion y por tanto su incidencia en la ocupacion (o liberacion) del canal es mucho menor que en el caso de las medidas.

CAPITULO 6

6.- RESUMEN Y CONCLUSIONES.

A lo largo de los capitulos anteriores se han presentado algunas de las tematicas mas interesantes en las comunicaciones entre procesadores para control en tiempo real de sistemas complejos, entre las que destacamos las siguientes:

- Topologia de la red de comunicaciones.
- Errores de transmision.
- Calidad de los datos.
- Transmision de estados.
- Transmision de medidas.
- Transmision de ordenes.

Usando canales de baja velocidad que se constituyen en el principal "recurso escaso" que interesa optimizar, se presenta la relacion existente entre los requerimientos de los distintos tipos de transmisiones. Estos requerimientos basicos son:

- Minima edad de los datos transmitidos.
- Minimo desfase entre datos diferentes.
- Minimo retardo en transmision de incidencias.
- Maxima capacidad de transmision de medidas.

- Maxima seguridad en transmision de ordenes.

Aunque de naturaleza diferente, todos ellos inciden en el sentido de incrementar la ocupacion del canal, lo cual confiere unicidad a los enfoques y criterios de optimizacion parciales.

Ademas del hecho que la propia recopilacion supone, se pueden señalar como aportaciones de esta Tesis las que a continuacion se mencionan:

- ? - Introduccion de los conceptos de edad y desfase como cuantificacion de la calidad de los datos, proponiendo el modelo al que deben ajustarse los sistemas de control para la optimizacion de ambos.
- Introduccion de modelos ARIMA para prediccion de valores de medidas en comunicaciones mediante tecnicas conjuntas de analisis de series temporales y control de sistemas discretos.
- * - Protocolo de presentacion de medidas basado en la transmision de la diferencia entre valor real y predicho en formatos de longitud variable, lo cual supone una sensible mejora de la ocupacion del canal, siendo el 33% un valor tipico de la nueva ocupacion frente a la de protocolos clasicos equivalentes.

- Analisis y propuesta de metodos para transmision de ordenes consiguiendo que la seguridad de los mismos se ajuste a las normas internacionales, todo ello con la minima repercusion en la ocupacion del canal.

Entre los temas que pueden ser objeto de ulteriores desarrollos encontramos, entre otros, los siguientes:

- Uso del control de calidad de la señal en deteccion de errores.
- Estudio del comportamiento de sistemas de control con el uso de redes conmutadas de comunicaciones.
- Analisis de modelos distintos del ARIMA para prediccion de medidas, con inclusion de modelos no lineales y no estacionarios.
- Estudio de nuevos algoritmos para transmision de ordenes.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Abella,R.,Gennet,R. y Kowal,J. "Supervision and Remote Control System for the French Power System". Simposio IFAC. Febrero 1.977.
- 2.- Alique Lopez,J.R.,Riochon Muñoz,J. y Calderon Estevez, Leopoldo. "Introduccion a los codigos ciclicos". Regulacion y Mando, 1.979.
- 3.- Anderson,D.B. "Design aspects of the Ontario Hydro DACS Project. Data Acquisition Subsystem".1.975.
- 4.- ASELECTRICA. "Iberduero/Node Link Interface", 1.982.
- 5.- ASELECTRICA. "Sevillana/Node Link interface", 1.982.
- 6.- ASELECTRICA. "Basic Company Node", 1.983.
- 7.- ASINEL. "Comunicacion de datos", 1.978.
- 8.- Bertalanffy,L. "Perspectivas en la Teoria General de Sistemas". Alianza Universidad. 1.979.
- 9.- Berthelot,G. y Terrat,R. "Petri Nets Theory for the Correctness of Protocols". IEEE Transactions on Communications. 1.982.
- 10.- Bischke,R.F. "Power System State Estimation: Practical Considerations". IEEE PAS. 1.981.

- 11.- Bisci,D. y Ficrina,M. "Technical Characteristics and Functional Performance of Equipment Used for Operational Data Transmission in Large Power Systems". EUROCON. 1.977.
- 12.- Blair,P.K. "NAVSTAR". Signal. 1.983.
- 13.- Bochmann,G. et alt. "Experience with Formal Specifications Using an Extended State Transition Model". IEEE Transactions on communications. 1.982.
- 14.- Bonanomi,P. "Phase angle measurements with synchronized clocks. Principle and aplicaciones". IEEE PAS. 1.981.
- 15.- Calvo,J.L., Franquelo,L.G. y Luque,J. "Estructura de comunicaciones para un sistema de control en tiempo real. Aplicacion a una red de reparto y distribucion de energia electrica". V Reunion GEM. Sevilla. 1.984.
- 16.- CCITT. "Recomendacion X.25".
- 17.- C.E.I. "Telecontrol Equipment and Systems: Transmission Protocols". 1.983.
- 18.- CIGRE. "The use of packet switching networks in telecontrol".
- 19.- CIGRE. "Communication Link Reliability and Quality Link Outage Monitoring".1.976.
- 20.- CIGRE. "Operational and Functional Requirements for Telecontrol Systems". 1.980.
- 21.- CIGRE. "Telecontrol Communications Protocols". 1.980.

- 22.- CIGRE. "Interim Report on Computer Based Protection and Digital Techniques in Substations". 1.983.
- 23.- Clements, K.A., Denisan, D.J. y Ringlee, R.J. "The effects of measurement non-simultaneity, bias, and parameter uncertainty on power system state estimation".
- 24.- Crask, G.J. "HDLC for Master to Remote Station Communication". 1.980.
- 25.- C.S.E. "Protocolo de comunicaciones en el despacho central".
- 26.- C.S.E. "Protocolo de comunicaciones en el C.P.M. de Sevilla". 1.984.
- 27.- DATAPRO "A Summary Description of the CCITT X.25 Packet Switching Interface". 1.981.
- 28.- Digital E.C. "Introduction to Local Area Network". 1.982.
- 29.- Exposito, A.G. "Reparto de Cargas en la Simulacion y Analisis de Redes Electricas Mediante Microprocesadores en Paralelo". 1.985.
- 30.- FECSA "Sistema de telecontrol y supervision de Fuerzas Electricas de Cataluña, S.A.". 1.978.
- 31.- Fischetti, M. "Power and Energy". IEEE Spectrum. 1.984.
- 32.- Franklin, G.F. and Powell, D. "Digital Control of Dynamic Systems". Addison-Wesley Publishing Company. 1.980.
- 33.- Funk, G. "Message error detecting properties of HDLC protocols". 1.981.

- 34.- Galli,F. y Schiani,A. "The new ENEL data acquisition system for dispatch and remote control of the power generation and transmission system".
- 35.- Galli,F. y Schiani,A. "Systeme a niveaux multiples pour la teleconduite et l'acquisition de donnees dans un grand reseau electrique". CIGRE. 1.974.
- 36.- Garcia Franquelo,L. "Optimizacion de recursos en la gestion de protocolos de comunicaciones con microprocesadores. Aplicacion al control de procesos distribuidos". Tesis Doctoral ETSII de Sevilla. 1.980.
- 37.- Garcia Hoffmann, M. "Aportacion al estudio de la descripcion, validacion y verificacion de protocolos de comunicacion". Tesis Doctoral ETSII de Barcelona.
- 38.- Karp,H.R. "Basics of Data Communications". Mc Graw-Hill, Inc. 1.976.
- 39.- Keyes,M.A., Gillespie,D.M. "Distributed Digital Control: System Architecture for Power, Energy and Utility Applications". Simposio IFAC. 1.977.
- 40.- Kleinrock,L. et alt. "A Study of Line Overhead in the ARPANET". Communications of the ACM. 1.976.
- 41.- Kogure,J. y Takiqawa,K. "A minicomputer-based time-division multiplex cyclic digital telemetry system".CRIEPI.
- 42.- Kogure,J. y Takeshita, S. "Data transmission performance on the telecommunications networks for power system operation". CRIEPI.
- 43.- Kowal,J. "General problems and overall design of EDF network supervisory and control system". EUROCON. 1.977.

- 44.- Kowal,J., Merlin, A. y Stengel,J. "The new real-time control system for EDF generation and transmission facilities". Simposio IFAC. 1.977.
- 45.- Kuo,F. "Protocols and Techniques for Data Communication and Coding". Mc Graw-Hill, Inc. 1.981.
- 46.- Masiello,R. "Computers in power: a welcome invader". IEEE Spectrum. 1.985.
- 47.- Missout,G. Beland,J. y Bedard,G. "Dynamic Measurement of the Absolute Voltage Angle on Long Transmission Lines". IEEE PAS. 1.981.
- 48.- Otomo,E. "General Facilities Automation and Communications for the Electric Power Company". Technocrat. 1.979.
- 49.- Perez,A. "Byte-Wise CRC Calculations". 1.983.
- 50.- Perez Coyto,A. "Tratamiento de la seguridad de un sistema de energia electrica en los centros de control" Regulacion y Mando. 1.984.
- 51.- Peterson,W.W. y Brown,D.T. "Cyclic Codes for error detection". Proceedings of the IRE, 1.961.
- 52.- Peterson,W.W. "Error-correcting codes" The MIT Press. 1.961.
- 53.- Pless,V. "Introduction to the Theory of Error-Correcting Codes". John Wiley and Sons, Inc. 1.982.
- 54.- Pouzin,L. y Zimmermann,H. "A Tutorial on Protocols". Proceedings of the IEEE. 1.978.

- 55.- Priestley, M.B. "Spectral Analysis and Time Series". Academic Press. 1.981.
- 56.- Ricci, P. Schiavi, A. "Hierarchical computer structure of the ENEL new control system". 1.978.
- 57.- Riera, J., Basañez, L. y Xampany, J. "Regulacion frecuencia potencia de sistemas de energia electrica interconectados". Regulacion y Mando. 1.984.
- 58.- Roberts, L. "The Evolution of Packet Switching". Proceedings of the IEEE. 1.978.
- 59.- Rubio, F.R. "Control Adaptativo de Procesos Industriales. Aplicacion a una Central Solar". Tesis Doctoral ETSII Sevilla. 1.985.
- 60.- Russell, J., Masiello, R. y Bose, A. "Power System Control Center Concepts". Power Industry Computer Applications Conference. Cleveland, Ohio. 1.979.
- 61.- Schoute, F.C. "Dynamic frame length ALOHA". IEEE Transactions on communications. 1.983
- 62.- Schwartz, R. y Melliar-Smith, P.M. "From State Machines to Temporal Logic: Specification Methods for Protocol Standards". IEEE Transactions on communications. 1.982.
- 63.- Selga, J.M. "TRAME: A packet switching computer network for power systems". CIGRE. 1.978.
- 64.- Selga, J.M. y Rivera, J. "HDLC reliability and the FRBS method to improve it". Seventh Data Communication Symposium. 1.981.
- 65.- Selga, J.M. "Centro de supervision de una red de computadores". Mundo Electronico. 1.983.

- 66.- Selga,J.M., Xampeny,J. "Congestion Control Method for the TRAME Network, Description and Simulation Results". MELE-CON-83. 1.983.
- 67.- Selga,J.M. "Optimum Control of Packet Switching Networks". Electronic Letters. 1.983.
- 68.- Tanenbaum,A.S. "Computer Networks". Prentice Hall, Inc. 1.981.
- 69.- The Chubu E.P.Co. "The automatic operation and administration system for the communication system". 1.980.
- 70.- The Tokyo E.P.Co. "Central Load Dispatching Office". 1.984.
- 3
71.- The Tokyo E.P.Co. "Electric Power Telecommunication Systems". 1.984.
- 72.- Torralba,A. "Modelado, Analisis y Simulacion de Redes de Interconexion en Sistemas Multiprocesadores". Tesis Doctoral ETSII Sevilla. 1.985.
- 73.- Tsuneo Mitsui "Development of Digital Transmission System" Japan IERE Council. 1.978.
- 74.- Union Electrica "Telecontrol del Sistema Electrico Alto Tajo". 1.972.
- 75.- Union Electrica "Sistemas de Telecontrol". 1.978.
- 76.- Union Electrica "Communication USART". 1.982.
- 77.- Union Electrica "Jonction Usart de teleaction". 1.982.

- 78.- Vatenfall "The Data Network of the Swedish State Power Board for Operational Supervision". 1.976.
- 79.- Vatenfall "Information System for the National Control Centre". 1.977.
- 80.- Viterbi,A.J., Omura,J.K. "Principles of Digital Communication and Coding". Mc Graw-Hill, Inc. 1.979.
- 81.- Wollenberg,B.F. y Sasson,A.M. "Energy Control Center Design". IEEE Tutorial Course. 1.977.
- 82.- Xampeny,J. et alt. "Estructura del software en el sistema de telecontrol integral de ENHER".
- 83.- Xampeny,J. y Rosello,F. "Requerimientos de control en los sistemas de energia electrica". Regulacion y Mando. 1.984.

APENDICE A

RELACION DE EMPRESAS CONSULTADAS.

Para el desarrollo de esta Tesis se ha contado, además de la experiencia previa del autor en este campo, con la información facilitada por distintas empresas y organismos, principalmente del sector eléctrico. Esta información sobre sus sistemas de control nos ha llevado a un conocimiento al día de las distintas soluciones existentes. Dichas empresas han desarrollado sus sistemas, bien por medios propios, o bien contando con terceros entre los que se encuentran los líderes del sector a nivel mundial. Se relacionan a continuación las principales empresas cuyos sistemas hemos podido estudiar, bien directamente, bien a través de la documentación sobre los mismos, la cual se relaciona en la bibliografía.

- ASELECTRICA (hoy REDESA).
- Compañía Sevillana de Electricidad.
- Union Eléctrica Fenosa.
- Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana (ENHER).
- Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA).
- Iberduero.
- Compañía Federal de Electricidad de Méjico.
- Ontario Hydro, CANADA.
- Electricite de France (EDF), FRANCIA.

- Empresa Nacional de Electricidad (ENEL), ITALIA.
- Central Electricity Generating Board (CEGB), REINO UNIDO.
- The Tokyo Electric Power Company, JAPON.
- The Swedish State Power Board, SUECIA.

Este conjunto de empresas presentan una gran diversidad de problemáticas y soluciones a las mismas, entre las que podemos destacar la presencia de grandes redes nacionales con sistemas multiniveles operados por una unica empresa (EDF), o bien por diversas empresas con los problemas adicionales de coordinacion que ello supone (ASELECTRICA). Hemos encontrado tambien comunicaciones basadas en redes de conmutacion de paquetes (ENHER, Suecia y Japon), control de calidad de la señal (Japon), grandes problemas de regulacion frecuencia-potencia (Iberduero) y toda la serie de cuestiones enunciadas a lo largo de la exposicion.

APENDICE B

RESULTADOS DEL ANALISIS Y SIMULACION.

Se presentan en este apendice los resultados obtenidos tanto en el analisis de medidas como en la simulacion de transmision de ordenes, tal como se describen en los capitulos 4 y 5 de la presente Tesis. Se recogen aqui todas las tablas y figuras que por razones de presentacion se incluyen solo de manera parcial en los capitulos correspondientes. La numeracion de dicha informacion es la misma con la que es referenciada en el texto.

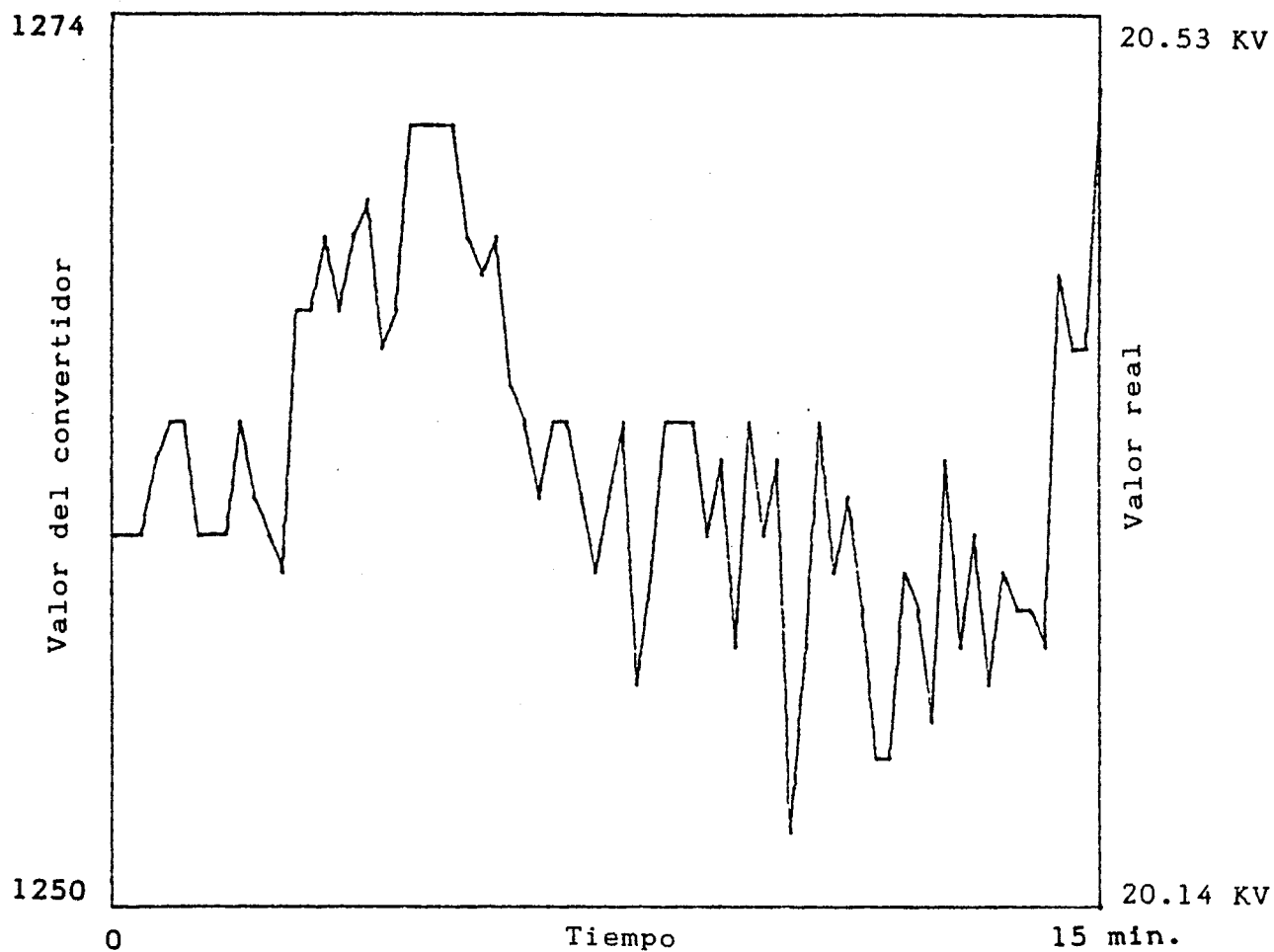


Fig. 4.3.- Evolucion de la medida 1 (tension).

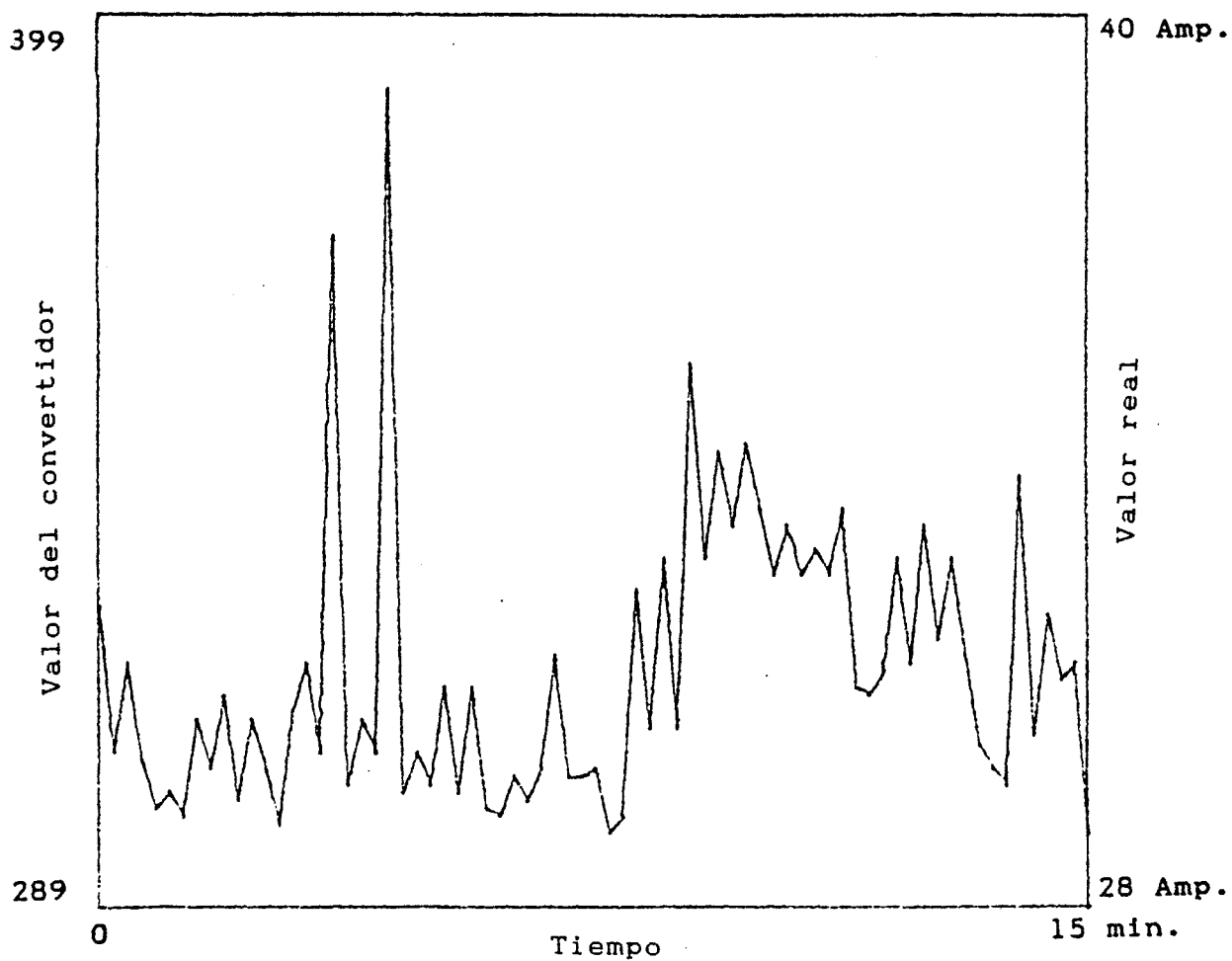


Fig. 4.4.- Evolucion de la medida 2 (intensidad).

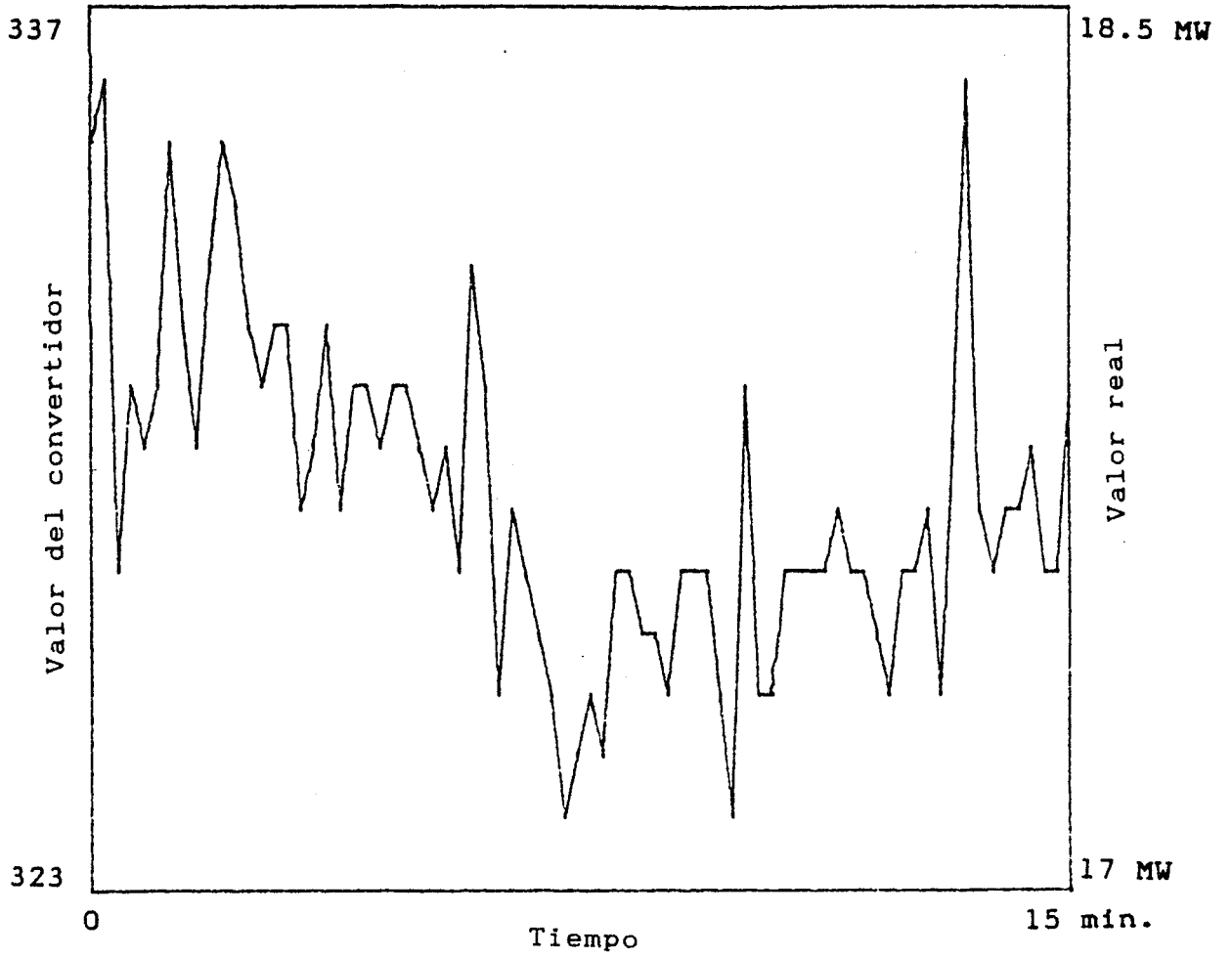


Fig. 4.5.- Evolucion de la medida 3 (potencia activa).

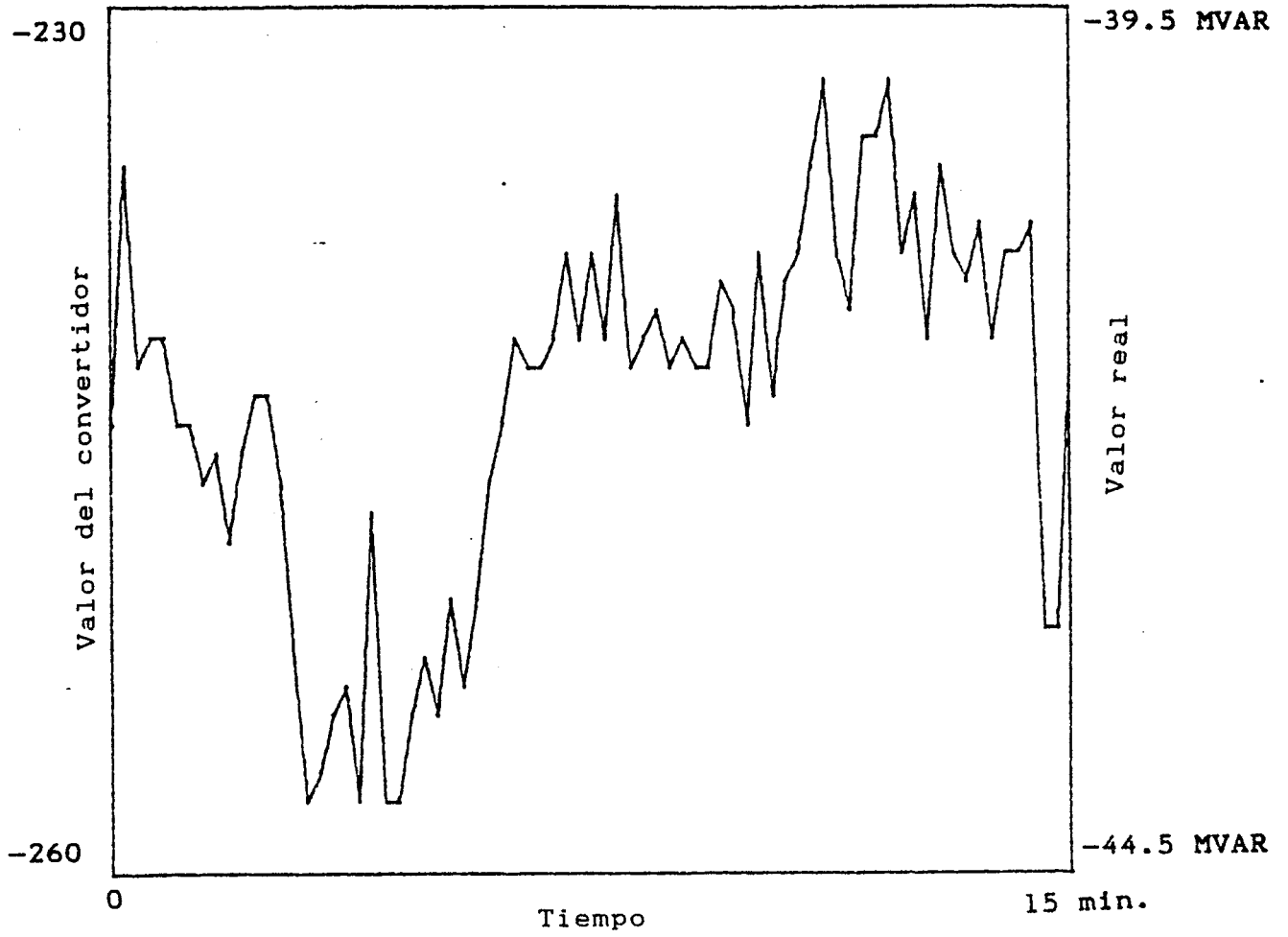


Fig. 4.6.- Evolucion de la medida 4 (potencia reactiva).

	Orden de diferencia del modelo				
	0	1	2	3	4
1.- Tension	92.13%	98.72%	23.99%	87.88%	52.07%
2.- Intens.	99.51%	86.17%	83.05%	97.35%	45.99%
3.- Activa	63.80%	63.80%	63.80%	79.39%	58.14%
4.- Reactiva	45.99%	99.51%	4.80%	45.99%	16.31%

Tabla 4.1.- Niveles de confianza suministrados por el test de no estacionalidad.

NOTA: Se puede considerar que la serie no presenta estacionalidades cualquiera que sea el orden de diferencia del modelo.

D=0

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	168.0	162.8	161.5	160.5	159.3
MA=1	190.5	164.0	163.8	163.8	162.4	181.7
MA=2	182.0	166.0	183.8	185.2	164.6	163.5
MA=3	179.2	167.8	180.0	169.0	162.5	232.0
MA=4	173.4	168.3	168.6	169.8	415.0	460.0
MA=5	174.1	169.6	168.5	225.1	473.4	715.7

Tabla 4.2.- Criterio AIC para medida 1 (tension)
y orden de diferencia 0.

NOTA: Mínimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=1

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	168.4	165.6	163.7	162.9	162.5
MA=1	167.6	167.3	167.7	166.4	164.9	364.0
MA=2	169.6	172.0	169.7	167.7	167.6	166.9
MA=3	171.0	171.0	170.5	169.7	169.5	229.8
MA=4	172.4	171.0	169.4	168.9	166.3	165.8
MA=5	173.3	171.2	332.0	166.5	171.2	252.0

Tabla 4.3.- Criterio AIC para medida 1 (tension)
y orden de diferencia 1.

NOTA: Minimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=0

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	412.0	399.6	395.9	382.3	376.7
MA=1	418.4	409.8	400.3	631.4	384.0	378.5
MA=2	415.0	408.5	398.7	394.7	385.9	381.3
MA=3	417.0	408.5	400.1	933.9	386.6	733.0
MA=4	400.8	397.5	390.1	385.0	380.7	378.7
MA=5	403.1	406.0	391.7	394.3	386.1	381.1

Tabla 4.4.- Criterio AIC para medida 2 (intensidad)
y orden de diferencia 0.

NOTA: Minimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=1

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	----	417.5	410.9	391.2	386.5	382.9
MA=1	415.2	408.6	418.0	393.2	388.6	442.9
MA=2	415.1	407.4	404.2	395.2	747.0	399.8
MA=3	415.4	409.2	1127.9	394.5	403.0	402.0
MA=4	415.3	402.2	398.7	393.8	393.0	429.2
MA=5	406.2	402.1	398.7	395.7	402.3	374.7

Tabla 4.5.- Criterio AIC para medida 2 (intensidad)
y orden de diferencia 1.

NOTA: Mínimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=0						
	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	119.7	115.5	97.5	97.8	89.3
MA=1	133.3	112.6	227.1	98.1	277.2	89.6
MA=2	117.8	115.9	106.9	96.8	94.4	90.9
MA=3	108.5	94.3	95.0	283.1	102.9	89.8
MA=4	103.9	94.0	99.8	101.3	171.6	91.3
MA=5	94.8	96.5	97.0	97.9	98.0	93.4

Tabla 4.6.- Criterio AIC para medida 3 (activa)
y orden de diferencia 0.

NOTA: Minimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=1

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	131.9	102.6	102.1	91.4	90.4
MA=1	120.5	121.9	100.9	112.7	92.3	92.5
MA=2	110.6	99.7	96.0	96.4	94.0	127.0
MA=3	97.4	97.6	119.5	102.5	100.7	187.6
MA=4	98.5	102.3	101.4	99.4	94.7	92.0
MA=5	96.8	100.0	103.2	103.8	97.8	99.2

Tabla 4.7.- Criterio AIC para medida 3 (activa)
y orden de diferencia 1.

NOTA: Mínimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=0

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	205.2	192.2	190.2	189.1	188.5
MA=1	245.3	199.6	194.3	192.7	191.2	190.3
MA=2	222.0	198.2	195.1	194.5	193.0	199.7
MA=3	216.5	196.9	196.4	196.4	192.1	231.2
MA=4	213.4	197.5	230.1	246.7	220.5	482.1
MA=5	213.3	198.2	248.2	296.5	525.8	279.7

Tabla 4.8.- Criterio AIC para medida 4 (reactiva)
y orden de diferencia 0.

NOTA: Minimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

D=1

	AR=0	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
MA=0	---	197.9	194.7	193.0	192.1	190.6
MA=1	201.2	199.5	195.7	195.0	194.3	192.2
MA=2	198.8	224.1	197.7	197.0	193.2	250.6
MA=3	200.8	200.2	199.7	183.8	191.1	613.8
MA=4	201.6	198.5	212.4	201.1	---	199.5
MA=5	200.9	201.4	268.8	418.6	204.6	201.8

Tabla 4.9.- Criterio AIC para medida 4 (reactiva)
y orden de diferencia 1.

NOTA: Minimo valor de AIC para AR=5 y MA=0.

AR	Tension	Intens.	Activa	Reactiva
1	168.0	412.0	119.7	205.2
2	162.8	399.6	115.5	192.2
3	161.5	395.9	97.5	190.2
4	160.5	382.3	97.8	189.1
5	159.3	376.7	89.3	188.5
6	159.0	373.1	87.6	187.1
7	157.9	368.9	85.0	185.8
8	155.3	361.9	84.6	182.6
9	154.9	358.5	80.5	181.9
10	153.3	354.9	81.6	180.3
11	153.1	349.7	80.0	179.3
12	149.2	346.1	79.6	177.0
13	145.5	342.0	79.9	175.0
14	139.0	338.8	80.6	174.2
15	132.5	335.6	77.1	169.5
16	129.4	332.3	78.4	162.6
17	125.5	329.1	77.7	160.2
18	123.2	325.9	78.4	158.3
19	117.7	322.6	78.2	158.1
20	116.2	319.4	79.4	158.0

Tabla 4.10.- Criterio AIC para MA=0 y D=0.

NOTA: El AIC decrece con AR pero no se consiguen minimos estables en el rango de valores estudiados (1 a 20).

AR	Tension	Intens.	Activa	Reactiva
1*	2.571	14.472	1.787	3.135
1	2.852	12.477	1.866	3.272
2	2.726	12.420	1.846	3.103
3	2.705	12.213	1.842	3.125
4	2.705	13.089	1.815	3.096
5	2.576	13.217	1.994	3.044

* Con parametro unidad

Tabla 4.11.- Diferencia media entre valor real y predicho.

Bits	Dif.	AR=1 [*]	AR=1	AR=2	AR=3	AR=4	AR=5
0	0	38.20%	33.72%	34.66%	35.16%	35.52%	35.75%
2	<u>+1</u>	18.01%	11.20%	11.32%	11.46%	11.62%	12.12%
3	<u>+3</u>	14.95%	18.10%	17.49%	17.63%	17.26%	16.68%
4	<u>+7</u>	12.15%	17.61%	17.71%	16.97%	16.84%	16.60%
5	<u>+15</u>	7.91%	11.27%	10.72%	10.59%	10.42%	10.49%
6	<u>+31</u>	3.71%	4.67%	4.64%	4.69%	4.77%	4.71%
7	<u>+63</u>	2.50%	2.02%	2.02%	2.02%	2.05%	2.11%
8	<u>+127</u>	2.27%	1.26%	1.27%	1.30%	1.34%	1.35%
9	<u>+255</u>	0.29%	0.14%	0.16%	0.16%	0.17%	0.17%
>9	<u>>+255</u>	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%

* Con parametro unidad.

Tabla 4.12.- Distribucion de las diferencias entre valor real y predicho.

Modelo	Longitud	No. bits control	Formato	No. bits datos
AR=1 *	5.1636	2	1	0
			2	4
			3	8
			4	16
AR=1	5.3592	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=2	5.3078	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=3	5.2886	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=4	5.2788	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16
AR=5	5.2725	2	1	0
			2	4
			3	7
			4	16

* Con parametro unidad.

Tabla 4.13.- Soluciones optimas del protocolo de presentacion de medidas.

NOTA: El minimo valor de la longitud se consigue para AR=1 .

Modelo	Consumo de CPU	Consumo relativo
AR=1*	0.019 mseg.	1
AR=1	4.752 mseg.	250
AR=2	8.336 mseg.	439
AR=3	14.496 mseg.	763
AR=4	23.940 mseg.	1260
AR=5	37.360 mseg.	1966

* Con parametro unidad.

Tabla 4.14.- Consumos de CPU de cada modelo.

	Tension	Intens.	Activa	Reactiva
Media	0.171	-0.389	-0.053	0.027
Desviacion tipica	3.506	22.545	2.520	4.164
Nivel de confianza (Kolmogorov)	16.31%	7.65%	19.45%	41.84%

Tabla 4.15.- Analisis estadisticos de la diferencia entre valor real y predicho.

NOTA: Con excepcion de la medida de intensidad, puede decirse que la diferencia entre valor real y predicho se ajusta a una normal. Ello queda tambien de manifiesto en las figuras 4.7 a 4.10.

Umbral	Ocupacion
0	33.55%
1	29.09%
2	26.95%
3	25.54%
4	24.39%
5	23.55%
6	22.88%
7	22.09%
8	21.22%

Tabla 4.16.- Ocupacion del canal para distintos umbrales de transmision.

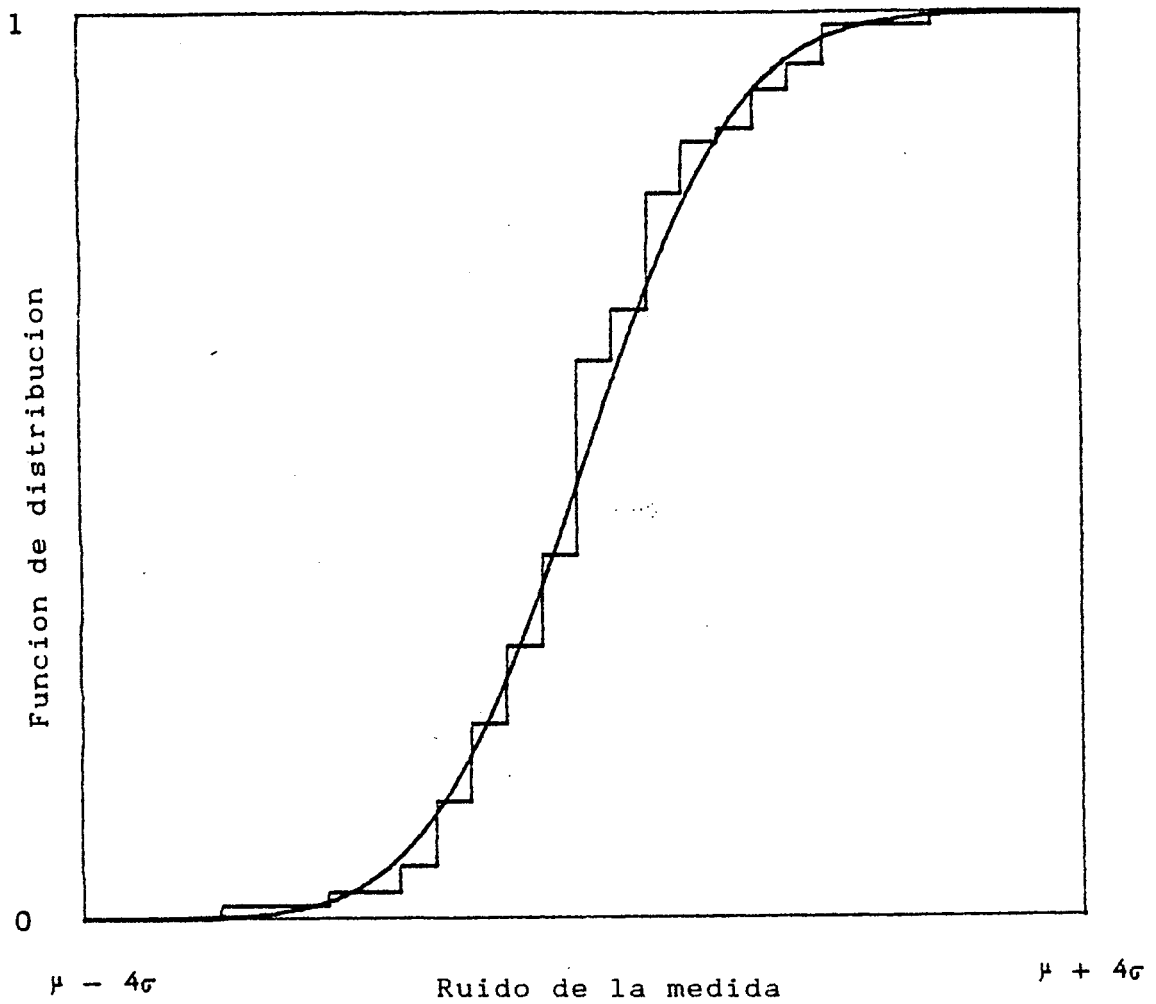


Fig. 4.7.- Funciones de distribucion teorica y experimental para el ruido de la medida 1 (tension).

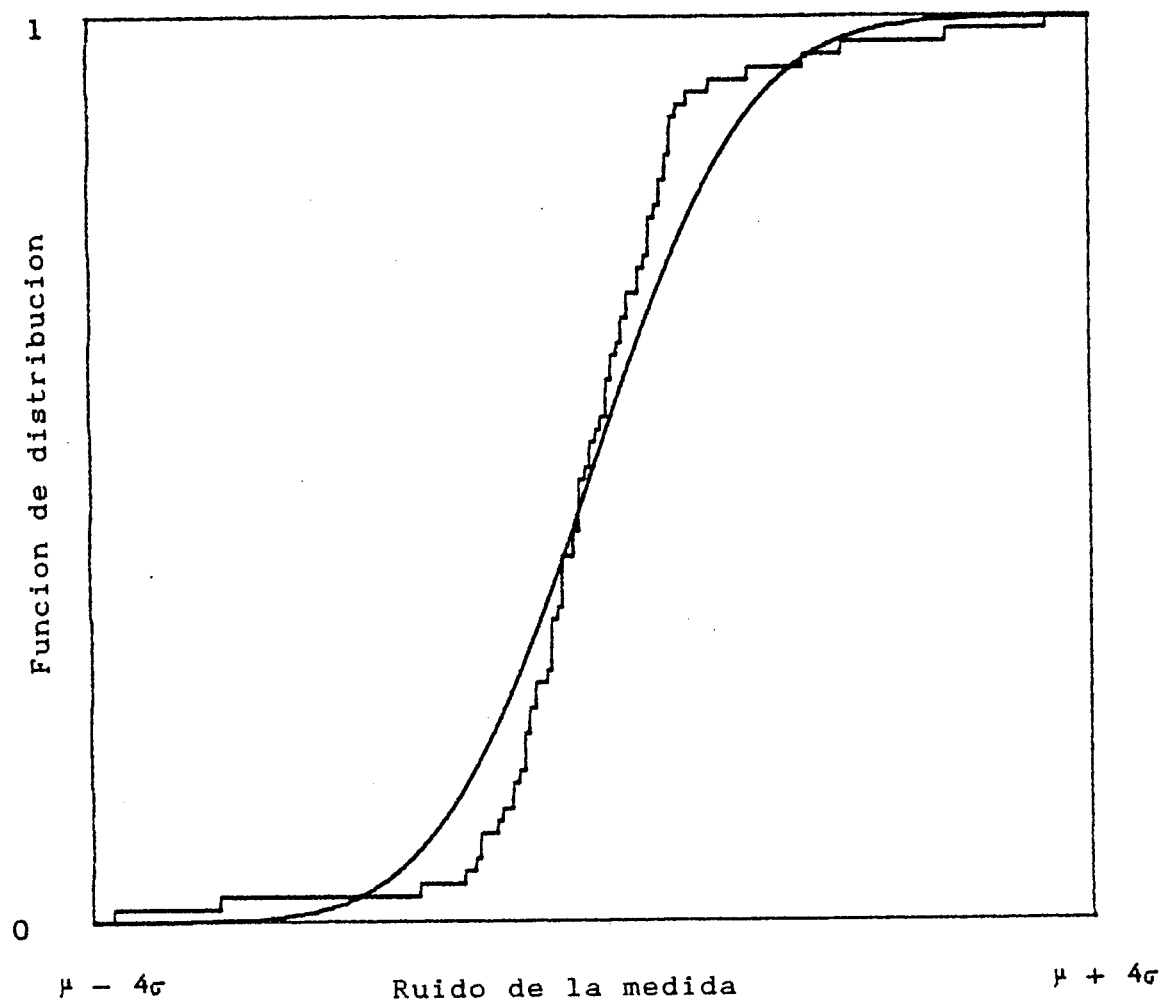


Fig. 4.8.- Funciones de distribucion teorica y experimental para el ruido de la medida 2 (intensidad).

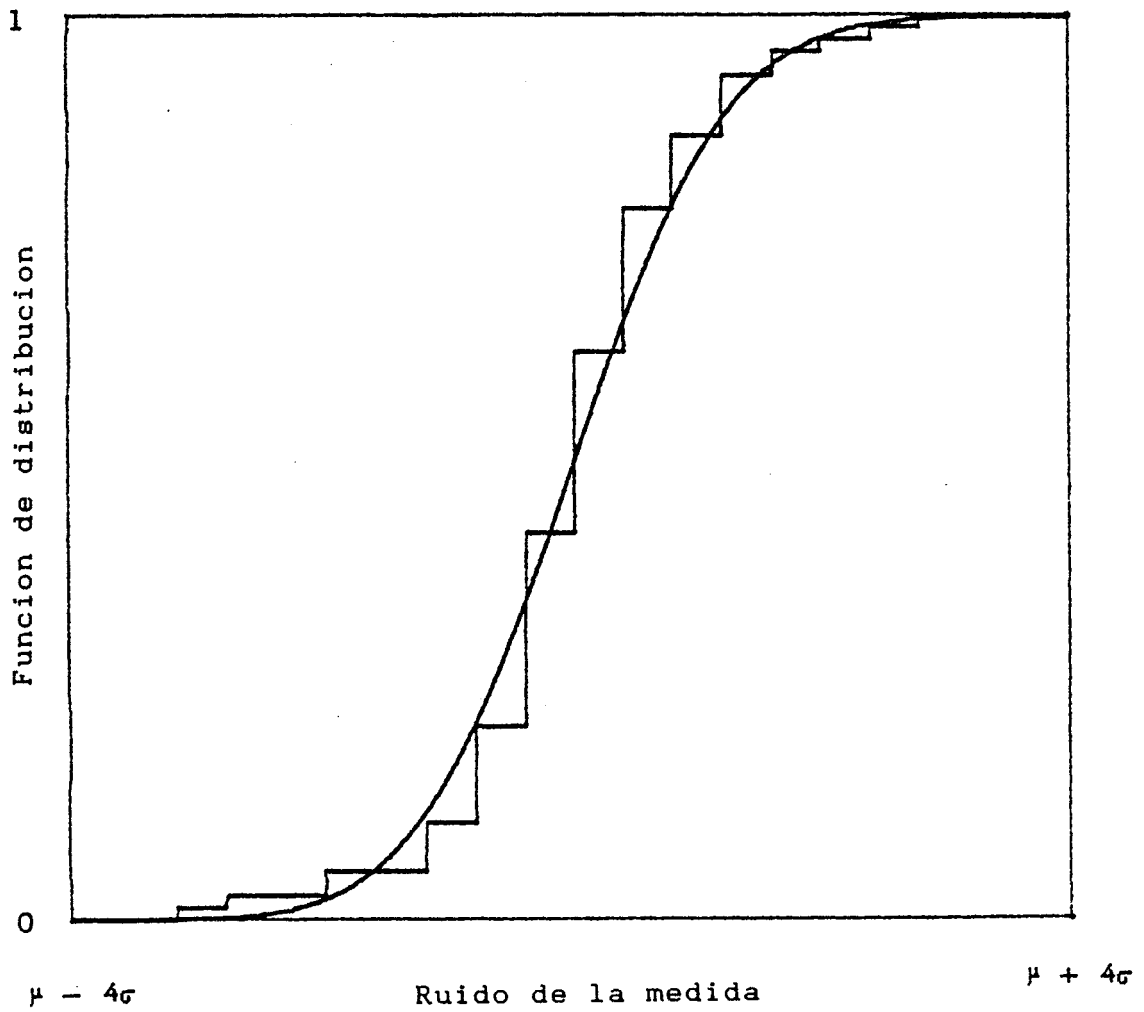


Fig. 4.9.- Funciones de distribucion teorica y experimental para el ruido de la medida 3 (potencia activa).

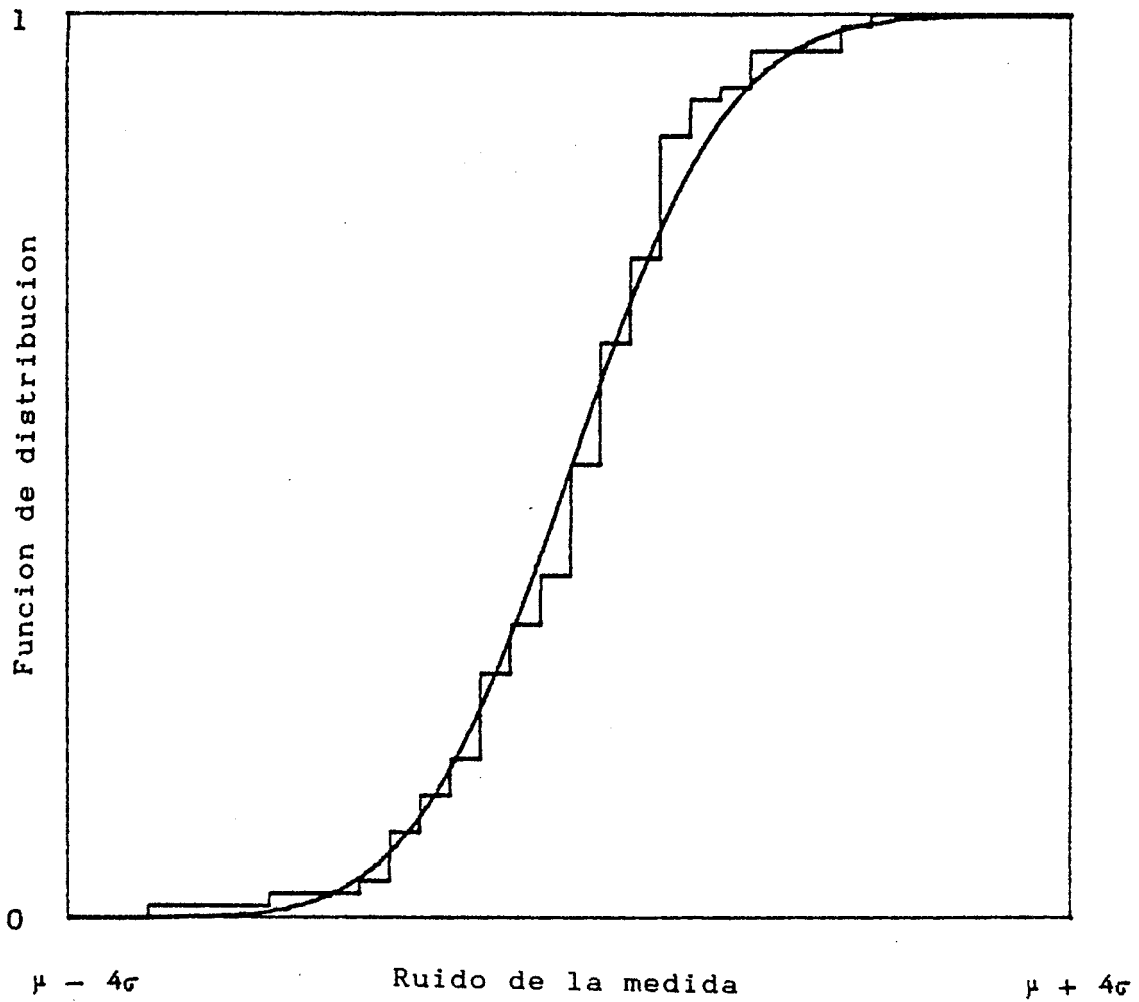


Fig. 4.10.- Funciones de distribucion teorica y experimental para el ruido de la medida 4 (potencia reactiva).

ALGORITMO	COEFICIENTES B(I)									
1	0	0	0	8	0	34	0	49	0	92
	0	62	0	10						
2	0	0	0	0	0	8	0	7	0	11
	0	26	0	37	0	51	0	53	0	42
	0	19	0	1						
3	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6
	0	14	0	16	0	14	0	35	0	45
	0	54	0	33	0	25	0	9		
4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	3
	0	3	0	6	0	14	0	19	0	28
	0	23	0	34	0	37	0	28	0	29
	0	13	0	11	0	3				
5	0	0	0	8	0	16	0	22	0	64
	0	88	0	48	0	9				
6	0	0	0	8	0	34	0	49	0	92
	0	62	0	10						
7	0	0	6	1	2	16	6	10	27	15
	22	35	19	24	30	11	12	13	2	2
	2									
8	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6
	0	14	0	16	0	14	0	35	0	45
	0	54	0	33	0	25	0	9		
9	0	6	2	18	11	33	28	44	38	34
	24	11	5	1						
10	0	8	0	28	0	56	0	70	0	56
	0	28	0	8	0	1				
11	0	0	0	0	0	8	0	7	0	11
	0	26	0	37	0	51	0	53	0	42
	0	19	0	1						

Tabla 5.1.- Coeficientes B_i con $k = 8$.

12	0	0	0	0	0	8	0	7	0	11
	0	26	0	37	0	51	0	53	0	42
	0	19	0	1						
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	0	4	0	7	0	35	0	48	0	46
	0	45	0	37	0	18	0	4	0	2
14	0	0								
	0	0	0	6	0	2	0	8	0	13
	0	14	0	23	0	40	0	44	0	28
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	10	0	4	0	21	0	28
	0	36	0	40	0	42	0	43	0	14
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	10	0	4	0	21	0	28
	0	36	0	40	0	42	0	43	0	14
17	0	0	0	8	0	8	0	30	0	41
	0	64	0	58	0	33	0	13		
18	0	0	0	0	0	8	0	4	0	17
	0	31	0	28	0	60	0	45	0	33
	0	22	0	7						
19	0	0	0	0	0	4	0	2	0	12
	0	8	0	19	0	25	0	36	0	42
	0	42	0	33	0	20	0	8	0	3
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	0	3	0	4	0	15	0	15	0	28
	0	40	0	48	0	26	0	22	0	17
21	0	0	0	8	0	16	0	22	0	64
	0	88	0	48	0	9				
22	0	0	0	8	0	8	0	30	0	41
	0	64	0	58	0	33	0	13		

Tabla 5.1.- Coeficientes B_i con $k=8$ (continuacion).

23	0 22 2	0 35	6 19	1 24	2 30	16 11	6 12	10 13	27 2	15 2
24	0 0 0 0	0 8 42 1	0 0	0 19 33	0 0	4 25 20	0 0	2 36 8	0 0	12 42 3
25	0 24	6 11	2 5	18 1	11	33	28	44	38	34
26	0 0	8 28	0 0	28 8	0 0	56 1	0	70	0	56
27	0 0 0	0 31 22	0 0	0 28 7	0 0	8 60	0 0	4 45	0 0	17 33
28	0 0 0	0 31 22	0 0	0 28 7	0 0	8 60	0 0	4 45	0 0	17 33
29	0 0 0	0 31 31	0 0	0 27 5	0 0	0 58	0 0	0 54	0 0	8 41
30	0 0 0 0	0 7 22 21	0 0	0 1 37 10	0 0	0 3 39 2	0 0	0 15 43 1	0 0	0 22 32
31	0 0 0	0 5 48	0 0	0 13 57	0 0	0 16 25	0 0	0 21 13	0 0	0 52 5
32	0 0 0	0 5 48	0 0	0 13 57	0 0	0 16 25	0 0	0 21 13	0 0	0 52 5

Tabla 5.1.- Coeficientes B_i con $k=8$ (continuacion).

ALGORITMO	COEFICIENTES B(I)									
1	0	0	0	24	0	171	0	530	0	2356
	0	6052	0	12818	0	18745	0	16212	0	7068
	0	1467	0	92						
2	0	0	0	12	0	16	0	78	0	185
	0	478	0	1128	0	2316	0	4380	0	7085
	0	9924	0	11798	0	11397	0	8652	0	4908
	0	2231	0	830	0	117				
3	0	0	0	0	0	0	0	7	0	28
	0	61	0	111	0	297	0	685	0	1357
	0	2422	0	3786	0	5456	0	6818	0	7863
	0	8108	0	7672	0	6634	0	5243	0	3785
	0	2508	0	1449	0	782	0	296	0	115
	0	41	0	11						
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
	0	12	0	35	0	50	0	179	0	321
	0	605	0	982	0	1531	0	2401	0	3065
	0	4004	0	4760	0	5515	0	6007	0	6431
	0	6089	0	5582	0	4822	0	4045	0	3064
	0	2299	0	1543	0	927	0	581	0	365
	0	176	0	72	0	39	0	17	0	3
5	0	0	0	16	0	68	0	162	0	728
	0	2064	0	4824	0	9649	0	13392	0	15220
	0	12388	0	5684	0	1240	0	100		
6	0	0	0	24	0	171	0	530	0	2356
	0	6052	0	12818	0	18745	0	16212	0	7068
	0	1467	0	92						
7	0	5	13	19	68	129	236	508	841	1403
	2328	3322	4655	6162	7296	8219	8398	7499	6057	4229
	2438	1194	438	78						
8	0	0	0	0	0	3	0	12	0	34
	0	157	0	447	0	1326	0	3378	0	7307
	0	11711	0	14690	0	13236	0	8703	0	3575
	0	839	0	112	0	5				
9	0	17	13	139	191	752	1269	2857	4714	7171
	9688	10365	10470	7799	5584	2746	1284	369	90	16
10	0	24	0	252	0	1512	0	5670	0	13608
	0	20412	0	17496	0	6561				
11	0	0	0	5	0	12	0	62	0	257
	0	785	0	2633	0	6688	0	12965	0	17097
	0	13990	0	7671	0	2696	0	599	0	71
	0	4								

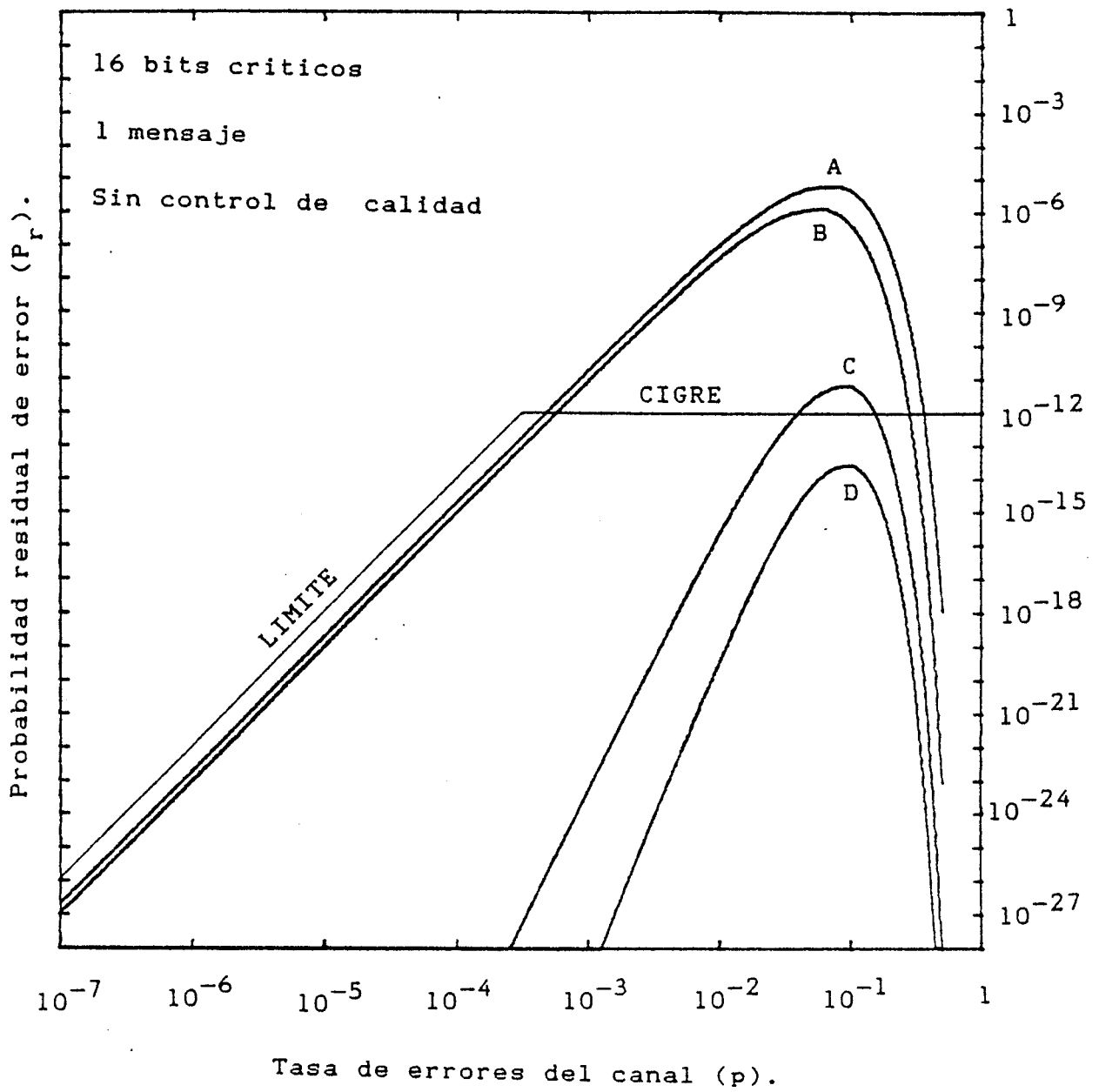
Tabla 5.2.- Coeficientes B_i con $k = 16$.

12	0 0	0 8	0 22	0 111	0 334
	0 1061	0 2999	0 6679	0 12388	0 16170
	0 14244	0 7921	0 2982	0 561	0 55
13	0 0	0 0	0 0	0 0	0 12
	0 33	0 229	0 1027	0 3235	0 7938
	0 12971	0 14994	0 12486	0 7805	0 3495
	0 1066	0 211	0 32	0 1	
14	0 0	0 0	0 0	0 0	0 1
	0 2	0 10	0 29	0 86	0 226
	0 735	0 1943	0 4067	0 7622	0 11065
	0 12780	0 11718	0 8347	0 4520	0 1749
	0 506	0 117	0 12		
15	0 0	0 0	0 0	0 0	0 2
	0 3	0 26	0 104	0 395	0 1388
	0 3816	0 7872	0 12149	0 13994	0 12098
	0 7882	0 3912	0 1448	0 346	0 91
	0 8	0 1			
16	0 0	0 0	0 0	0 0	0 4
	0 8	0 38	0 114	0 444	0 1414
	0 3840	0 7648	0 11898	0 14032	0 12330
	0 8113	0 3924	0 1378	0 288	0 60
	0 2				
17	0 0	0 16	0 50	0 308	0 1750
	0 6908	0 14908	0 18149	0 14084	0 6940
	0 2098	0 318	0 6		
18	0 0	0 0	0 0	0 22	0 55
	0 299	0 955	0 2435	0 4952	0 7745
	0 10504	0 11603	0 10365	0 8029	0 4843
	0 2340	0 1022	0 279	0 66	0 15
	0 6				
19	0 0	0 0	0 10	0 7	0 38
	0 79	0 145	0 394	0 662	0 1411
	0 2240	0 3670	0 5194	0 6711	0 7933
	0 8242	0 7977	0 6790	0 5362	0 3758
	0 2378	0 1341	0 676	0 303	0 135
	0 51	0 18	0 9	0 0	0 1
20	0 0	0 0	0 0	0 0	0 3
	0 20	0 32	0 77	0 141	0 370
	0 555	0 991	0 1672	0 2181	0 3111
	0 3969	0 4793	0 5586	0 6099	0 6354
	0 5953	0 5712	0 4808	0 4004	0 3062
	0 2314	0 1488	0 1022	0 598	0 307
	0 163	0 93	0 34	0 22	0 0
	0 1				
21	0 0	0 16	0 68	0 162	0 728
	0 2064	0 4824	0 9649	0 13392	0 15220
	0 12388	0 5684	0 1240	0 100	
22	0 0	0 16	0 50	0 308	0 1750
	0 6908	0 14908	0 18149	0 14084	0 6940
	0 2098	0 318	0 6		

Tabla 5.2.- Coeficientes B_i con $k=16$ (continuacion).

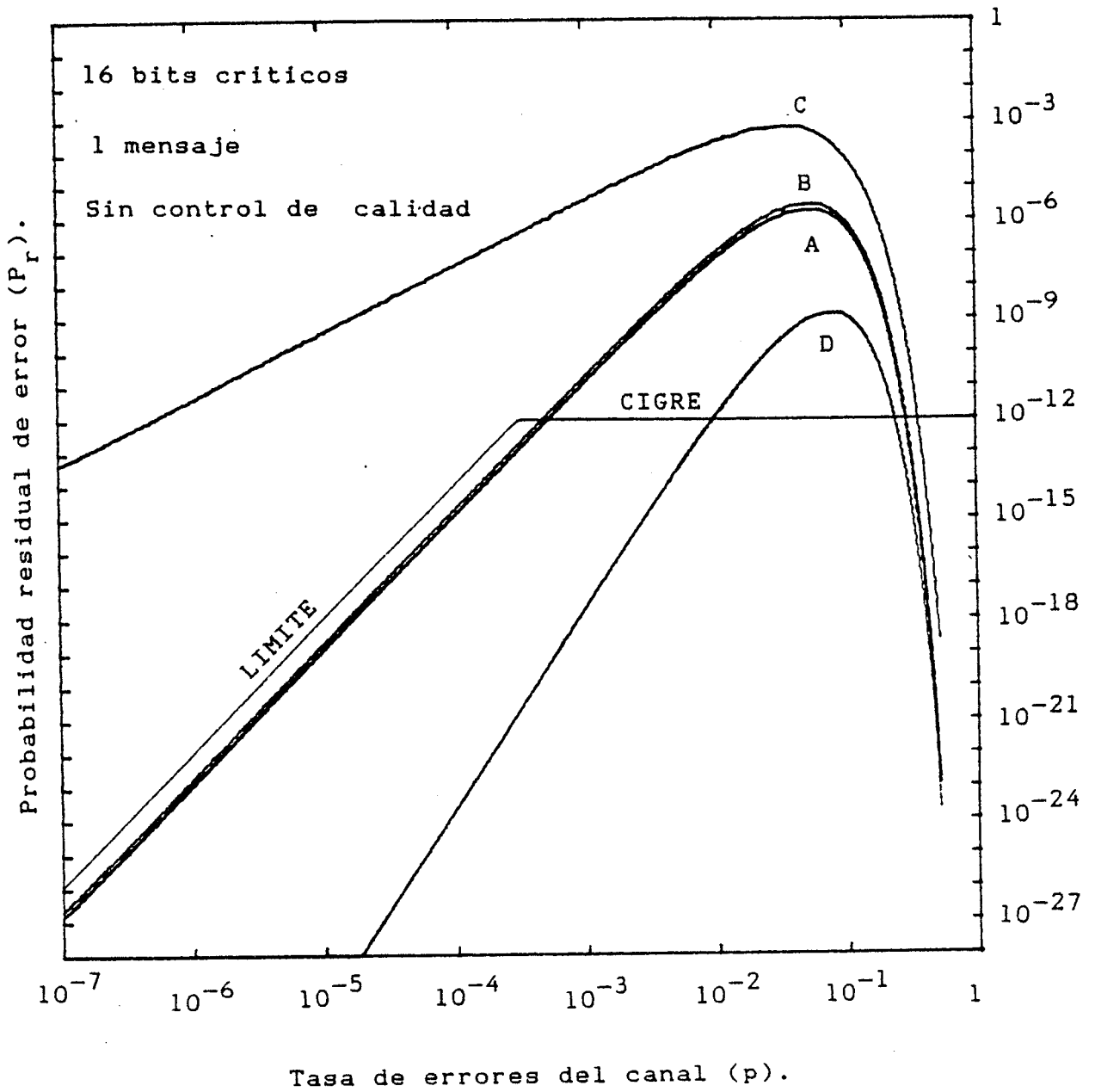
23	0	5	13	19	68	129	236	508	841	1403
	2328	3322	4655	6162	7296	8219	8398	7499	6057	4229
	2438	1194	438	78						
24	0	0	0	0	0	4	0	7	0	24
	0	122	0	460	0	1355	0	3517	0	7485
	0	11675	0	14594	0	13349	0	8429	0	3513
	0	863	0	130	0	8				
25	0	17	13	139	191	752	1269	2857	4714	7171
	9688	10365	10470	7799	5584	2746	1284	369	90	16
	1									
26	0	24	0	252	0	1512	0	5670	0	13608
	0	20412	0	17496	0	6561				
27	0	0	0	4	0	4	0	28	0	119
	0	659	0	2616	0	7328	0	13555	0	16737
	0	13786	0	7309	0	2593	0	656	0	126
	0	14	0	1						
28	0	0	0	6	0	10	0	55	0	208
	0	841	0	2656	0	7055	0	12980	0	16392
	0	14238	0	8097	0	2524	0	449	0	24
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
	0	114	0	347	0	1187	0	3279	0	7285
	0	12199	0	15126	0	13535	0	8176	0	3261
	0	870	0	133	0	9	0	1		
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	6	0	9	0	42	0	127	0	351
	0	838	0	1871	0	3878	0	7196	0	10790
	0	13012	0	12246	0	8581	0	4393	0	1685
	0	425	0	70	0	14	0	1		
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	15	0	48	0	160	0	545	0	1422
	0	3722	0	7354	0	11582	0	14356	0	12767
	0	8149	0	3809	0	1269	0	285	0	42
	0	9								
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	17	0	65	0	179	0	595	0	1565
	0	3585	0	6980	0	11635	0	14311	0	12963
	0	8354	0	3833	0	1203	0	219	0	30
	0	1								

Tabla 5.2.- Coeficientes B_i con $k=16$ (continuacion).



- A.- Algoritmo 1 (CRC-16).
- B.- Algoritmo 2 (Repeticion simple + CRC-16).
- C.- Algoritmo 3 (Repeticion doble + CRC-16).
- D.- Algoritmo 4 (Repeticion triple + CRC-16).

Fig. 5.1.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 1 a 4.



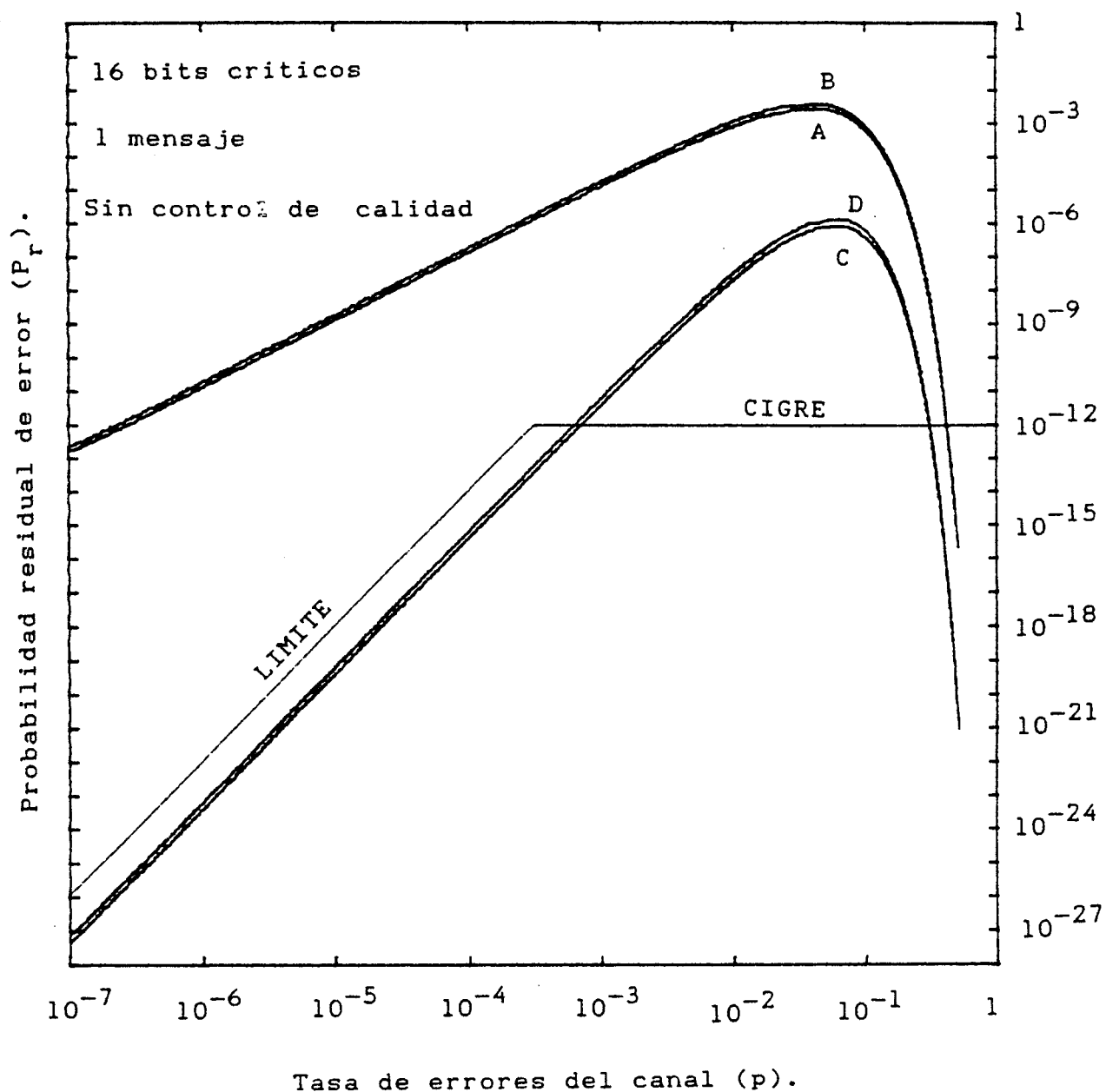
A.- Algoritmo 5 (CRC-32).

B.- Algoritmo 6 (CRC-16 + CRC-16).

C.- Algoritmo 7 (suma + paridad).

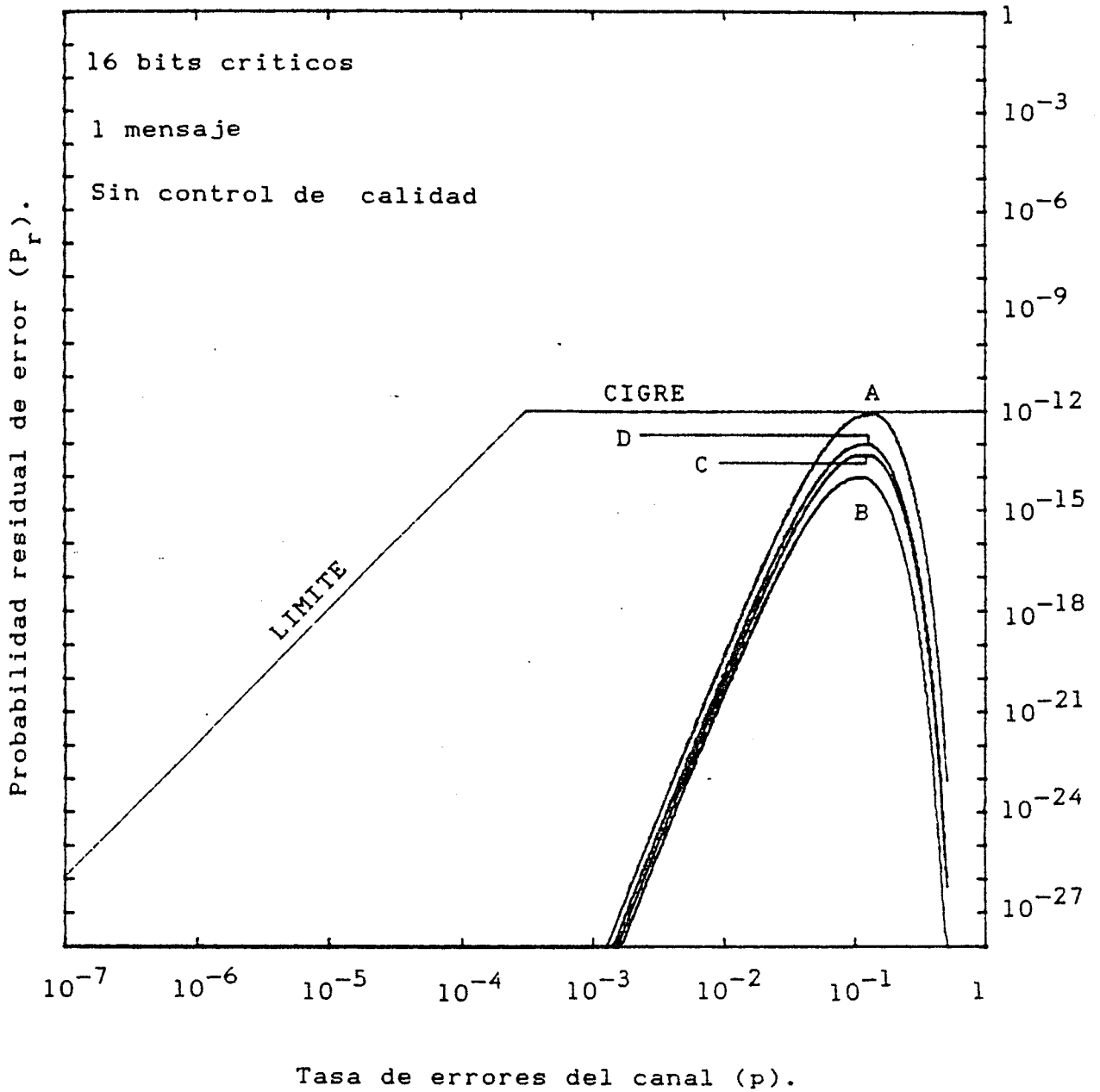
D.- Algoritmo 8 (suma + paridad + CRC-16).

Fig. 5.2.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 5 a 8.



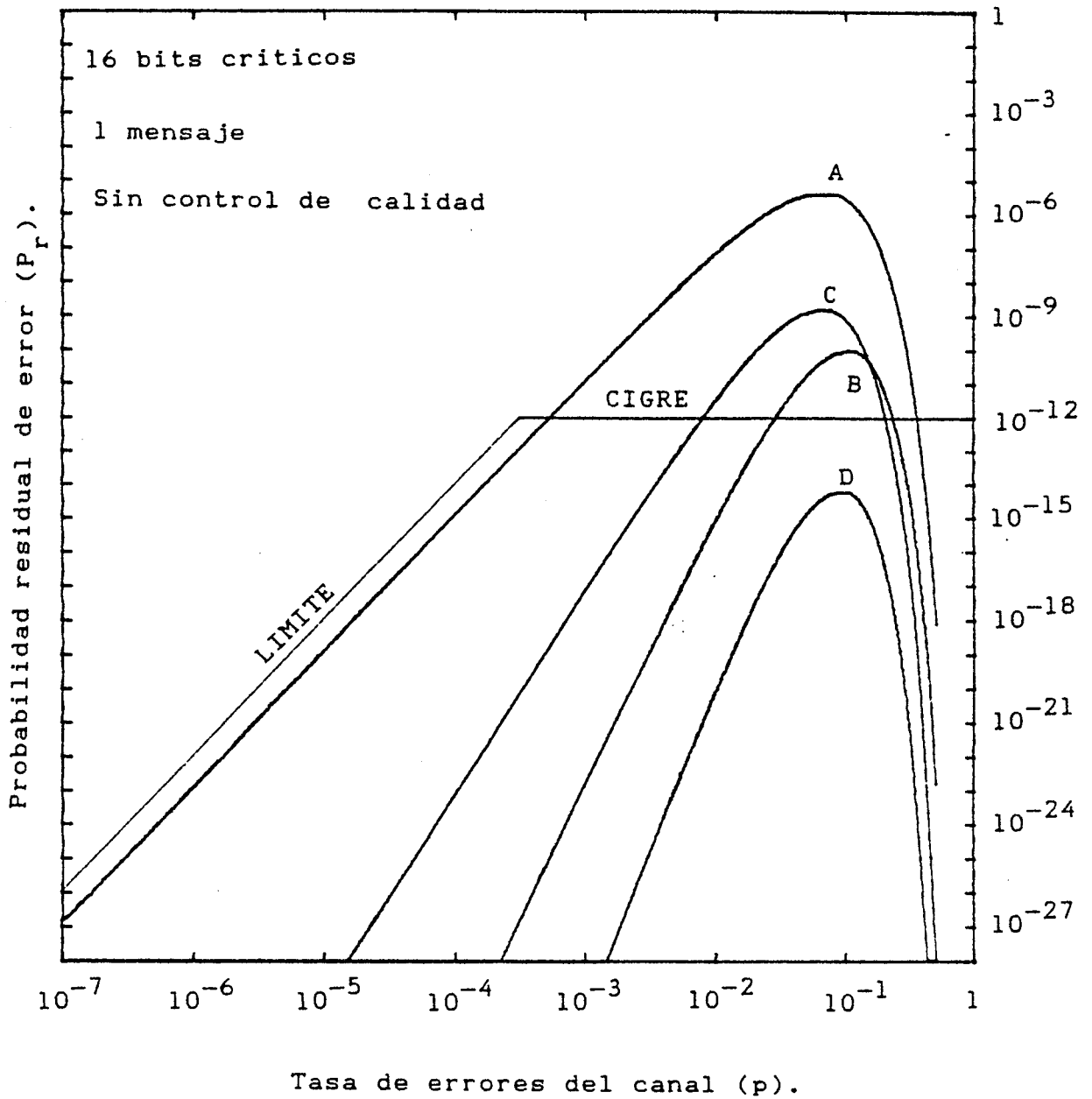
- A.- Algoritmo 9 (suma).
- B.- Algoritmo 10 (paridad).
- C.- Algoritmo 11 (suma + CRC-16).
- D.- Algoritmo 12 (paridad + CRC-16).

Fig. 5.3.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 9 a 12.



- A.- Algoritmo 13 (CRC-CCITT + CRC-16).
- B.- Algoritmo 14 (suma + paridad + CRC-CCITT + CRC-16).
- C.- Algoritmo 15 (suma + CRC-CCITT + CRC-16).
- D.- Algoritmo 16 (paridad + CRC-CCITT + CRC-16).

Fig. 5.4.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 13 a 16.



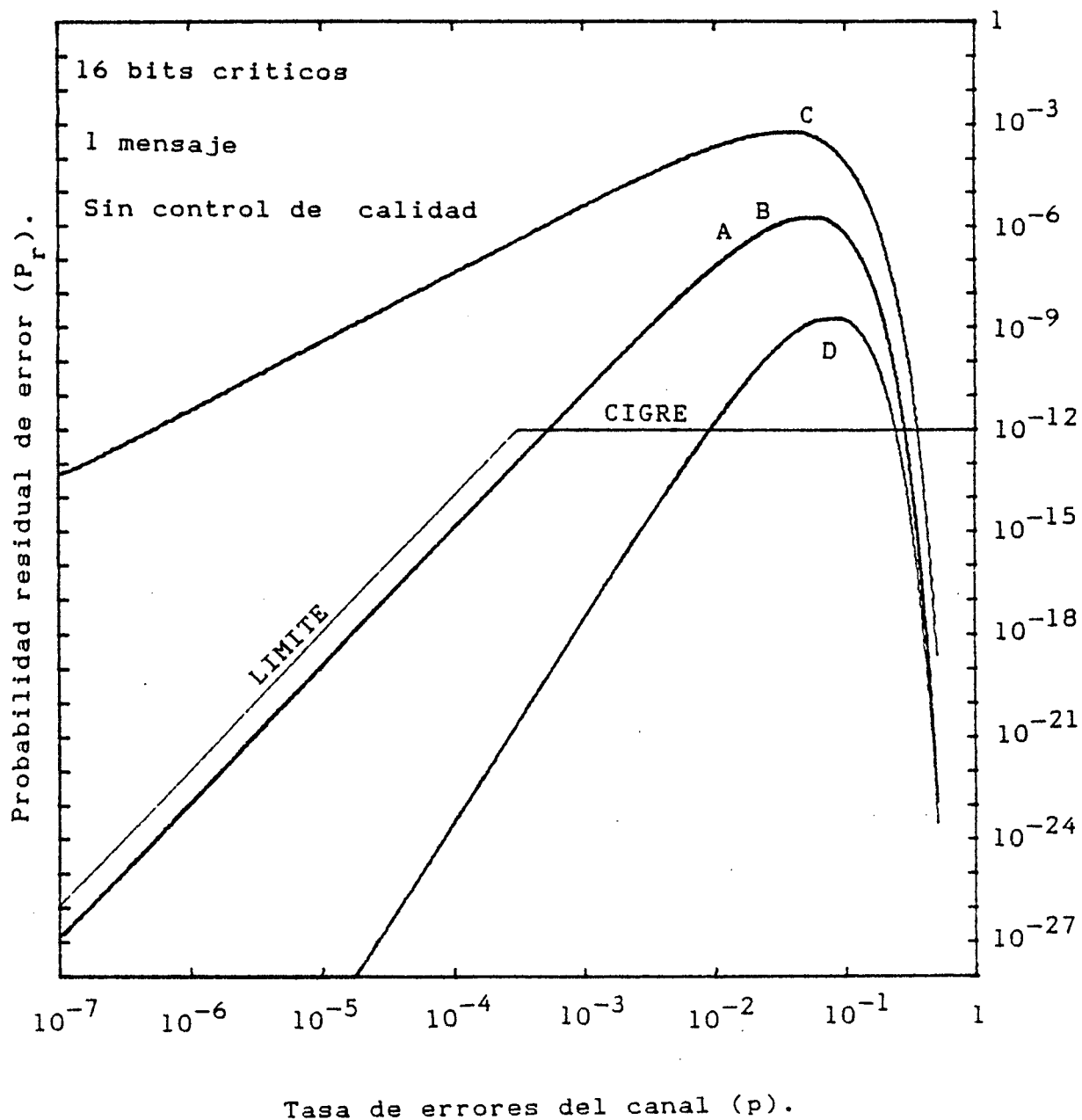
A.- Algoritmo 17 (CRC-CCITT).

B.- Algoritmo 18 (Repetición simple + CRC-CCITT).

C.- Algoritmo 19 (Repetición doble + CRC-CCITT).

D.- Algoritmo 20 (Repetición triple + CRC-CCITT).

Fig. 5.5.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 17 a 20.



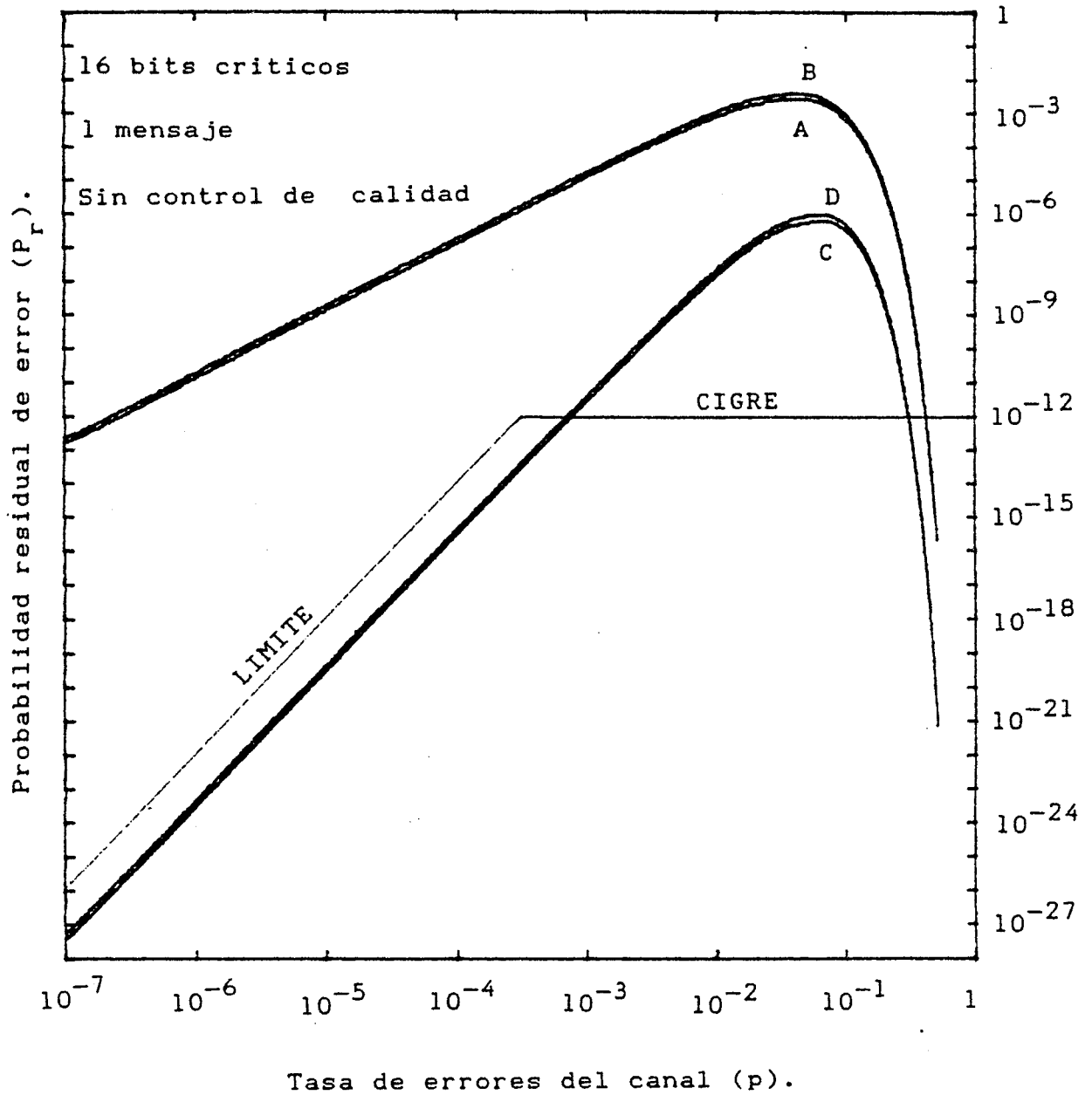
A.- Algoritmo 21 (CRC-32).

B.- Algoritmo 22 (CRC-CCITT + CRC-CCITT).

C.- Algoritmo 23 (suma + paridad).

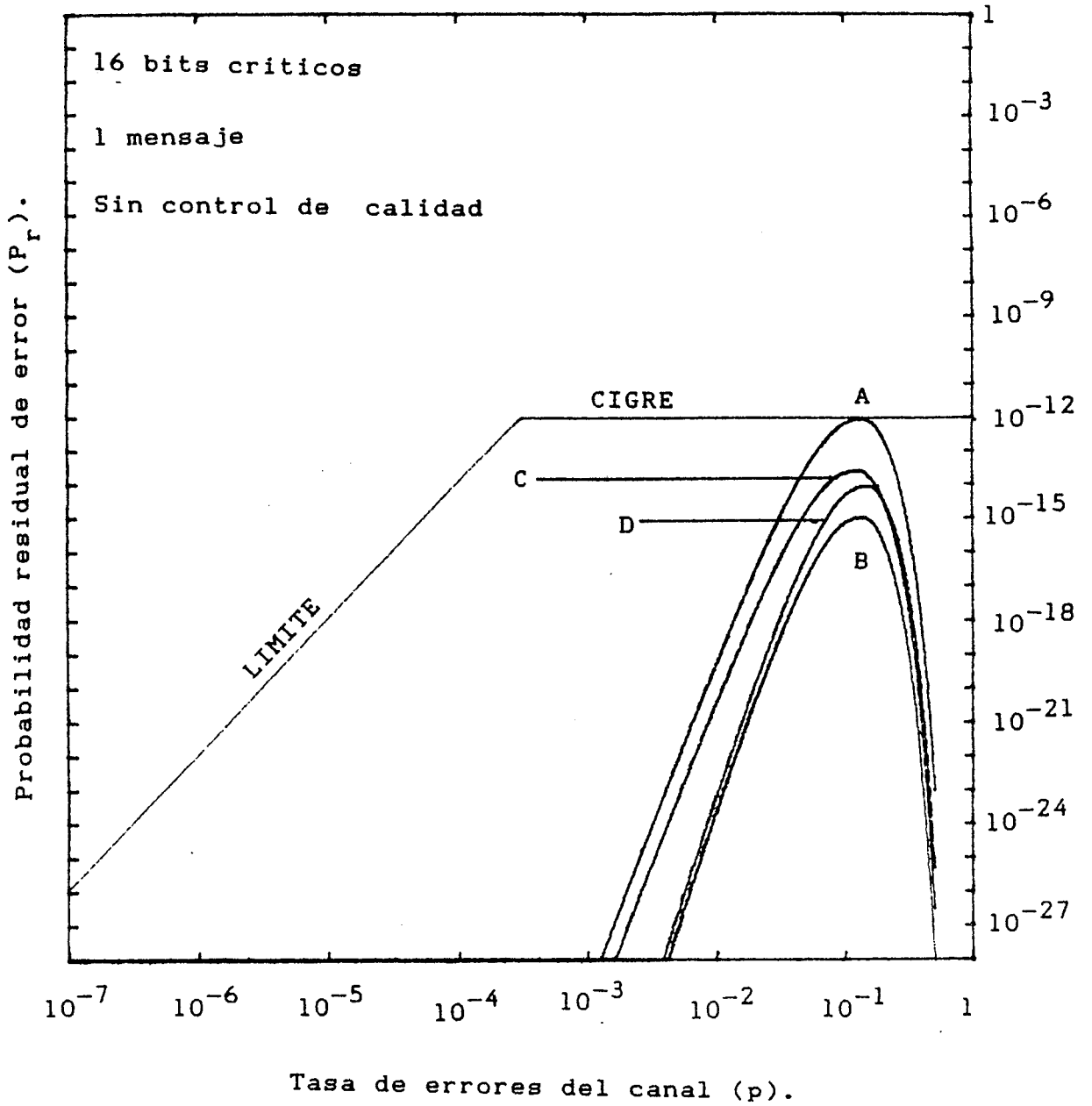
D.- Algoritmo 24 (suma + paridad + CRC-CCITT).

Fig. 5.6.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 21 a 24.



- A.- Algoritmo 25 (suma).
- B.- Algoritmo 26 (paridad).
- C.- Algoritmo 27 (suma + CRC-CCITT).
- D.- Algoritmo 28 (paridad + CRC-CCITT).

Fig. 5.7.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 25 a 28.



- A.- Algoritmo 29 (CRC-16 + CRC-CCITT).
- B.- Algoritmo 30 (suma + paridad + CRC-16 + CRC-CCITT).
- C.- Algoritmo 31 (suma + CRC-16 + CRC-CCITT).
- D.- Algoritmo 32 (paridad + CRC-16 + CRC-CCITT).

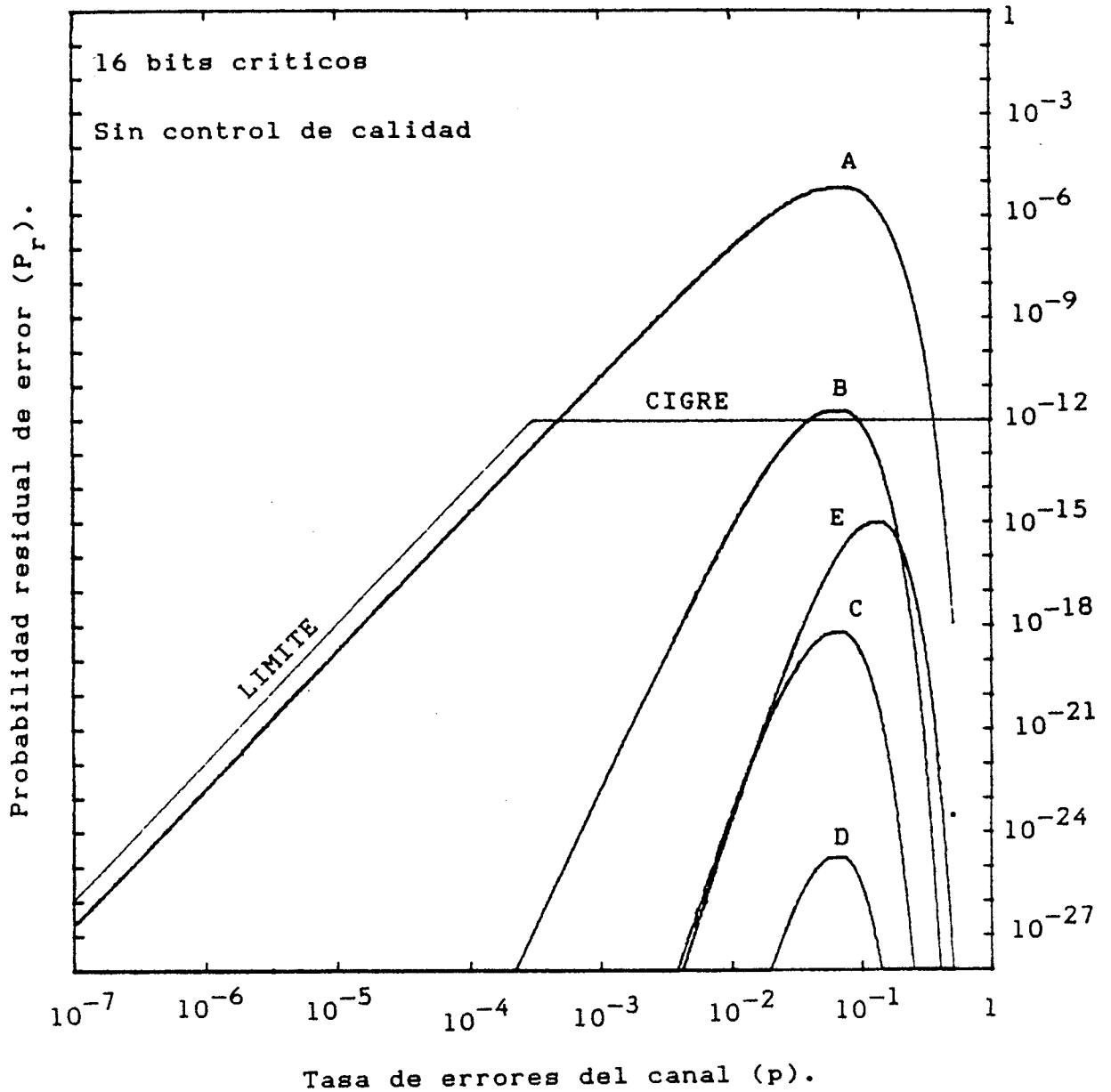
Fig. 5.8.- Probabilidad residual de error. Algoritmos 29 a 32.

ALGORITMO	NUMERO DE MENSAJES			
	1	2	3	4
1	4.53E-06	2.44E-12	1.35E-18	7.42E-25
2	1.82E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
3	5.07E-11	6.12E-22	7.57E-33	0.00E+00
4	2.05E-11	1.03E-22	5.23E-34	0.00E+00
5	1.57E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
6	1.59E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
7	5.04E-05	4.14E-10	3.44E-15	2.86E-20
8	5.07E-11	6.12E-22	7.57E-33	0.00E+00
9	1.50E-03	3.61E-07	8.83E-11	2.17E-14
10	1.97E-03	4.81E-07	1.18E-10	2.89E-14
11	1.82E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
12	1.82E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
13	2.04E-12	5.06E-25	1.27E-37	0.00E+00
14	1.09E-16	1.94E-33	0.00E+00	0.00E+00
15	2.74E-15	4.28E-30	0.00E+00	0.00E+00
16	2.74E-15	4.28E-30	0.00E+00	0.00E+00
17	4.44E-06	2.44E-12	1.35E-18	7.42E-25
18	1.81E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
19	4.31E-09	4.61E-18	4.95E-27	3.33E-36
20	4.11E-13	3.30E-26	0.00E+00	0.00E+00
21	1.57E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
22	1.57E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
23	5.04E-05	4.14E-10	3.44E-15	2.86E-20
24	4.31E-09	4.61E-18	4.95E-27	3.33E-36
25	1.50E-03	3.61E-07	8.83E-11	2.17E-14
26	1.97E-03	4.81E-07	1.18E-10	2.89E-14
27	1.81E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
28	1.81E-08	4.05E-17	9.11E-26	2.05E-34
29	2.22E-12	5.07E-25	1.27E-37	0.00E+00
30	4.21E-15	2.51E-30	0.00E+00	0.00E+00
31	1.12E-14	2.12E-29	0.00E+00	0.00E+00
32	1.12E-14	2.12E-29	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 5.3.- Maximos de P_r para distinto numero de mensajes ($k = 8$).

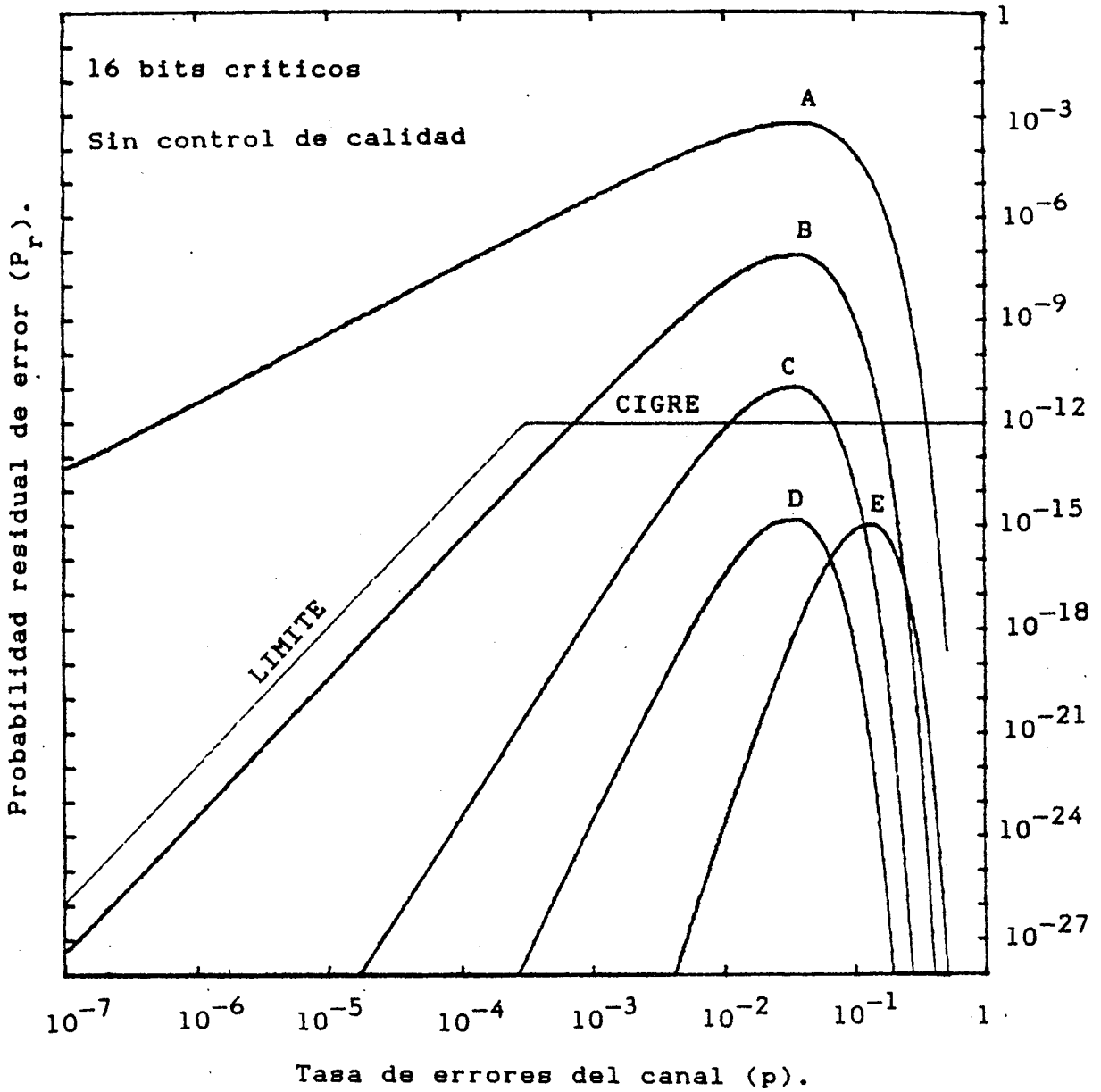
ALGORITMO	NUMERO DE MENSAJES			
	1	2	3	4
1	7.87E-06	2.42E-12	7.68E-19	2.44E-25
2	1.53E-06	1.93E-13	2.44E-20	1.48E-29
3	7.96E-12	8.46E-24	5.82E-36	0.00E+00
4	3.04E-14	6.98E-29	0.00E+00	0.00E+00
5	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
6	3.10E-06	3.85E-13	4.88E-20	2.95E-29
7	7.44E-04	9.33E-08	1.27E-11	1.73E-15
8	1.71E-09	9.27E-19	5.15E-28	0.00E+00
9	3.17E-03	5.45E-07	9.75E-11	1.74E-14
10	4.36E-03	7.69E-07	1.38E-10	2.46E-14
11	9.85E-07	1.91E-13	3.73E-20	7.29E-27
12	1.58E-06	3.05E-13	5.97E-20	1.17E-26
13	1.04E-12	7.93E-26	0.00E+00	0.00E+00
14	1.21E-14	1.37E-28	0.00E+00	0.00E+00
15	6.06E-14	1.73E-27	0.00E+00	0.00E+00
16	1.22E-13	3.47E-27	0.00E+00	0.00E+00
17	5.15E-06	1.61E-12	5.12E-19	1.63E-25
18	1.15E-10	5.67E-22	2.88E-33	0.00E+00
19	1.80E-09	3.20E-19	5.73E-29	0.00E+00
20	7.41E-15	1.61E-29	0.00E+00	0.00E+00
21	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
22	2.05E-06	2.57E-13	3.26E-20	1.97E-29
23	7.44E-04	9.33E-08	1.27E-11	1.73E-15
24	2.25E-09	1.24E-18	6.86E-28	1.14E-37
25	3.17E-03	5.45E-07	9.75E-11	1.74E-14
26	4.36E-03	7.69E-07	1.38E-10	2.46E-14
27	7.84E-07	1.53E-13	2.98E-20	5.83E-27
28	1.18E-06	2.29E-13	4.48E-20	8.75E-27
29	1.27E-12	8.61E-26	0.00E+00	0.00E+00
30	1.21E-15	2.30E-31	0.00E+00	0.00E+00
31	3.75E-14	8.70E-28	0.00E+00	0.00E+00
32	1.13E-14	6.12E-30	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 5.4.- Maximos de P_r para distinto numero de mensajes ($k = 16$).



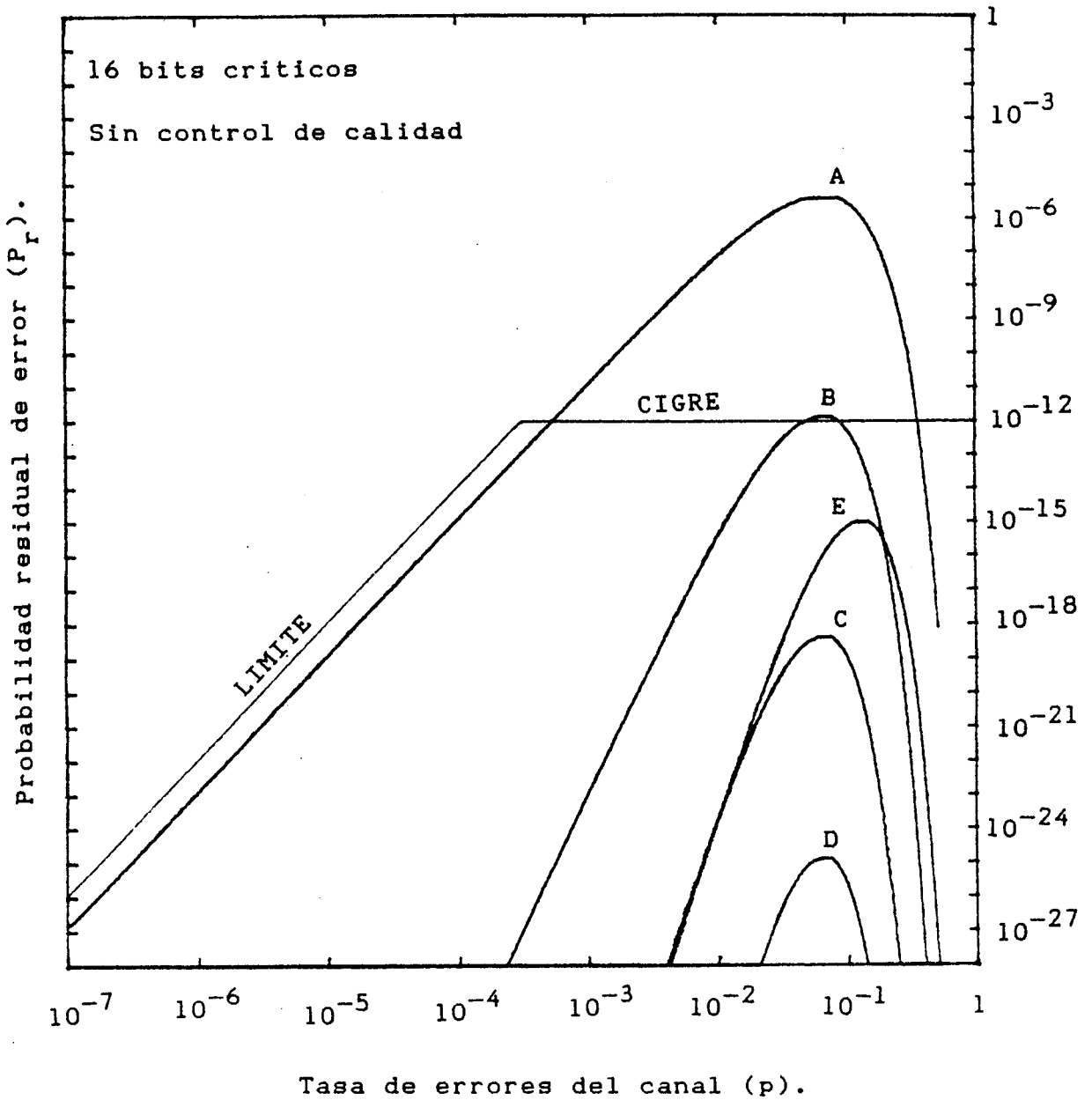
- A.- 1 mensaje.
- B.- 2 mensajes.
- C.- 3 mensajes.
- D.- 4 mensajes.
- E.- Algoritmo 30 con 1 mensaje.

Fig. 5.9.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 1 (CRC-16) con distinto numero de mensajes.



- A.- 1 mensaje.
- B.- 2 mensajes.
- C.- 3 mensajes.
- D.- 4 mensajes.
- E.- Algoritmo 30 con 1 mensaje.

Fig. 5.10.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 7 (suma + paridad) con distinto numero de mensajes.



- A.- 1 mensaje.
- B.- 2 mensajes.
- C.- 3 mensajes.
- D.- 4 mensajes.
- E.- Algoritmo 30 con 1 mensaje.

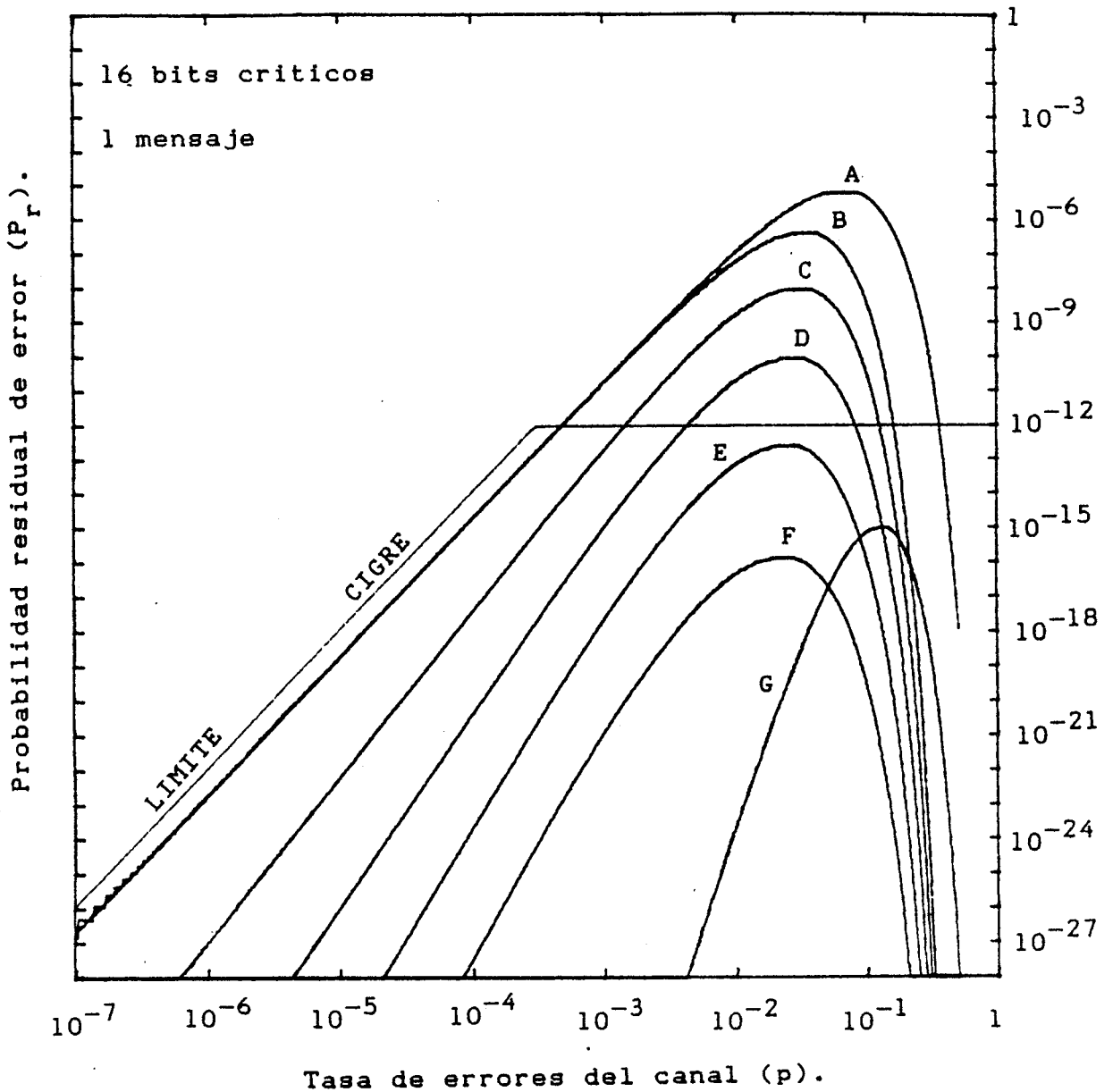
Fig. 5.11.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 17 (CRC-CCITT) con distinto numero de mensajes.

ALGORITMO	NO	CONTROL DE CALIDAD				
		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
1	4.53E-06	2.78E-07	8.14E-09	1.03E-10	4.40E-13	4.46E-16
2	1.82E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
3	5.07E-11	1.94E-13	6.87E-16	7.72E-19	2.08E-22	9.13E-27
4	2.05E-11	7.95E-14	2.02E-16	1.45E-19	2.10E-23	3.99E-28
5	1.57E-06	9.79E-08	1.90E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
6	1.59E-06	9.81E-08	1.91E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
7	5.04E-05	6.26E-06	3.11E-07	7.14E-09	5.85E-11	1.19E-13
8	5.07E-11	1.94E-13	6.87E-16	7.72E-19	2.08E-22	9.13E-27
9	1.50E-03	3.71E-04	4.05E-05	2.42E-06	6.37E-08	5.38E-10
10	1.97E-03	4.91E-04	5.39E-05	3.23E-06	8.49E-08	7.17E-10
11	1.82E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
12	1.82E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
13	2.04E-12	1.97E-15	4.03E-18	2.64E-21	4.29E-25	1.22E-29
14	1.09E-16	6.59E-21	2.33E-24	2.10E-28	3.59E-33	0.00E+00
15	2.74E-15	5.42E-19	4.46E-22	1.06E-25	5.45E-30	2.90E-35
16	2.74E-15	5.42E-19	4.46E-22	1.06E-25	5.45E-30	2.90E-35
17	4.44E-06	2.76E-07	8.12E-09	1.03E-10	4.40E-13	4.46E-16
18	1.81E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
19	4.31E-09	6.72E-11	4.92E-13	1.18E-15	6.84E-19	6.21E-23
20	4.11E-13	3.98E-16	5.43E-19	2.07E-22	1.64E-26	1.81E-31
21	1.57E-06	9.79E-08	1.90E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
22	1.57E-06	9.78E-08	1.90E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
23	5.04E-05	6.26E-06	3.11E-07	7.14E-09	5.85E-11	1.19E-13
24	4.31E-09	6.72E-11	4.92E-13	1.18E-15	6.84E-19	6.21E-23
25	1.50E-03	3.71E-04	4.05E-05	2.42E-06	6.37E-08	5.38E-10
26	1.97E-03	4.91E-04	5.39E-05	3.23E-06	8.49E-08	7.17E-10
27	1.81E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
28	1.81E-08	2.82E-10	2.74E-12	9.71E-15	9.63E-18	1.86E-21
29	2.22E-12	2.01E-15	4.09E-18	2.67E-21	4.32E-25	1.23E-29
30	4.21E-15	1.02E-18	5.60E-22	7.58E-26	1.85E-30	1.83E-36
31	1.12E-14	2.56E-18	2.15E-21	5.15E-25	2.68E-29	1.41E-34
32	1.12E-14	2.56E-18	2.15E-21	5.15E-25	2.68E-29	1.41E-34

Tabla 5.5.- Maximos de P_r con control de calidad ($k = 8$).

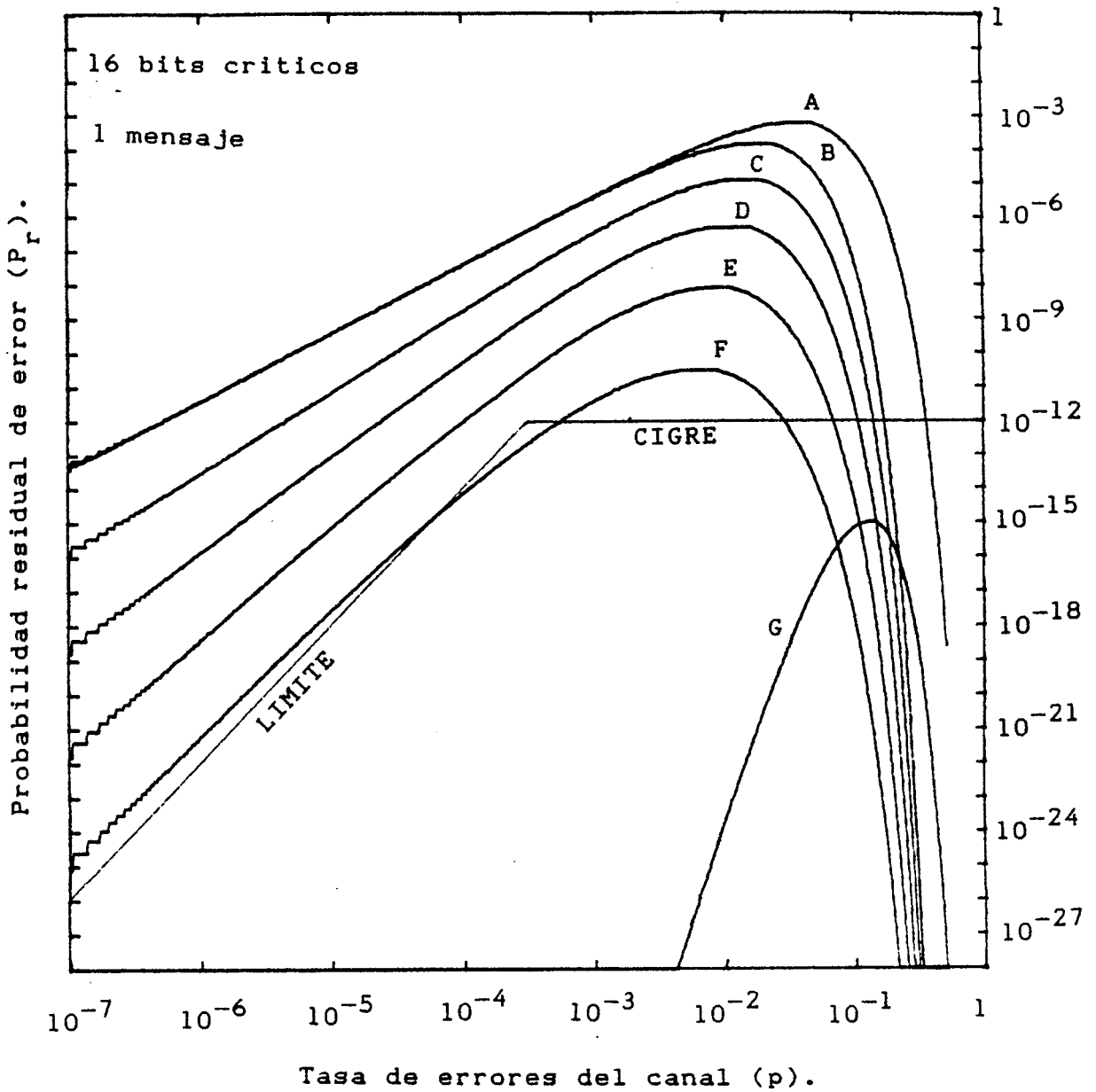
ALGORITMO	NO	CONTROL DE CALIDAD				
		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
1	7.87E-06	4.80E-07	1.13E-08	1.05E-10	2.91E-13	1.59E-16
2	1.53E-06	9.51E-08	1.56E-09	8.63E-12	1.13E-14	2.05E-18
3	7.96E-12	3.03E-14	4.29E-17	1.38E-20	6.64E-25	1.02E-33
4	3.04E-14	2.95E-17	1.07E-20	6.78E-25	2.80E-33	0.00E+00
5	2.05E-06	1.27E-07	2.08E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
6	3.10E-06	1.91E-07	3.11E-09	1.73E-11	2.25E-14	4.11E-18
7	7.44E-04	1.78E-04	1.50E-05	6.24E-07	9.74E-09	3.77E-11
8	1.71E-09	2.62E-11	1.48E-13	2.50E-16	8.80E-20	3.97E-24
9	3.17E-03	7.74E-04	7.39E-05	3.66E-06	7.30E-08	4.08E-10
10	4.36E-03	1.08E-03	1.04E-04	5.15E-06	1.03E-07	5.76E-10
11	9.85E-07	6.12E-08	1.19E-09	8.46E-12	1.58E-14	4.87E-18
12	1.58E-06	9.79E-08	1.90E-09	1.35E-11	2.53E-14	7.79E-18
13	1.04E-12	9.65E-16	1.31E-18	5.00E-22	3.95E-26	4.34E-31
14	1.21E-14	1.15E-17	7.71E-21	1.12E-24	3.49E-31	5.98E-37
15	6.06E-14	5.79E-17	5.45E-20	1.26E-23	5.11E-28	1.27E-34
16	1.22E-13	1.16E-16	1.09E-19	2.53E-23	1.02E-27	2.54E-34
17	5.15E-06	3.19E-07	7.52E-09	7.02E-11	1.94E-13	1.06E-16
18	1.15E-10	4.40E-13	1.11E-15	7.97E-19	1.16E-22	2.20E-27
19	1.80E-09	2.80E-11	1.02E-13	9.19E-17	1.34E-20	3.45E-31
20	7.41E-15	6.90E-18	2.49E-21	1.91E-28	6.67E-34	0.00E+00
21	2.05E-06	1.27E-07	2.08E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
22	2.05E-06	1.27E-07	2.07E-09	1.15E-11	1.50E-14	2.74E-18
23	7.44E-04	1.78E-04	1.50E-05	6.24E-07	9.74E-09	3.77E-11
24	2.25E-09	3.48E-11	1.97E-13	3.33E-16	1.17E-19	5.29E-24
25	3.17E-03	7.74E-04	7.39E-05	3.66E-06	7.30E-08	4.08E-10
26	4.36E-03	1.08E-03	1.04E-04	5.15E-06	1.03E-07	5.76E-10
27	7.84E-07	4.89E-08	9.52E-10	6.77E-12	1.26E-14	3.89E-18
28	1.18E-06	7.34E-08	1.43E-09	1.01E-11	1.90E-14	5.84E-18
29	1.27E-12	1.08E-15	1.45E-18	5.47E-22	4.31E-26	4.72E-31
30	1.21E-15	2.89E-19	1.05E-22	8.33E-27	1.19E-32	0.00E+00
31	3.75E-14	3.06E-17	2.81E-20	6.42E-24	2.58E-28	6.71E-35
32	1.13E-14	2.55E-18	1.38E-21	1.86E-25	4.53E-30	4.52E-36

Tabla 5.6.- Maximos de P_r con control de calidad ($k = 16$).



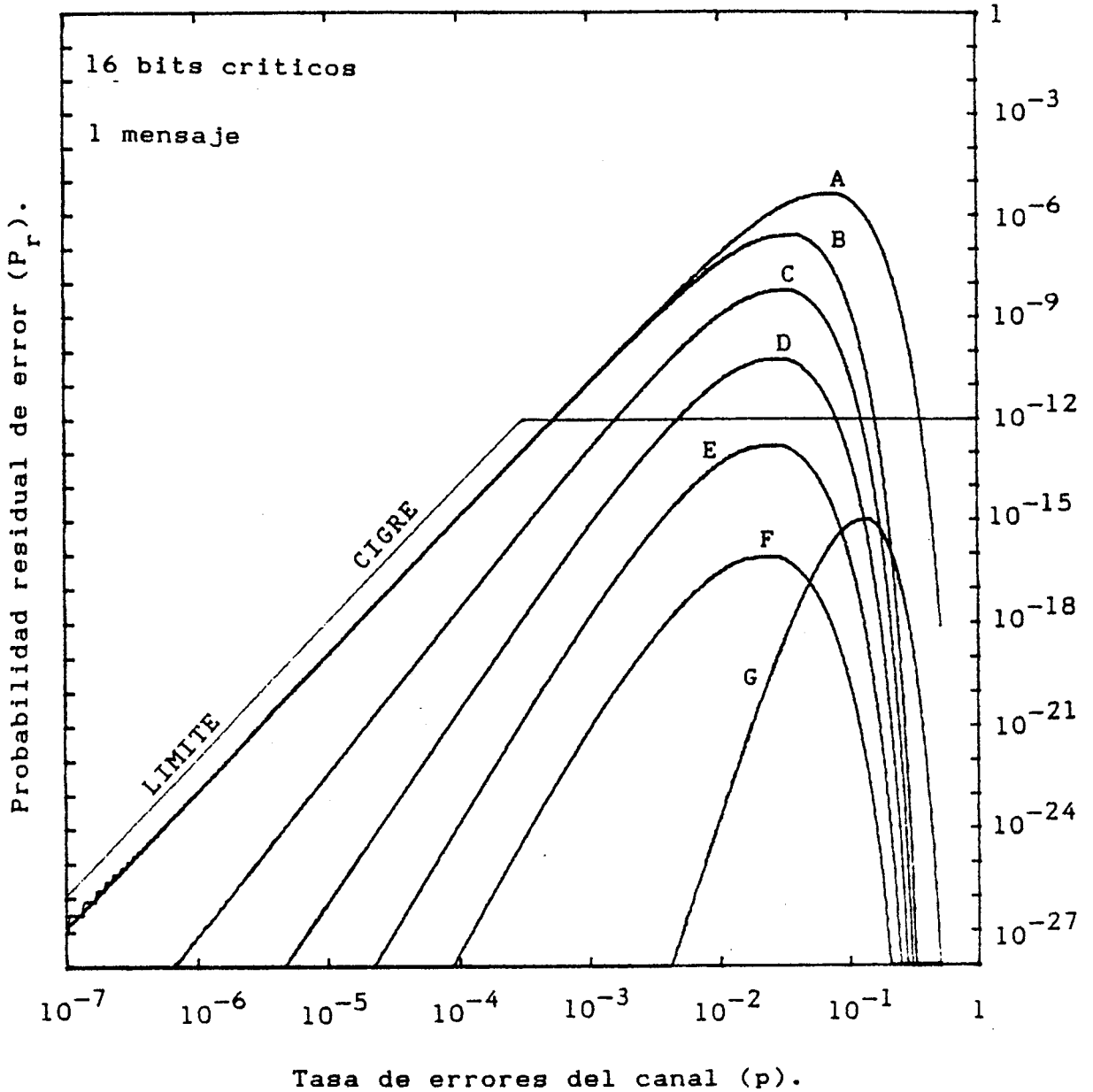
- A.- Sin control de calidad.
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.9$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.7$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- G.- Algoritmo 30 sin control de calidad.

Fig. 5.12.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 1 (CRC-16) con control de calidad.



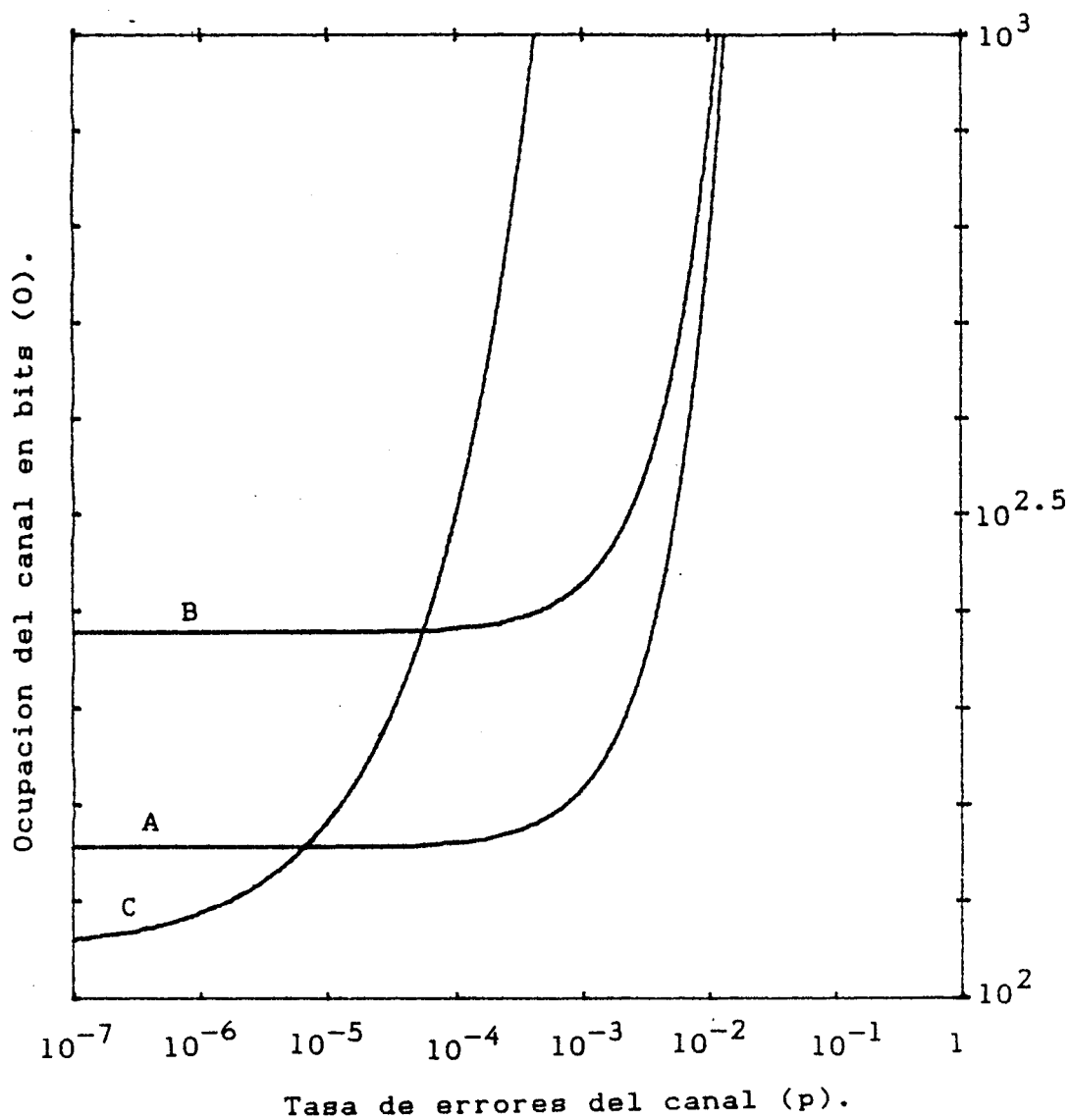
- A.- Sin control de calidad.
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.9$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.7$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- G.- Algoritmo 30 sin control de calidad.

Fig. 5.13.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 7 (suma + paridad) con control de calidad.



- A.- Sin control de calidad.
- B.- Control de calidad con $\delta = 1$
- C.- Control de calidad con $\delta = 0.9$
- D.- Control de calidad con $\delta = 0.8$
- E.- Control de calidad con $\delta = 0.7$
- F.- Control de calidad con $\delta = 0.6$
- G.- Algoritmo 30 sin control de calidad.

Fig. 5.14.- Probabilidad residual de error para el algoritmo 17 (CRC-CCITT) con control de calidad.

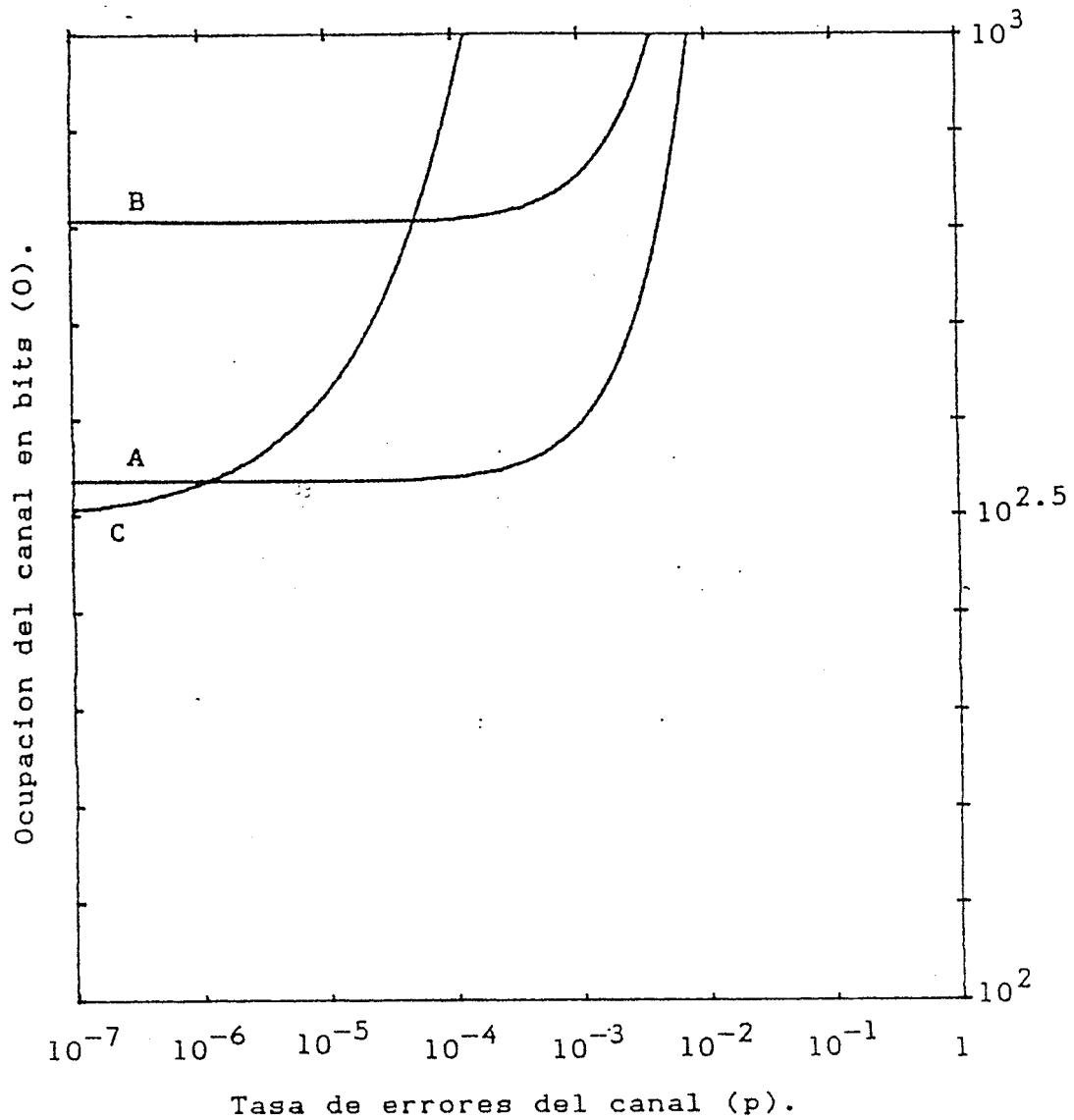


A.- Metodo 1 (adicion de bits redundantes).

B.- Metodo 2 (repeticion de mensajes).

C.- Metodo 3 (control de calidad).

Fig. 5.15.- Ocupacion del canal para distintos metodos de transmision de ordenes ($W = 0$).



- A.- Metodo 1 (adicion de bits redundantes).
 B.- Metodo 2 (repeticion de mensajes).
 C.- Metodo 3 (control de calidad).

Fig. 5.16.- Ocupacion del canal para distintos metodos de transmision de ordenes ($W = 100$).

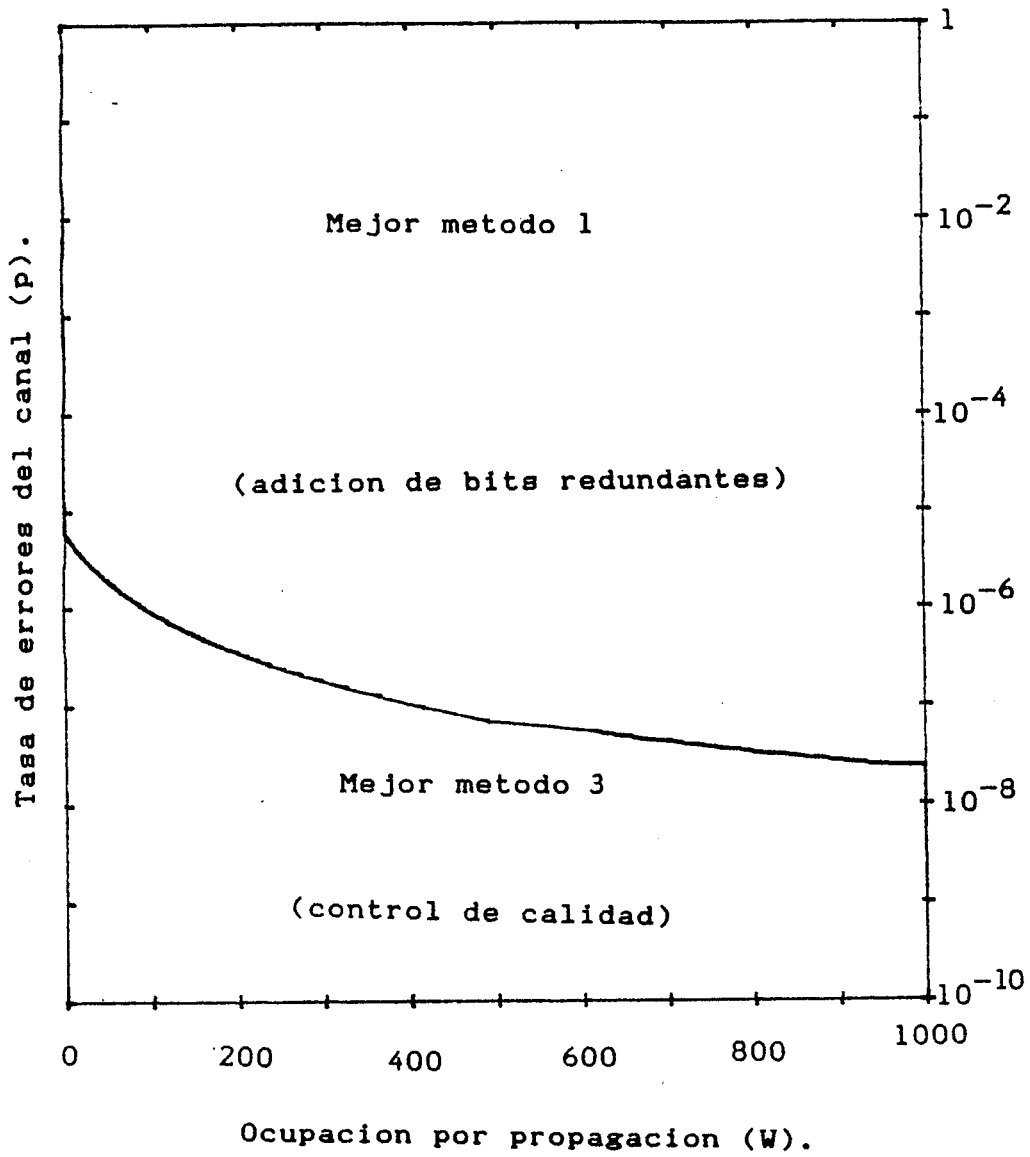


Fig. 5.17.- Comparacion de metodos de transmision de ordenes.

APENDICE C

PROGRAMAS REALIZADOS.

Para el desarrollo de la presente Tesis ha sido necesaria la construccion de una serie de programas y rutinas que fuesen capaces de simular el comportamiento de la transmision de ordenes y tratar los datos reales obtenidos de la transmision de medidas. Ello ha supuesto un volumen considerable que podemos estimarlo superior a 5.000 lineas de lenguaje de alto nivel (FORTRAN IV). Todo ello se desarrollo en un PDP- 11/34 bajo RSX-11M y usando en gran medida rutinas cientificas de la IMSL. A continuacion, y dado el ya mencionado volumen, se adjuntan por orden alfabetico algunos de los programas y rutinas mas interesantes y que inciden en los siguientes aspectos:

- Estimacion y prediccion recursiva de medidas.
- Distribucion optima del protocolo de medidas.
- Calculo del CRC.
- Calculo del efecto del control de calidad.
- Calculo de la probabilidad residual de error.
- Etc.

SY:CALMAX.FTN

20:39:32

01-APR-86

PAG. 1

```

0001      SUBROUTINE CALMAX(CONTA,MINCON,MAXCON,NB,DELTA,CONCAL,TIPOAL,KB,NMO,
0002      *PRMAX)
0003      C
0004      C*****
0005      C
0006      C
0007      C      RUTINA PARA EL CALCULO DEL MAXIMO DE PR
0008      C
0009      C
0010      C*****
0011      C
0012      IMPLICIT INTEGER(A-Z)
0013      REAL PB,P,Q,DELTA,PR,ABS,DELT,PRMAX,PRANT,PBANT
0014      INTEGER CONTA(1)
0015      C
0016      C
0017      C
0018      11      PB=0.5
0019      DELT=-0.1
0020      PR=0.
0021      14      PRMAX=PR
0022      CALL FUNC1(PR,PB,CONTA,MINCON,MAXCON,NB,DELTA,CONCAL,NMO)
0023      IF(PR.LT.PRMAX) GO TO 13
0024      PBANT=PB
0025      PRANT=PR
0026      PB=PB+DELT
0027      IF(PB.GT.1.0E-7) GO TO 14
0028      PR=0.
0029      GO TO 16
0030      13      IF(ABS(DELT/PB).LE.1.0E-4) GO TO 15
0031      16      IF(PRMAX.EQ.0) GO TO 15
0032      PBANT=PB
0033      PRANT=PR
0034      PRMAX=0
0035      PR=0
0036      PB=PB-2*DELT
0037      DELT=DELT/10.0
0038      GO TO 14
0039      15      PRMAX=PRANT
0040      RETURN
0041      END

```

```

0001          SUBROUTINE CRC(BUF,NCAR,K,POLINO)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C          RUTINA PARA EL CALCULO DEL CRC
0007 C
0008 C
0009 C*****
0010 C
0011          IMPLICIT INTEGER(A-Z)
0012          BYTE BUF(1),CCRB(2)
0013          EQUIVALENCE(CCR,CCRB)
0014 C
0015 C
0016 C
0017          CCR="177777
0018          DO 10 I=1,NCAR
0019              CAR=BUF(I)
0020              CAR=CAR.AND."377
0021              CCR=IEOR(CCR,CAR)
0022              DO 15 J=1,8
0023                  FLAG=0
0024                  IF( (CCR.AND.1) .EQ.0) GO TO 11
0025                  FLAG=1
0026 11          CCR=ISHFT(CCR,-1)
0027                  IF(FLAG.EQ.0) GO TO 15
0028                  CCR=IEOR(CCR,POLINO)
0029 15          CONTINUE
0030 10          CONTINUE
0031          BUF(NCAR+1+K)=CCRB(1)
0032          BUF(NCAR+2+K)=CCRB(2)
0033          RETURN
0034          END

```

```

0001      PROGRAM DISOPT
0002  C
0003  C*****
0004  C
0005  C
0006  C      PROGRAMA PARA CALCULAR LA DISTRIBUCION OPTIMA
0007  C
0008  C      DE LOS BITS DE CONTROL EN EL PROTOCOLO
0009  C
0010  C
0011  C*****
0012  C
0013      REAL PB(10),PBG(8),LMIN
0014      INTEGER TI(8),NBG(8),NB(10),TM(8)
0015      DATA NB/0,2,3,4,5,6,7,8,9,16/
0016  C
0017  C
0018  C
0019      CALL ASNLUN(2,'TI',0)
0020      CALL ASNLUN(3,'UL',0)
0021      WRITE(2,900)
0022  900  FORMAT(' DIFERENCIAS EN TANTO POR UNO ? ')
0023      READ(2,901,END=1000)(PB(I),I=1,10)
0024  901  FORMAT(F10.0)
0025      WRITE(3,906)(100*PB(I),I=1,10)
0026  906  FORMAT('1','DISTRIBUCION DE DIFERENCIAS',/,10(F6.2,'%')//)
0027      CALL CONT2(PB,PBG,TM,TI,NBG,NB,LMIN)
0028      OCUP=IFIX(2.*LMIN+1.)/32.*100.
0029      WRITE(3,903)LMIN,(TM(I),I=1,2),OCUP
0030  903  FORMAT(' EL MINIMO PARA ZONA DE CONTROL CON 1 BIT ES : ',F6.4/
0031      *      ' CON LA SIGUIENTE DISTRIBUCION : ',2I4/
0032      *      ' OCUPACION RELATIVA DEL CANAL : ',F6.2,'%')
0033  C
0034      CALL CONT4(PB,PBG,TM,TI,NBG,NB,LMIN)
0035      OCUP=IFIX(2.*LMIN+1.)/32.*100.
0036      WRITE(3,904)LMIN,(TM(I),I=1,4),OCUP
0037  904  FORMAT('// ' EL MINIMO PARA ZONA DE CONTROL CON 2 BITS ES : ',F6.4/
0038      *      ' CON LA SIGUIENTE DISTRIBUCION : ',4I4/
0039      *      ' OCUPACION RELATIVA DEL CANAL : ',F6.2,'%')
0040  C
0041      CALL CONT8(PB,PBG,TM,TI,NBG,NB,LMIN)
0042      OCUP=IFIX(2.*LMIN+1.)/32.*100.
0043      WRITE(3,905)LMIN,(TM(I),I=1,8),OCUP
0044  905  FORMAT('// ' EL MINIMO PARA ZONA DE CONTROL CON 3 BITS ES : ',F6.4/
0045      *      ' CON LA SIGUIENTE DISTRIBUCION : ',8I4/
0046      *      ' OCUPACION RELATIVA DEL CANAL : ',F6.2,'%')
0047  1000 CALL EXIT
0048      END
0049      SUBROUTINE CONT2(PB,PBG,TM,TI,NBG,NB,LMIN)
0050  C
0051  C*****
0052  C
0053  C
0054  C      RUTINA PARA ZONA DE CONTROL DE UN BIT
0055  C
0056  C

```

```

0057 C*****
0058 C
0059     REAL PB(1),PBG(1),LMIN
0060     INTEGER TM(10),TI(1),NBG(1),NB(1),SUMA
0061 C
0062 C
0063 C
0064     K=1
0065     N=2
0066     LMIN=100
0067     NMAX=10-N+1
0068     DO 10 I1=1,NMAX
0069         TI(1)=I1
0070         SUMA=0.
0071         DO 11 J=1,N-1
0072             SUMA=SUMA+TI(J)
0073 11     CONTINUE
0074         IF(SUMA.GT.9) GO TO 10
0075         TI(N)=10-SUMA
0076         CALL AUXIL(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN, N, K)
0077 10     CONTINUE
0078     RETURN
0079     END
0080     SUBROUTINE CONT4(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN)
0081 C
0082 C*****
0083 C
0084 C
0085 C     RUTINA PARA ZONA DE CONTROL DE DOS BITS
0086 C
0087 C
0088 C*****
0089 C
0090     REAL PB(1),PBG(1),LMIN
0091     INTEGER TM(10),TI(1),NBG(1),NB(1),SUMA
0092 C
0093 C
0094 C
0095     K=2
0096     N=4
0097     LMIN=100
0098     NMAX=10-N+1
0099     DO 10 I1=1,NMAX
0100         DO 10 I2=1,NMAX
0101             DO 10 I3=1,NMAX
0102                 TI(1)=I1
0103                 TI(2)=I2
0104                 TI(3)=I3
0105                 SUMA=0.
0106                 DO 11 J=1,N-1
0107                     SUMA=SUMA+TI(J)
0108 11     CONTINUE
0109                 IF(SUMA.GT.9) GO TO 10
0110                 TI(N)=10-SUMA
0111                 CALL AUXIL(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN, N, K)
0112 10     CONTINUE

```


SY:DISOPT.FTN

20:48:06

01-APR-86

PAG. 3

```

0113      RETURN
0114      END
0115      SUBROUTINE CONT8(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN)
0116 C
0117 C*****
0118 C
0119 C
0120 C      RUTINA PARA ZONA DE CONTROL DE TRES BITS
0121 C
0122 C
0123 C*****
0124 C
0125      REAL PB(1),PBG(1), LMIN
0126      INTEGER TM(10),TI(1),NBG(1),NB(1),SUMA
0127 C
0128 C
0129 C
0130      K=3
0131      N=8
0132      LMIN=100
0133      NMAX=10-N+1
0134      DO 10 I1=1,NMAX
0135      DO 10 I2=1,NMAX
0136      DO 10 I3=1,NMAX
0137      DO 10 I4=1,NMAX
0138      DO 10 I5=1,NMAX
0139      DO 10 I6=1,NMAX
0140      DO 10 I7=1,NMAX
0141          TI(1)=I1
0142          TI(2)=I2
0143          TI(3)=I3
0144          TI(4)=I4
0145          TI(5)=I5
0146          TI(6)=I6
0147          TI(7)=I7
0148          SUMA=0.
0149          DO 11 J=1,N-1
0150              SUMA=SUMA+TI(J)
0151 11      CONTINUE
0152          IF(SUMA.GT.9) GO TO 10
0153          TI(N)=10-SUMA
0154          CALL AUXIL(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN, N, K)
0155 10      CONTINUE
0156      RETURN
0157      END
0158      SUBROUTINE AUXIL(PB,PBG, TM, TI, NBG, NB, LMIN, N, K)
0159 C
0160 C*****
0161 C
0162 C
0163 C      RUTINA AUXILIAR PARA EL CALCULO
0164 C
0165 C
0166 C*****
0167 C
0168      REAL PB(1),PBG(1), LMIN, L

```

```
0169      INTEGER TM(1),TI(1),NBG(1),NB(1),SUMA
0170 C
0171 C
0172 C
0173      SUMA=0
0174      DO 10 I=1,N
0175          SUMA=SUMA+TI(I)
0176          NBG(I)=NB(SUMA)
0177          PBG(I)=0
0178          DO 11 J=SUMA-TI(I)+1,SUMA
0179              PBG(I)=PBG(I)+PB(J)
0180 11      CONTINUE
0181 10      CONTINUE
0182          L=K
0183          DO 12 I=1,N
0184              L=L+PBG(I)*NBG(I)
0185 12      CONTINUE
0186          IF(L.GT.LMIN) RETURN
0187          LMIN=L
0188          DO 13 I=1,N
0189              TM(I)=TI(I)
0190 13      CONTINUE
0191          RETURN
0192          END
```

SY:EFCOCA.FTN

20:38:40

01-APR-86

PAG. 1

```
0001          SUBROUTINE EFCOCA(PB,P,Q,DELTA,CONCAL)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C          RUTINA PARA CALCULAR EL EFECTO DEL CONTROL DE LA
0007 C
0008 C          CALIDAD DE LA SENAL SOBRE LA PROBABILIDAD APARENTE
0009 C
0010 C          DE ERROR DEL CANAL
0011 C
0012 C
0013 C*****
0014 C
0015          IMPLICIT INTEGER(A-Z)
0016          REAL PB,P,Q,DELTA,ERFC,T
0017 C
0018 C
0019 C
0020          IF(CONCAL.EQ.1) GO TO 10
0021          P=PB
0022          Q=1.-PB
0023          RETURN
0024 C
0025 10          CALL MERFCI(2*PB,T,ERROR)
0026          P=0.5*ERFC( (2.-DELTA)*T )-0.5*ERFC( (2.+DELTA)*T )
0027          Q=1.-ERFC(DELTA*T)
0028          RETURN
0029          END
```

SY:ESTREC.FTN

20:42:27

01-APR-86

PAG. 1

```

0001          SUBROUTINE ESTREC(NSE,NTAR,NMED,X,LX,Y,IAR,XMED)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C          RUTINA PARA ESTIMACION RECURSIVA DE LOS PARAMETROS DE UN
0007 C
0008 C          MODELO AUTOREGRESIVO
0009 C
0010 C
0011 C*****
0012 C
0013          REAL X(1),Y(1),P(100),SCHI(10),TETA(10)
0014 C
0015 C
0016 C
0017          IF(LX.LE.0) RETURN
0018          CALL PREST(P,SCHI,TETA,IAR,GA,A,NN,SUM,GTP,WNV,UK,FCV)
0019          DO 10 I=1,LX
0020              YK=X(I)-XMED
0021              CALL IDELSQ(P,SCHI,TETA,YK,UK,IAR,GA,A,NN,YE,SUM,
0022                  *          GTP,TRAZA,WNV,FCV)
0023 10          CONTINUE
0024          WRITE(3,900)NSE,NTAR,NMED,XMED,WNV,(TETA(I),I=1,IAR)
0025 900          FORMAT(3I7,' MED VAR : ',2F10.3,3X,' PARAMETROS : ',5F10.3)
0026          RETURN
0027          END

```

SY:EXPO.FTN

20:40:31

01-APR-86

PAG. 1

```

0001          PROGRAM EXPO
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C          RUTINA PARA CALCULAR EL EXPONENTE AL QUE PERTENECE
0007 C
0008 C          UN POLINOMIO
0009 C
0010 C
0011 C*****
0012 C
0013          IMPLICIT INTEGER(A-Z)
0014          INTEGER*4 NM,PRIMER,NI,I
0015          INTEGER R(40),G(40)
0016          DATA GRADO/16/,NR/17/
0017          DATA G/1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,23*0/
0018 C
0019 C
0020          CALL ASNLUN(1,'TI',0)
0021          GO TO 1234
0022 100      WRITE(1,902)
0023 902      FORMAT(' GRADO DEL POLINOMIO GENERADOR ? ',§)
0024          READ(1,903,END=200)GRADO
0025 903      FORMAT(I7)
0026          NR=GRADO+1
0027          WRITE(1,904)
0028 904      FORMAT(' COEFICIENTES DE G POR ORDEN CRECIENTE DE GRADO ? ')
0029          READ(1,905,END=200)(G(I),I=1,NR)
0030 905      FORMAT(40I1)
0031 1234     CONTINUE
0032          WRITE(1,907)
0033 907      FORMAT(' PRIMER EXPONENTE A PROBAR ? ',§)
0034          READ(1,908,END=200)PRIMER
0035 908      FORMAT(I7)
0036          PRIMER=PRIMER+1
0037          IF(PRIMER.LE.NR) PRIMER=NR
0038          DO 11 NM=PRIMER,65536
0039              WRITE(3,999)NM-1
0040 999      FORMAT(I8)
0041              NI=NM-NR+1
0042              DO 20 J=1,NR
0043                  R(J)=0
0044 20      CONTINUE
0045              R(NR-1)=1
0046              DO 10 I=1,NI
0047                  DO 21 J=NR,2,-1
0048                      R(J)=R(J-1)
0049 21      CONTINUE
0050              R(1)=0
0051              IF(I.EQ.NI) R(1)=1
0052              IF(R(NR).EQ.0) GO TO 10
0053              DO 22 J=1,NR
0054                  R(J)=IEOR(R(J),G(J))
0055 22      CONTINUE
0056 10      CONTINUE

```

SY:EXPO.FTN

20:40:31

01-APR-86

PAG. 2

```
0057          DO 23 J=1,NR
0058             IF(R(J).NE.0) GO TO 11
0059 23        CONTINUE
0060             GO TO 12
0061 11        CONTINUE
0062          WRITE(1,900)
0063 900       FORMAT(' NO SE ENCONTRO EXPONENTE')
0064             GO TO 100
0065 12        WRITE(1,901)NM-1
0066 901       FORMAT(' EL EXPONENTE ES ',I7)
0067          WRITE(1,906)(G(I),I=1,GRADO+1)
0068 906       FORMAT(' PARA G = ',40I1)
0069             GO TO 100
0070 200       CALL EXIT
0071          END
```

SY:FUNCI.FTN

20:37:52

01-APR-86

PAG. 1

```
0001          SUBROUTINE FUNC1(PR,PB,M,MINCON,MAXCON,NB,DELTA,CONCAL,NMO)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C          RUTINA PARA CALCULAR PR EN FUNCION DE PB
0007 C
0008 C
0009 C*****
0010 C
0011          IMPLICIT INTEGER(A-Z)
0012          REAL PR,PB,P,Q,DELTA
0013          INTEGER M(1)
0014 C
0015 C
0016 C
0017          CALL EFCOCA(PB,P,Q,DELTA,CONCAL)
0018          PR=0.
0019          DO 10 I=MINCON,MAXCON
0020              J=8*NB-I
0021              K=M(I)
0022              PR=PR+K*(P**(I*NMO))*(Q**(J*NMO))
0023 10          CONTINUE
0024          RETURN
0025          END
```

SY:IDELSQ.FTN

20:46:08

01-APR-86

PAG. 1

```

0001      SUBROUTINE IDELSQ(P,SCHI,TETA,Y,U,N,GA,A,NN,YE,SUM,GTP,TRAZA,
0002      *                               WNV,FCV)
0003      C
0004      C*****
0005      C
0006      C
0007      C      RUTINA PARA IDENTIFICACION
0008      C
0009      C      RECURSIVA DE PARAMETROS POR EL METODO DE MINIMOS CUADRADOS
0010      C
0011      C
0012      C*****
0013      C
0014      REAL L
0015      COMMON /AUXIL/ C(100),E(100),AU(100)
0016      DIMENSION P(1),SCHI(1),TETA(1),L(10)
0017      C
0018      C
0019      C
0020      CALL MULTI(SCHI,P,C,1,N,N)      ! (N,N*N,N)
0021      CALL MULTI(C,SCHI,D,1,N,1)      ! (N,N,1)
0022      D=D*GA+A
0023      D=GA/D
0024      CALL MULTI(P,SCHI,L,N,N,1)      ! (N*N,N,N)
0025      CALL MULESC(L,L,N*1,D)
0026      CALL MULTI(SCHI,TETA,D,1,N,1)  ! (N,N,1)
0027      YE=D
0028      D=D-Y
0029      ER=D
0030      FCV=1+GA*FCV
0031      WNV=(ER*ER/FCV)+(FCV-1)*WNV/FCV
0032      CALL MULESC(E,L,N*1,D)
0033      CALL RESTA(TETA,E,TETA,N*1)
0034      CALL MULTI(L,SCHI,C,N,1,N)      ! (N,N,N*N)
0035      CALL MULESC(E,C,N*N,-1.)
0036      DO 20 I=1,N
0037 20  E((I-1)*N+I)=E((I-1)*N+I)+1.
0038      CALL MULTI(E,P,C,N,N,N)        ! (N*N,N*N,N*N)
0039      CALL MULESC(P,C,N*N,GA)
0040      C      CALCULO DE LA TRAZA MATRIZ DE COVARIANZA.
0041      TRAZA=0.
0042      DO 30 I=1,N
0043 30  TRAZA=TRAZA+P((I-1)*N+I)
0044      C
0045      C      ACTUALIZACION DE GAMMA
0046      C
0047      CALL MULTI(SCHI,L,D,1,N,1)      ! (N,N,1)
0048      GA=1.-(1.-D)*ER*ER/SUM
0049      IF(GA.LT.GTP)GA=GTP
0050      IF(GTP.GT.1.)GA=GTP-1.  ! GA FIJO EN GTP-1.
0051      IF(GA.GT.1.)GA=1.
0052      GA=1./GA
0053      C
0054      CALL ACTDOS(SCHI,N,U,Y)
0055      RETURN
0056      END

```


SY:IDELSQ.FTN

20:46:08

01-APR-86

PAG. 2

```
0057 C
0058     SUBROUTINE ACTDOS(A,N,U,Y)
0059 C
0060 C*****
0061 C
0062 C
0063 C     RUTINA AUXILIAR DE ACTUALIZACION DEL VECTOR DE ENTRADAS
0064 C
0065 C
0066 C*****
0067 C
0068     DIMENSION A(1)
0069     M=N
0070     IF(M.LE.1)GOTO 40
0071     DO 30 I=M,2,-1
0072         A(I)=A(I-1)
0073 30    CONTINUE
0074 40    A(1)=Y
0075     RETURN
0076     END
```

```

0001      SUBROUTINE PREDIC(X,LX,Y,IAR,XMED)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C      RUTINA PARA LA PREDICCION DE VALORES DE LA SERIE TEMPORAL
0007 C
0008 C
0009 C*****
0010 C
0011      REAL X(1),Y(1),P(100),SCHI(10),TETA(10),MEDIA
0012 C
0013 C
0014 C
0015      CALL PREST(P,SCHI,TETA,IAR,GA,A,NN,SUM,GTP,WNV,UK,FCV)
0016      XPR=X(1)
0017      MEDIA=0.
0018      AMEDIA=0.
0019      SIGMA=0.
0020      DO 10 I=1,LX
0021          DIF=XPR-X(I)
0022          WRITE(3,900)X(I),XPR,DIF
0023 900      FORMAT(3F7.0)
0024          MEDIA=MEDIA+DIF
0025          AMEDIA=AMEDIA+ABS(DIF)
0026          SIGMA=SIGMA+DIF*DIF
0027          YK=X(I)-XMED
0028          CALL IDELSQ(P,SCHI,TETA,YK,UK,IAR,GA,A,NN,YE,SUM,
0029 *          GTP,TRAZA,WNV,FCV)
0030          CALL PREDI1(TETA,X,I,XPR,IAR,XMED)
0031 10      CONTINUE
0032 C
0033      MEDIA=MEDIA/FLOAT(LX-1)
0034      AMEDIA=AMEDIA/FLOAT(LX-1)
0035      SIGMA=SIGMA/FLOAT(LX-1)-MEDIA*MEDIA
0036      WRITE(3,901)MEDIA,SIGMA,AMEDIA
0037 901      FORMAT(3F7.3)
0038      RETURN
0039      END

```

SY:PREDI1.FTN

20:44:23

01-APR-86

PAG. 1

```
0001      SUBROUTINE PREDI1(TETA,X,I,XPR,IAR,XMED)
0002 C
0003 C*****
0004 C
0005 C
0006 C      RUTINA PARA PREDICCIÓN DE UN VALOR EN LA SERIE TEMPORAL
0007 C
0008 C
0009 C*****
0010 C
0011      REAL TETA(10),X(1)
0012 C
0013 C
0014 C
0015      XPR=XMED
0016      DO 10 J=1,IAR
0017          IF( (I-J).LE.0) GO TO 10
0018          XPR=XPR+TETA(J)*(X(I-J)-XMED)
0019 10      CONTINUE
0020      RETURN
0021      END
```

```

0001      SUBROUTINE PREST(P,SCHI,TETA,IAR,GA,A,NN,SUM,GTP,WNV,UK,FCV)
0002 C
0003 C
0004 C*****
0005 C
0006 C
0007 C      RUTINA PARA PREPARAR LA ESTIMACION RECURSIVA
0008 C
0009 C
0010 C*****
0011 C
0012      REAL P(100),SCHI(10),TETA(10)
0013 C
0014 C
0015 C
0016      DO 10 I=1,IAR
0017          DO 10 J=1,IAR
0018              P((J-1)*IAR+I)=0.
0019 10      CONTINUE
0020          DO 11 I=1,IAR
0021              P((I-1)*IAR+I)=1000.
0022              SCHI(I)=0.
0023              TETA(I)=0.
0024 11      CONTINUE
0025      GA=1.          !FACTOR DE OLVIDO
0026      A=1.          ! RESERVADO
0027      NN=0          ! RESERVADO
0028      SUM=0.01      !CORRECCION DE LA SENSIBILIDAD DEL F. DE OLVIDO
0029      GTP=1.        !LIMITE DEL FACTOR DE OLVIDO
0030      WNV=0.        !VARIANZA DEL RUIDO
0031      UK=0.         ! RESERVADO
0032      FCV=0.        !FACTOR DE CORRECCION DE LA VARIANZA
0033      RETURN
0034      END

```