

ANALISIS Y SIMULACION DE REDES DE COMUNICACION PARA TRAFICO  
HIBRIDO

tesis presentada por

Israel ArieH Cimet Wulfovich

para obtener el titulo de Ingeniero Mecanico Electricista en la Facultad de  
Ingeniería de la Universidad Nacional Autonoma de México.

MEXICO D.F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## CONTENTS

	Page
1. INTRODUCCION . . . . .	1
1.1 PORQUE EXISTEN REDES DE COMPUTADORAS? . . . . .	1
1.2 CLASIFICACION DE REDES DE COMPUTADORAS . . . . .	2
1.3 OBJETIVO DE LA TESIS . . . . .	8
2. HERRAMIENTAS PARA EL ANALISIS Y DISEÑO DE REDES . . . . .	10
2.1 CONCEPTOS ELEMENTALES . . . . .	10
2.2 TEORIA DE COLAS . . . . .	11
2.3 PROCESOS ESTOCASTICOS . . . . .	16
2.3.1 PROCESOS DE RENOVACION . . . . .	17
2.3.2 PROCESOS DE MARKOV . . . . .	18
2.3.3 PROCESOS DE NACIMIENTO Y MUERTE . . . . .	19
2.4 COLAS POISSONIANAS . . . . .	20
2.4.1 SISTEMA M/M/1 . . . . .	21
2.4.2 SISTEMA M/M/c CON PERDIDA O SISTEMA M/M/c/c . . . . .	22
2.5 GENERACION DE NUMEROS ALEATORIOS . . . . .	23
2.6 PROGRAMACION MATEMATICA . . . . .	24
2.7 TECNICAS HEURISTICAS . . . . .	25
2.8 SIMULACION . . . . .	26
3. EL PROBLEMA DE DISEÑO DE REDES DE COMPUTADORAS . . . . .	30
3.1 ASIGNACION DE CAPACIDADES . . . . .	36
3.2 ESTRATEGIA DE ENRUTAMIENTO . . . . .	40
3.3 DISCIPLINA DE CONTROL DE FLUJO . . . . .	43
3.4 TOPOLOGIA . . . . .	44
4. MODELADO DE REDES . . . . .	46
4.1 CONFIGURACION FISICA . . . . .	47
4.1.1 REDES CON CONMUTACION DE PAQUETES . . . . .	47
4.1.2 REDES CON CONMUTACION DE CIRCUITOS . . . . .	52
4.1.3 REDES CON CONMUTACION HIBRIDA . . . . .	56
4.2 CONSIDERACIONES GENERALES EN LOS MODELOS . . . . .	58
4.3 MODELO DE REDES CON CONMUTACION DE PAQUETES . . . . .	59
4.4 MODELO DE REDES CON CONMUTACION DE CIRCUITOS . . . . .	60
4.5 MODELO DE REDES CON CONMUTACION HIBRIDA . . . . .	63

5. SIMULACION DE REDES DE COMPUTADORAS . . . . .	68
5.1 ESPECIFICACIONES . . . . .	68
5.2 MODELOS UTILIZADOS . . . . .	69
5.3 ESTIMADORES . . . . .	71
5.4 ENRUTAMIENTO . . . . .	73
5.5 CONTROL DE LA SIMULACION . . . . .	74
5.6 EJEMPLO . . . . .	77
5.7 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS . . . . .	90
CONCLUSIONES . . . . .	94
APENDICE A: CORRIDAS DEL EJEMPLO DEL SIMULADOR . . . . .	97
APENDICE B: FIGURAS . . . . .	11
REFERENCIAS . . . . .	126
OTRAS REFERENCIAS CONSULTADAS . . . . .	128

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 PORQUE EXISTEN REDES DE COMPUTADORAS?

Actualmente la computadora juega un papel preponderante en nuestra existencia. Las diversas aplicaciones, basadas primordialmente en su capacidad de reunir, transportar, almacenar y procesar informacion, varian desde el campo de la Medicina hasta las Artes, utilizandose principalmente en las diversas ramas de la Ingenieria.

Con el advenimiento de nuevos avances tecnologicos y de nuevas aplicaciones (por ejemplo: correo electronico, control distribuido de inventarios, sistemas de reservaciones, sistemas militares, sistemas bancarios, automatizacion de oficinas, teleconferencias y muchas mas) es necesario construir redes que comuniquen a varias computadoras. Esto se debe a que muchas de estas aplicaciones necesitan de procesadores especializados o de ciertos recursos (como bases de datos o programas) que son demasiado caros o dificiles de mantener o conseguir para una sola aplicacion; es mas factible compartir los recursos disponibles en cada institucion en diversas aplicaciones y en distintos lugares. Ademas, algunas de estas aplicaciones (como: bancos, control industrial, etc.) requieren de recursos confiables, ya que una interrupcion en el servicio tendria serias consecuencias.

Una de las razones principales que apoya a esta decision es que el costo relativo entre procesamiento y comunicacion ha disminuido considerablemente. Anteriormente era mas factible tener una computadora central y transmitirle toda la informacion. Actualmente es mas barato tener computadoras pequenas distribuidas en cada region que realizan el procesamiento localmente y solo transmiten la

información más importante al computador central.

Es por esto que algunos de los objetivos que se buscan al construir redes de computadoras son:

1. Compartir recursos disponibles entre usuarios geográficamente distribuidos.
2. Aumentar la confiabilidad al tener recursos alternativos.
3. Facilitar el uso de diferentes recursos en una aplicación.
4. Proporcionar compatibilidad entre equipos y programas no compatibles de diferentes distribuidores.
5. Simplificar el crecimiento del sistema al introducir nuevos usuarios, además de facilitar la introducción de nuevos componentes (como: procesadores más rápidos).

## 1.2 CLASIFICACION DE REDES DE COMPUTADORAS

Generalmente una red de computadoras se divide en 2 componentes principales: la Subred del Usuario y la Subred de Comunicación. La primera consiste de una colección de computadoras y terminales dedicadas a procesar las aplicaciones mencionadas anteriormente. La segunda consiste de conmutadores o microprocesadores (también llamados nodos) que transmiten los mensajes de los diferentes usuarios y se encuentran interconectados por líneas de transmisión.

Esta tesis está enfocada hacia las características que debe tener la Subred de Comunicación para tener una operación eficiente de la red. En lo sucesivo, se considera que la Subred del Usuario "inyecta" una serie de mensajes (que pueden ser desde archivos de varios Mb hasta caracteres de control de un solo byte) a la Subred de

Comunicacion y esta debe encargarse de que lleguen a su destino correctamente y en el menor tiempo posible \*.

La Subred de Comunicacion (que llamaremos simplemente subred) puede clasificarse en 2 grandes grupos dependiendo del tipo de linea de transmision que se utilice. Esta clasificacion se debe a la manera en que la subred transmite los mensajes entre cada nodo de la red. El primer grupo utiliza lineas de punto a punto (lineas telefonicas publicas o privadas) en las cuales la transmision se lleva a cabo entre 2 nodos adyacentes. Al recibir un mensaje, el nodo debe almacenarlo y esperar hasta que la linea al siguiente nodo este libre para empezar a transmitir; es por esto que este tipo de subredes reciben el nombre de "guarda-reexpide". En el caso en que ciertos nodos no tengan una conexion directa, la transmision se realiza utilizando nodos intermedios (ejemplo: si A y C no estan conectados, pero A esta conectado con B y este a su vez esta conectado con C, entonces la transmision se realiza de A hacia B y de B hacia C).

En el segundo grupo se utilizan canales de difusion (radio, satelite, etc.), con los cuales todos los nodos reciben simultaneamente la transmision. Este tipo de subredes presentan ventajas como eliminar los problemas de enrutamiento y congestionamiento del primer grupo pero introducen tambien ciertas desventajas como falta de seguridad ([1] cap 6-7).

La subred puede organizarse en 3 diferentes niveles. La funcion de cada nivel es ofrecer ciertos servicios al nivel inmediato superior sin que este ultimo conozca los detalles de la manera en que se

\* Puede encontrarse un estudio detallado de las características y operacion de la Subred del Usuario en [1] caps: 8-10.

ofrecen. Estos niveles son;

1. Nivel físico: se encarga de transmitir en el canal de comunicación y en realidad es el único nivel que se encuentra físicamente conectado por medio de las líneas de transmisión. Este nivel comunica a los demás niveles con sus analogos en otro lugar, proporcionando así una comunicación "virtual" entre cada nivel. En este nivel se especifican los procedimientos mecánicos y eléctricos para establecer una llamada: como conectar y desconectar una línea, velocidades y tipo de transmisión (simplex, duplex, etc.), sincronización, los códigos para detectar y corregir errores (la detección y corrección se lleva a cabo en el nivel 2 pero generalmente los códigos se generan directamente sobre la línea en el nivel 1), la técnica de modulación (PCM, Delta, etc.) y la técnica de conmutación (por paquetes, por circuitos, etc.). Esta tesis está dedicada a discutir la forma más eficaz en que se puede utilizar el canal de comunicación bajo el tráfico que presentan las diversas aplicaciones que se están realizando (ejemplo: voz, imágenes, datos, etc.).
2. Nivel de enlace de datos: transforma al nivel físico en un canal libre de errores de transmisión. Esto se logra dividiendo los datos en pequeños paquetes que se transmiten secuencialmente. En caso de existir algún error, el receptor pide una retransmisión del paquete hasta que este sea recibido correctamente.
3. Nivel de control de la subred: realiza el enrutamiento de mensajes y asegura que estos sean recibidos en el orden y forma correctos; además, controla el flujo del tráfico de mensajes para no inundar a



la red con mas mensajes cuando ya no existe capacidad disponible para transmitirlos.

Una de las características fundamentales del trafico entre computadoras es que generalmente se presenta en "rafagas" de datos seguidas de largas pausas, a diferencia de, por ejemplo, el trafico telefonico en el que los datos circulan en forma casi continua . Por esta razon existen 2 tipos de conmutacion: conmutacion de circuitos (CC) y conmutacion de paquetes (CP).

La CC fue ideada para el sistema telefonico. Al recibir una llamada el conmutador busca una linea disponible para establecer la comunicacion con el receptor (este proceso puede llevarse hasta 10 seg, ya que deben apartarse todas las lineas que vayan a intervenir en la transmision). Esto significa que en caso de no encontrar alguna linea disponible, no se establecera la llamada, por lo que el usuario debiera intentar la comunicacion en otro momento. En caso de establecer la conexion, las lineas que intervienen en ella permanecen asignadas durante toda la duracion de la llamada (aun cuando no se este transmitiendo), por lo que puede transmitirse sin preocuparse de congestionamientos, retardos, enrutamientos, etc.

La CP toma ventaja del trafico caracteristico entre computadoras y divide el mensaje en paquetes a los que se les agrega cierta informacion como: caracteres de control, chequeo de errores, destino final, etc. Estos paquetes tienen la capacidad de viajar dentro de la red en forma independiente y con diferentes rutas para llegar a su destino (todo esto controlado por el nivel 3) . Este hecho asegura que ninguna linea estara ocupada con un solo mensaje durante mas de

algunos milisegundos; además de que la independencia de cada paquete mejora el desempeño de la red al reducir el retardo ocasionado por una falta de capacidad de transmisión (debido a líneas ocupadas). Como consecuencia también se mejora la conductividad de la red (capacidad para llevar un mensaje a su destino). Sin embargo, este esquema presenta también desventajas, por ejemplo: el conmutador debe almacenar los paquetes que aun no han sido transmitidos, por lo que existe la posibilidad de que la capacidad de almacenamiento no sea suficiente para determinado tráfico instantáneo; esto representaría una pérdida de paquetes y por lo tanto un mensaje truncado; además, los paquetes pueden llegar a su destino en desorden, por lo que existiría cierto retardo al ordenar y ensamblar los paquetes para de nuevo formar el mensaje.

Pero cuando debe utilizarse CC o CP?. Para hacer una comparación se utilizaron 2 indicadores del desempeño de una red [2]. Estos son: el costo de utilización de la red y el retardo de tiempo de un mensaje que viaja en la red.

El primer indicador compara el costo de transmisión contra el costo de procesamiento de cada esquema. Se observó que debido al encabezado que se le agrega a los mensajes de CP, la CC es más eficaz (o sea el costo de transmisión es menor que el costo de procesamiento) para mensajes continuos de una longitud de más de 3 Kb [2]. En cambio para mensajes intermitentes, CP es más eficaz debido a que se utiliza el canal para transmitir otros mensajes cuando se presenta una pausa en la información.

Utilizando el segundo indicador se encuentra una mayor eficacia de transmisión (menor retardo) para mensajes largos y continuos en una red con CC, debido a que en este caso la CP introduce mucha información que no es del usuario (ejemplo: encabezados) pero que utiliza la capacidad de transmisión, traduciendo esto en un mayor retardo para entregar el mensaje. Por otro lado en mensajes cortos o intermitentes el establecer una conexión para CC toma más tiempo que la misma transmisión ocasionando un mayor retardo que en CP.

A pesar de esto, en algunas aplicaciones es indispensable cumplir con ciertos requisitos que solo se cumplen en determinado esquema de conmutación sin importar la eficiencia con la que se realiza (ejemplo: una comunicación sincrónica solo es posible en CC). Para evitar estas limitaciones se han diseñado variantes o formas híbridas de conmutación. Como ejemplos se tienen:

1. CC con conexión rápida (del orden de milisegundos).
2. Conmutación por división de tiempo: bajo ciertas restricciones los conmutadores empiezan a transmitir el paquete hacia el siguiente nodo aun cuando no han terminado de recibirlo. Esto elimina el almacenamiento del mensaje, asemejándose a CC.
3. Circuitos permanentes (Sistema TRAN): la transmisión se realiza en superpaquetes que contienen grupos de paquetes hacia destinos conectados por circuitos permanentes. El superpaquete descarga cada grupo en su destino y recoge otros para entregar en otros nodos.

### 1.3 OBJETIVO DE LA TESIS

Tradicionalmente se han manejado los 2 esquemas anteriores en forma exclusiva en una red dada (o con ciertas variantes), sin embargo con el advenimiento de nuevos avances en la tecnología de computadoras y comunicaciones, se ha hecho necesario proporcionar al posible usuario, redes de comunicación entre computadoras que manejen eficazmente el tráfico conjunto con muy diversas características (como voz y datos); además, debe crearse una infraestructura que soporte las futuras aplicaciones de las que aun no se conocen las características.

Como una solución a este hecho se propone utilizar la tecnología de redes con comunicación integrada (o híbrida), en la que existiran los 2 esquemas de conmutación bajo una misma interfase y los recursos serán asignados libremente para cumplir con las demandas del usuario; es más, el usuario podrá escoger el esquema más conveniente para la aplicación que vaya a procesar. Este esquema proporcionara la requerida independencia entre las 2 subredes, además de lograr el mejor desempeño de cada una de ellas.

En esta tesis se presenta un estudio comparativo de los 2 esquemas postulando, en forma general, el problema de diseño de redes híbridas como uno de optimización con objetivos múltiples en conflicto. Las funciones de costo están basadas en aproximaciones del retardo total promedio (en paquetes) y de la probabilidad máxima de bloqueo (en circuitos). Estas son funciones del inverso de la capacidad de la línea de transmisión, por lo que el diseño de la red debe realizarse de tal forma que se encuentre un

compromiso entre los valores de estas funciones para obtener el mejor desempeño de cada una de ellas.

Utilizando estas funciones objetivo se presenta esquemáticamente un simulador de redes híbridas a través del cual se validan las aproximaciones propuestas y se estudian algunos esquemas para compartir las capacidades de las líneas de transmisión en forma dinámica entre el tráfico conmutado por paquetes y el conmutado por circuitos. Finalmente se destacan algunos aspectos estadísticos de las simulaciones.

## 2. HERRAMIENTAS PARA EL ANALISIS Y DISEÑO DE REDES

### 2.1 CONCEPTOS ELEMENTALES

Es conveniente recordar algunos conceptos elementales que serán utilizados para plantear las herramientas que se utilizan en el análisis y diseño de redes. Estos conceptos son [9]:

1. Probabilidad: la teoría de la probabilidad describe o predice los promedios de ocurrencia de eventos de determinado fenómeno o experimento  $S$ , donde un evento  $a$  es un subconjunto del espacio de resultados posibles de ese fenómeno (también llamado evento seguro). Por ejemplo, un evento es que al tirar un dado, el número sea 6 o que el número sea par. Esta predicción se logra al asociar una probabilidad  $P(a)$  a los diferentes eventos. Esta probabilidad debe obedecer los siguientes postulados: (1) debe ser positiva, (2) la probabilidad del evento seguro es 1 y (3) si  $a$  y  $b$  son eventos mutuamente exclusivos, es decir, la ocurrencia de uno en determinado intento excluye la ocurrencia del otro, entonces:

$$P(a+b) = P(a) + P(b) \quad (2.1)$$

2. Variable Aleatoria (VA): dado un experimento  $G$  cuyos eventos  $s$  pertenecen al evento seguro  $S$ , se le asigna a cada  $s$  un número  $X(s)$  de acuerdo a cierta regla. Este hecho establece una relación entre los elementos del conjunto  $S$  y ciertos números, a la cual se le llama variable aleatoria. Se define así una función  $X$  cuyo dominio es el conjunto  $S$  de todos los eventos posibles y cuyo rango es el conjunto de los números. Esta función debe cumplir con las siguientes condiciones: (1) el conjunto  $\{X(s) \leq x\}$  es un evento para todo número real y (2) la probabilidad de los eventos

$\{X(s)=+\infty\}$  y  $\{X(s)=-\infty\}$  es cero.

3. Funcion de Distribucion de una VA: dado un numero real  $x$ , el conjunto  $\{X(s) \leq x\}$ , que consiste de todos los resultados  $s$  de un experimento, es un evento. La probabilidad  $P\{X(s) \leq x\}$  de este evento es una funcion de  $x$  denotada por:

$$F_x(x) = P\{X(s) \leq x\} \quad (2.2)$$

y sera denominada como la funcion de distribucion o simplemente la distribucion de la VA  $x$ . La funcion de la ec. (2.2) esta definida para toda  $x$  y se denotara por  $F(x)$  cuando no exista ambigüedad.

4. Funcion de Densidad de una VA: esta funcion se define como la derivada de la funcion de distribucion de la VA. Debido a que  $F(x)$  puede no tener una derivada para cada  $x$ , estas funciones de densidad (o simplemente densidades) pueden dividirse en continuas y discontinuas. La densidad puede expresarse como:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.3)$$

## 2.2 TEORIA DE COLAS

Un sistema de espera (mas comunmente conocido como cola) consiste de los siguientes elementos (representados en la figura 1) [10]:

1. Fuente: es la poblacion o coleccion de clientes potenciales del sistema y generalmente se considera infinita para facilitar el estudio del comportamiento del sistema en estado estable. En el caso de redes los clientes son los mensajes que arriban a un nodo (que en este caso es el sistema de espera).
2. Proceso de arribos: determinado por la funcion de distribucion

$$A(t) = P\{\tau \leq t\} \quad (2.4)$$

donde  $\tau$  es el tiempo entre arribos y esta definido por:

$$\tau_n = t_n - t_{n-1} \quad (2.5)$$

siendo  $t_n$  el tiempo en el que llega al sistema el  $n$ -esimo cliente (por definicion  $t_0=0$ ). Se supone que los tiempos entre arribos tienen un valor medio  $E(\tau)$  expresado como:

$$E(\tau) = 1/\lambda \quad (2.6)$$

donde  $\lambda$  es el promedio (tambien llamado tasa o intensidad) de "llegadas" al sistema por unidad de tiempo. Esta distribucion representa la forma en que arriban los clientes a un sistema de espera para recibir servicio.

3. Sistema de Espera: la unidad de servicio puede tener uno o mas servidores o canales que generalmente se consideran identicos. Si todos los servidores estan ocupados cuando un cliente llega al sistema, este debe unirse a la cola y esperar hasta que un servidor este libre y lo pueda atender. Al entrar el cliente a la unidad de servicio es atendido por un servidor y al terminar el servicio el cliente sale del sistema. Este proceso depende de 4 factores importantes:

- a. Distribucion del tiempo de servicio: determina a la VA  $\sigma$  que denota el tiempo de servicio y puede expresarse como:

$$S(t) = P\{\sigma \leq t\} \quad (2.7)$$

donde  $\sigma$  tiene un valor medio  $E(\sigma)$  expresado como:

$$E(\sigma) = 1/\mu \quad (2.8)$$

donde  $\mu$  es el promedio de tiempos de servicio por cada servidor.



b. Numero de servidores ( $c$ ): Un sistema de espera puede tener desde un servidor hasta un numero muy grande de servidores, en cuyo caso se considera como infinito.

c. Capacidad maxima del sistema ( $K$ ): Se define como el numero maximo de individuos que puede contener el sistema y en el caso de que haya  $c$  servidores se tiene que:

$$K = C_q + c \quad (2.9)$$

donde  $C_q$  es la capacidad de la cola, o bien el numero maximo de clientes que se permite estar en la cola esperando servicio.

Un sistema puede tener  $C_q=0$  con lo que se le denomina como "sistema de perdida" ya que el cliente no puede esperar en caso de que todos los servidores esten ocupados y se "pierde". En otros casos, la capacidad de la cola es infinita denotando suficiente capacidad para cualquier cantidad de clientes que arriben al sistema. Sin embargo, la mayoría de las veces la capacidad de la cola es positiva pero finita.

d. Disciplina de servicio: Esta es la regla para seleccionar el siguiente cliente que recibira servicio. Esta disciplina puede ser:

- 1) FIFO (First-In First-Out): los clientes son servidos en el orden en que llegaron.
- 2) LIFO (Last-In First-Out): el ultimo cliente que llega es el primero que se sirve.
- 3) SIRO (Service In Random Order): se sirve en orden aleatorio.
- 4) PRI (PRIority service): se sirve basado en prioridades

asignadas a los clientes.

- 5) RR (Round-Robin): cada cliente recibe un tiempo fijo de servicio (llamado quantum). En caso de no ser suficiente el cliente entra de nuevo a la cola donde espera para recibir otro quantum. Este proceso se repite hasta que el cliente haya terminado, en cuyo caso sale del sistema.

Una forma abreviada de describir un sistema de espera con todas sus características es la notación de Kendall-Lee. Esta se escribe como:

$$A / S / c / K / F / d$$

donde cada letra significa:

- A: distribución de los tiempos entre arribos.
- S: distribución del tiempo de servicio.
- c: número de servidores.
- K: capacidad del sistema.
- F: número de individuos en la fuente.
- d: disciplina de servicio.

En ciertos casos se utiliza la notación más abreviada  $A/S/c$ , en la que se supone que  $K=\infty$ ,  $F=\infty$  y  $d=\text{FIFO}$ . Las distribuciones que se utilizan en los sistemas de espera más comunes son:

- $\theta I$ : distribución general de los tiempos entre arribos.
- G: distribución general del tiempo de servicio.
- M: distribución exponencial (para A o S).
- $H_k$ : distribución hiperexponencial con k-etapas (para A o S).
- $E_k$ : distribución de Erlang con k-etapas (para A o S).
- D: tiempos entre arribos o de servicio constantes (distribución

determinística).

Particularmente, es de nuestro interés la distribución exponencial ya que esta es la que se utiliza para modelar redes de computadoras. Puede decirse que una VA tiene una distribución exponencial si su densidad está dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

con esto la función de distribución será:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Es interesante resaltar las características que apoyan el uso de esta distribución en el modelo de redes. Se dice que una VA con esta distribución no posee "memoria", es decir, el sistema no recuerda el tiempo transcurrido desde el último evento, con lo que un evento tiene la misma probabilidad de ocurrir en cualquier tiempo. A un proceso de llegadas con distribución exponencial entre el tiempo de arribos se le llama proceso de Poisson y puede verse que este proceso es el límite al superponer un gran número de procesos independientes. Esto significa que los procesos de Poisson son una buena caracterización de arribos de clientes provenientes de diversas fuentes independientes y que fueron mezclados a la entrada del sistema. Cabe mencionar también que la única distribución que cumple con estas características es la distribución exponencial (ver [9] págs: 559-560).

Por último, un parámetro importante que sirve como indicador del funcionamiento de un sistema de espera es la intensidad de tráfico  $\rho$  dada por:

$$\rho = \frac{E(\sigma)}{E(\tau)} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.12)$$

Como se vera posteriormente, la intensidad de trafico es tambien una medida del congestionamiento del sistema, ya que el valor de  $\rho$  determina probabilisticamente si el sistema llegara eventualmente a un estado estable.

### 2.3 PROCESOS ESTOCASTICOS

La teoria de procesos estocasticos (que incluye a la teoria de la renovacion, la teoria de cadenas de Markov, los procesos semi-Markov y los procesos regenerativos) provee un gran conjunto de herramientas analiticas particularmente utiles en el modelado de sistemas con secuencias impredecibles de demandas aleatorias sobre recursos disponibles [9], [10]. Las aplicaciones de esta teoria son muy variadas y posee fundamentos bien estudiados que se utilizan en situaciones en que la teoria de colas no es muy efectiva (ejemplo: optimizacion).

En terminos generales, un proceso estocastico es una coleccion de eventos regidos por leyes probabilisticas. Si a cada ocurrencia  $\tau$  de un experimento se le asigna una funcion del tiempo  $X(t, \tau)$  real o compleja, se crea una familia de funciones para cada  $\tau$ . Un proceso estocastico puede verse como una funcion de dos variables  $t$  y  $\tau$  que puede representar 4 diferentes entidades:

- (1) una familia de funciones de tiempo ( $t$  y  $\tau$  variables).
- (2) una funcion de tiempo ( $t$  variable,  $\tau$  fija).
- (3) una VA ( $t$  fijo,  $\tau$  variable).
- (4) un numero ( $t$  fijo,  $\tau$  fija).

Se usara la notacion  $X(t)$  para representar un proceso estocastico y su interpretacion dependera del contexto en que se use. Particularmente nos interesan los procesos llamados de "conteo" en los cuales el espacio de estados  $S$  (evento seguro) es  $\{0,1,2,\dots\}$  y  $X(t)$  satisface las siguientes características:

- (1)  $X(0)=0$ .
- (2)  $X(t)$  solo toma valores enteros no negativos.
- (3)  $X(t)$  es no-decreciente o sea  $X(s) \leq X(t)$  si  $s < t$ .
- (4)  $X(t)-X(s)$  es el numero de veces que el evento  $E$  ha ocurrido en el intervalo  $(s,t]$ .

Como ejemplo de un proceso de conteo esta el proceso que cuenta el numero de llegadas de mensajes a un nodo de la red. Si dicho proceso tiene una distribucion exponencial este proceso es de Poisson.

### 2.3.1 PROCESOS DE RENOVACION

Sea  $\{N(t), t \geq 0\}$  un proceso de conteo en el que  $N(t)$  es el numero de veces que ha ocurrido un cierto evento  $E$  durante el intervalo de tiempo  $[0,t]$ . Supongase que  $E$  ocurre en los tiempos  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$  en donde  $t_n$  es el tiempo en el que ocurre  $E$  por  $n$ -esima vez. Utilizando la definicion de tiempos entre arribos dada por la ec. (2.5), se dice que  $N(t)$  es un proceso de renovacion si los tiempos entre arribos son VA independientes identicamente distribuidas (IID) [9]. Un proceso de Poisson es un proceso de renovacion si  $t_n$  tiene una distribucion exponencial.

### 2.3.2 PROCESOS DE MARKOV

Un proceso estocástico es un proceso de Markov si cumple con la propiedad de "no recordar" su historia [9],[10]. A esta propiedad también se le denomina como la propiedad de Markov y puede describirse como:

$$P\{X(t) \leq x / X(r), r \leq s\} = P\{X(t) \leq x / X(s), s \leq t\} \quad (2.13)$$

que se interpreta como: si  $s$  es el tiempo "presente",  $t$  ( $\geq s$ ) es el tiempo "futuro" y  $r$  ( $\leq s$ ) es el tiempo "pasado"; la ec. (2.13) nos dice que dado el presente  $X(s)$  del sistema, el futuro  $X(t)$  es independiente del pasado  $X(r)$ . Puede verse que un proceso de Poisson es siempre un proceso de Markov con lo que puede demostrarse que también cumple con la propiedad de Markov.

Generalmente se clasifican a los procesos de Markov en 2 categorías: (1) Procesos de Markov cuando el espacio de estados  $S$  es continuo (un intervalo) y (2) Cadenas de Markov cuando el espacio de estados  $S$  es discreto (ejemplo:  $S=\{0,1,2,\dots\}$ ).

Esta última categoría es la más importante para el estudio de redes ya que el espacio de estados posibles es discreto. Uno de los parámetros que describen a este tipo de sistemas es su probabilidad de transición que se define como:

$$P_{ij}(s,t) = P\{X(t)=j / X(s)=i\} \quad (2.14)$$

donde  $i,j \in S$  y  $0 \leq s < t$ . Sin embargo, en nuestro caso solo se consideran procesos homogéneos en el tiempo en los cuales se cumple que:

$$P_{ij}(t) = P\{X(s+t)=j / X(s)=i\} \quad (2.15)$$

bajo las mismas condiciones. Si se cumple que la probabilidad de transición es independiente de  $S$  se dice que esta es estacionaria.

Otro parametro importante que describe las características de una cadena de Markov es la intensidad de transición, que se define como la derivada de  $P_{ij}$  en  $t=0$ . Puede verse que la intensidad de transición de un proceso de Poisson esta dada por [10]:

$$q_{i,j} = \begin{cases} \lambda & x \geq 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2.16)$$

### 2.3.3 PROCESOS DE NACIMIENTO Y MUERTE

Estos procesos son una clase especial de cadenas de Markov. Un proceso de nacimiento y muerte (PNM) es una cadena de Markov  $X=(X(t), t \geq 0)$  con espacio de estados discreto, cuyas intensidades de transición son de la forma:

$$q_{i,j} = \begin{cases} \lambda_i & \text{si } j=i+1 \text{ (} i \geq 0 \text{)} \\ \mu_i & \text{si } j=i-1 \text{ (} i \geq 1 \text{)} \\ -(\lambda_i + \mu_i) & \text{si } j=i \text{ (} i \geq 0 \text{)} \\ 0 & \text{si } |j-i| \geq 2 \end{cases} \quad (2.17)$$

con  $\mu_0=0$  por definición. Los parametros  $\lambda_i$  se llaman los indices de nacimientos y los parametros  $\mu_i$  se llaman los indices de muerte. Puede verse de la ultima relacion de (2.17) que la transición desde un estado dado ( $i$ ) de este tipo de procesos solo puede ocurrir a sus vecinos inmediatos ( $i+1$ ) o ( $i-1$ ).

Existen diversos procesos que pueden ser representados mediante un PNM (ejemplo: un modelo de población con inmigración, procesos de puros nacimientos, etc.) pero particularmente es de

nuestro interes el proceso con  $\lambda_i = \lambda$  y  $\mu_i = \mu$  para toda  $i$ , ya que este sistema representa un tipo de cola en el cual el patron de arribos y servicios no dependen del numero de clientes ( $i$ ) que ya estan en el sistema. Puede demostrarse que este tipo de procesos tendran una distribucion estacionaria si y solo si la serie:

$$\sum_{j=1}^{\infty} (\lambda/\mu)^j \quad (2.18)$$

converge. Esta serie convergera si  $\lambda/\mu < 1$ . Como se vio en la ec. (2.12), el parametro  $\rho$  define el "congestionamiento" del sistema e indica si el sistema alcanzara un estado estable. Con la ec. (2.18) puede verse a que se debe esta afirmacion y las condiciones en las que se cumple.

## 2.4 COLAS POISSONIANAS

Diversos tipos de sistemas de espera pueden ser descritos como un PNM. Sea  $\{N(t), t \geq 0\}$  un PNM en donde  $N(t)$  es el numero de clientes en el sistema; la llegada de un cliente se interpreta como un nacimiento y la salida de un cliente despues de completar su servicio se interpreta como una muerte. Varios tipos de sistemas de espera pueden obtenerse seleccionando adecuadamente los parametros de nacimiento y muerte. Uno de estos sistemas son las colas Poissonianas, las cuales reciben este nombre debido a que, bajo hipotesis adecuadas, el proceso de arribos y el proceso de servicios pueden considerarse como procesos de Poisson, o equivalentemente como procesos de renovacion con tiempos entre arribos distribuidos exponencialmente.



A continuacion se presentan los 2 tipos de colas Poissonianas mas comunmente utilizados en modelos de redes de computadoras.

#### 2.4.1 SISTEMA M/M/1

Los tiempos entre arribos de este tipo de sistemas son VAs IID exponencialmente con parametro  $\lambda$ :

$$A(t) = P\{\tau \leq t\} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (2.19)$$

y los tiempos de servicio son tambien VAs IID exponencialmente con parametro  $\mu$ :

$$B(t) = P\{\sigma \leq t\} = \mu e^{-\mu t}, \quad t \geq 0 \quad (2.20)$$

se supone ademas que los tiempos de servicio son independientes de los tiempos de arribo. Con esto se tiene un PNM cuyas intensidades de transicion pueden verse en la figura 2. En estado estacionario, el numero esperado de clientes en el sistema es:

$$E(N) = L = \rho/(1-\rho) \quad (2.21)$$

ademas, el tiempo que pasa un cliente en el sistema estara definido como:

$$W = W_q + W_s \quad (2.22)$$

donde  $W$  es el tiempo esperado en el sistema,  $W_q$  es el tiempo esperado en la cola y  $W_s$  es el tiempo esperado de servicio ( $E(s)$ ). Utilizando la famosa formula de Little :

$$L = \lambda W \quad (2.23)$$

que intuitivamente nos dice que en estado estacionario, un cliente que llega al sistema debe encontrar el mismo numero promedio de clientes ( $L$ ) que deja atras al completar su servicio y salir del sistema, puede obtenerse, utilizando la ecs. (2.12), (2.21) y (2.23) que:

$$W = 1/(\mu-\lambda) \quad (2.24)$$

donde se aprecian de nuevo las condiciones de estabilidad del sistema de espera, ya que si  $\rho > 1$ , el número esperado de clientes  $L \rightarrow \infty$  así como el tiempo que se pasa en el sistema  $W \rightarrow \infty$ .

#### 2.4.2 SISTEMA M/M/c CON PERDIDA O SISTEMA M/M/c/c

En este caso el sistema de espera tiene  $c$  servidores pero no tiene capacidad de almacenamiento. Se le conoce como sistema M/M/c con pérdida debido a que si un cliente llega cuando todos los servidores están ocupados, ese cliente se "pierde" porque no se le permite esperar a recibir servicio.

Este sistema puede describirse como un PNM con parámetros:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & \text{para } n=0,1,\dots,c-1 \\ 0 & \text{para } n \geq c \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & \text{para } n=0,1,\dots,c \\ 0 & \text{para } n \geq c+1 \end{cases} \quad (2.26)$$

cuyas intensidades de transición pueden apreciarse en la figura 3. El proceso tiene un espacio de estados finito  $S=\{0,1,\dots,c\}$  y puede verse que posee una distribución llamada de Poisson truncada [10], de la cual puede obtenerse uno de los parámetros que se utilizan para describir este tipo de sistemas. Este parámetro recibe el nombre de "probabilidad de bloqueo" y representa la probabilidad de que todos los servidores estén ocupados y de que un cliente que llegue al sistema se pierda. A esta expresión se le conoce también con el nombre de "fórmula B de Erlang" o "fórmula de pérdida de Erlang" y está dada por:

$$B(c, \rho) = \frac{\rho^c / c!}{\sum_{n=0}^c \rho^n / n!} \quad (2.27)$$

o tambien como:

$$\begin{cases} B(0, \lambda) = 1 \\ B(c, \lambda) = \frac{\lambda B(c-1, \lambda)}{c + \lambda B(c-1, \lambda)} \end{cases} \quad (2.28)$$

En este caso se tiene que:

$$L = \rho [1 - B(c, \rho)] \quad (2.29)$$

de donde se obtiene la tasa promedio "efectiva" de arribos al sistema que esta dada por:

$$\lambda_a = \lambda [1 - B(c, \rho)] \quad (2.30)$$

Esta tasa es menor que  $\lambda$  debido a que algunos de los arribos son rechazados cuando todos los servidores estan ocupados. Estas características hacen que en este caso:

$$W = 1/\mu \quad (2.31)$$

## 2.5 GENERACION DE NUMEROS ALEATORIOS

Generalmente en todos los sistemas de computo se tiene alguna funcion para calcular numeros aleatorios con distribucion uniforme. Para generar numeros aleatorios con una distribucion especifica se utiliza el principio de conservacion de la probabilidad, que dice: "Si se desea relacionar  $P(x)$  con  $P'(y)$  donde la primera es cualquier distribucion de probabilidad y la ultima es una distribucion uniforme, debe encontrarse la forma de generar la VA  $x$  a partir de la VA  $y$ . Esto se logra utilizando el hecho de que la probabilidad de que una VA

con distribución  $P'(y)$  este entre  $(y, y+dy)$  es la misma que una VA con distribución  $P(x)$  este entre  $(x, x+dx)$ " [9]. Esto puede expresarse como:

$$P(x)dx = P'(y)dy \quad (2.32)$$

integrando la ec. (2.32) se tiene:

$$\int_0^x P(x)dx = \int_0^y P'(y)dy \quad (2.33)$$

o bien:

$$P(X < x) = P'(Y < y) \quad (2.34)$$

ademas, se sabe que en una distribución uniforme:

$$P'(Y < y) = y \quad (2.35)$$

por lo que substituyendo la ec. (2.35) en la ec. (2.34) se obtiene:

$$P(X < x) = y \quad (2.36)$$

Por ejemplo, si se desean encontrar numeros aleatorios distribuidos exponencialmente, se substituye la ec. (2.11) en la ec. (2.36) y se obtiene

$$1 - e^{-\lambda x} = y \quad (2.37)$$

con la cual, despejando la VA  $x$ , se pueden encontrar numeros aleatorios distribuidos exponencialmente (basados en la distribución uniforme) de la siguiente manera:

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-y) \quad (2.38)$$

## 2.6 PROGRAMACION MATEMATICA

El problema que se encuentra al diseñar redes consiste en optimizar el desempeño utilizando alguno de los parametros de la red (costo, retardo, conductividad, etc.), sujetandose a las restricciones impuestas por un determinado grupo de variables (ejemplo: capacidad). La solución a este problema depende de la habilidad para expresar la

funcion objetivo y las restricciones en una forma analitica que pueda ser manejada en funcion de las variables de diseño. Desafortunadamente, la mayoría de estas expresiones son bastante complejas y se requiere de aproximaciones (ejemplo: linealizar el costo) o simplemente de tecnicas heurísticas para encontrar una solucion.

Cuando las variables de diseño son continuas, se pueden utilizar metodos de solucion como [8]:

1. Programacion lineal.
2. Optimizacion Lagrangiana: como ejemplo se tiene la asignacion de capacidades por el metodo de la raiz cuadrada (que se vera en el siguiente capitulo).
3. Optimizacion de flujo de multicomodidades: en el cual se optimiza la distribucion de flujos de comodidades (en nuestro caso, flujo de paquetes) a traves de la red. Este metodo sera una de las bases para el planteamiento general del problema de diseño de redes.
4. Metodo de proyeccion del gradiente.

En el caso en que se tengan variables de diseño discretas, pueden utilizarse metodos como [8]: (1) Programacion dinamica, (2) Descomposicion Lagrangiana, y (3) Metodo de optimizacion local ("branch and bound").

## 2.7 TECNICAS HEURISTICAS

A una tecnica que produce rapidamente una buena solucion pero que no es necesariamente la optima se le llama tecnica heurística. Estas tecnicas son frecuentemente la unica solucion posible para algunos de los problemas de diseño relacionados con grandes redes [1], [8].

La filosofía de este tipo de técnicas consiste en identificar una condición necesaria (aunque generalmente no suficiente) para la optimalidad y buscar que se cumpla por medio de repetidas transformaciones a las variables de diseño. Para explorar las diferentes posibilidades se empieza esta búsqueda con diferentes configuraciones del problema seleccionadas aleatoriamente, mejorando con esto la probabilidad de éxito de la técnica heurística, además de que al obtener varias soluciones "óptimas" es posible escoger aquella que cumpla con alguna de las otras variables de diseño (ejemplo: la más barata).

Una de las técnicas más importantes para el diseño de redes es la de diseño topológico que se utiliza frecuentemente para encontrar la configuración de la red que mejor cumpla con ciertas características de conectividad (ejemplo: siempre existan por los menos 2 caminos diferentes hacia un nodo).

## 2.8 SIMULACION

En ciertas ocasiones, las técnicas analíticas de modelado son inadecuadas para manejar la gran cantidad de detalles de un sistema, por lo que en este caso se utiliza la simulación. Generalmente, se implementan "prototipos" del sistema que se ejercitan bajo diferentes conjuntos de datos para definir problemas específicos en el modelo y mediante los resultados de la simulación es posible afinar las suposiciones hechas al plantear el prototipo. Con este propósito existen técnicas para garantizar la exactitud del modelo y sus resultados, que normalmente son comparaciones con resultados obtenidos mediante técnicas analíticas o con mediciones de esos

parametros en un sistema real que funciona bajo las mismas condiciones de simulacion [8],[11]; esto es, mucha de la complejidad que no puede ser manejada en modelos analiticos aparece en la simulacion como parametros a los que se les asigna cierto valor. Esto permite predecir el comportamiento de la red empiricamente.

Se considera al prototipo como una coleccion de elementos que interactuan entre si, cuyas propiedades cambian con el tiempo. Generalmente se les llama a estos elementos entidades y a sus propiedades atributos.

En el caso de redes de computadoras se utilizan modelos discretos de simulacion en los cuales los cambios ocurren instantaneamente al transcurrir el tiempo de simulacion y son reflejados como fluctuaciones discontinuas \*. Todo modelo discreto consiste de 4 elementos principales:

1. Componentes: Representan elementos como maquinas, mensajes, etc. que pueden encontrarse en diferentes estados (ejemplo: ocupado, libre o esperando). Estos elementos interactuan uno con el otro resultando en cambios en el estado del sistema y a estas interacciones se les llama eventos.
2. Flujo del tiempo: El tiempo es la variable basica de control ya que todo lo que ocurre en el modelo esta programado de acuerdo al tiempo de simulacion.
3. Estados del modelo: Reflejan el comportamiento del prototipo. El proceso de simulacion puede considerarse como una serie de tiempo

-----  
 \* A diferencia de modelos continuos que consisten de ecuaciones algebraicas y diferenciales cuyos cambios estan representados por curvas continuas suaves.

de estados observados del modelo durante el tiempo de simulación.

4. Recolección de datos: El comportamiento de los prototipos simulados (que es el principal objeto de nuestro estudio) puede describirse como un conjunto de datos que reflejan el efecto de los eventos que han tenido lugar durante el periodo de simulación. Por ejemplo pueden obtenerse valores promedio de variables de estado, el estado final del sistema, etc.

Uno de los métodos más comunes para manejar el flujo del tiempo es el de rastrear los eventos del sistema que representan cambios en el estado del mismo, ya que entre estos eventos el estado del sistema permanece constante. Después de realizar todos los cambios en el estado del sistema, el tiempo es "avanzado" hasta el tiempo del siguiente evento, en el cual se realizan los nuevos cambios. Esta técnica recibe el nombre de simulación discreta controlada por eventos o simplemente simulación de eventos discretos.

Es conveniente señalar que las estadísticas generadas por una simulación no son muy exactas debido a que son derivadas mediante ejemplos altamente correlacionados. La interpretación de estos ejemplos debe hacerse mediante un análisis de series de tiempo en lugar de la estadística clásica ya que esta última requiere de un gran número de muestras independientes que en la mayoría de los casos son difíciles de obtener debido al costo de simulación. Por esto debe intentarse obtener muestras representativas de la red en las cuales se tenga una buena confiabilidad.

Un esquema alternativo es dividir la simulación en varios intervalos cuyas estadísticas se reúnen por separado y que se suponen



independientes uno del otro. Esta independencia se logra encontrando los llamados "puntos regenerativos" a los cuales se cree que el sistema regresa periodicamente y que el comportamiento despues de estos puntos es independiente de aquel que se encontro antes de llegar a ellos. Por esto al tomar muestras separadas entre cada ciclo, pueden lograrse las muestras independientes que permiten el uso de la estadistica clasica.

### 3. EL PROBLEMA DE DISEÑO DE REDES DE COMPUTADORAS

Hasta este momento se han manejado ciertos conceptos utiles para dar un panorama general de las redes de computadoras. A continuacion se procede a formalizar estos conceptos, ademas de introducir algunos otros, para plantear el problema de diseño de redes.

Es conveniente definir cada uno de los elementos que componen a una red (algunos de los cuales ya fueron mencionados anteriormente), ademas de algunos parametros importantes que se manejaran en el diseño. Estos son:

1. Red: una coleccion finita de nodos conectados entre si por ramas.
2. Nodo: un centro de comunicacion que recibe, almacena y transmite mensajes.
3. Rama: un canal de comunicacion con un solo sentido.
4. Mensaje: especificado por su origen, destino, tiempo de llegada, longitud y tipo de prioridad.
5. Estrategia de enrutamiento: una regla de decisi3n que se ejerce cuando un mensaje es enrutado de un nodo a otro.
6. Cola: una linea de espera compuesta de mensajes.
7. Disciplina de servicio: una regla de prioridades que determina la posicion relativa de un mensaje en la cola.
8. Retardo: tiempo total que un mensaje pasa en la red.
9. Matriz de trafico: cada elemento de esta matriz (apuntado por  $ij$ ) describe el numero promedio de mensajes generados por segundo que tienen al nodo  $i$  como origen y al nodo  $j$  como destino.

Para establecer un modelo con el cual pueda analizarse y diseñarse una red, se cuenta con los siguientes parámetros:

1. Retardo promedio por mensaje.
2. Capacidad total para manejar tráfico.
3. Estrategia de enrutamiento.
4. Disciplina de prioridades (en que forma se presentan y como se manejan).
5. Capacidad de almacenamiento en cada nodo.
6. Capacidad de transmisión de cada rama.
7. Topología de la red.
8. Costo total del sistema.

El modelo debe expresar el comportamiento fundamental (bajo ciertas simplificaciones e idealizaciones) del tipo de redes que hemos mencionado; además, debe mantener el tratamiento matemático del problema lo más simple posible, sin esto afectar las características esenciales que "simulan" al sistema real. Teniendo esto en mente, es posible realizar las siguientes suposiciones al plantear el problema de diseño de redes [3]:

1. Los canales de comunicación se consideran ideales (sin ruido, invulnerables a daños, etc.).
2. Los conmutadores se consideran ideales (no introducen ruido ni retardo).
3. Se ignora el encabezado del paquete (en CP) o el tráfico de señalización (en CC) debido a que sus efectos en el desempeño de una red real son despreciables.
4. Existe una capacidad infinita de almacenamiento en cada nodo, por

lo que un mensaje debiera llegar a su destino despues de cierto tiempo.

5. No se conoce el tiempo de llegada ni la longitud de cada mensaje; sin embargo, estos pueden describirse como variables aleatorias exponencialmente distribuidas, ya que bajo ciertas condiciones, esta distribucion representa fielmente el proceso de arribo de mensajes (ver cap. 2). Esencialmente, la caracteristica que nos permite hacer esta suposicion es la mezcla de mensajes generados por diversas fuentes dentro de la red que hace que cada mensaje pueda tratarse en forma independiente. \*
6. La red se encuentra en estado estable. Esto se debe a que de lo contrario seria muy dificil caracterizar su comportamiento, ademas de que los modelos probabilisticos (colas, procesos estocasticos, etc.) solo pueden ser aplicados a este tipo de sistemas ya que describen sistemas que no varian con el tiempo.

Tomando en cuenta todos estos detalles el problema de diseño de redes de computadoras puede caracterizarse de la siguiente manera [1]:

Dadas:

Matriz de Trafico ( $\lambda_{ij}$ ).

Matriz de Costo ( $d_{ij}$ ): costo de la linea que comunica al lugar  $i$  con el  $j$ .

Con las restricciones de desempeño:

Confiabilidad.

Costo Total.

Teniendo como variables a:

Topologia.

-----  
\* A esta caracteristica se le conoce como la suposición de independencia y sera estudiada detalladamente mas adelante.

Capacidad de cada línea de transmisión.  
Asignación de flujos (mediante la estrategia de enrutamiento y la disciplina de espera).

Debe:

Minimizarse el retardo (en CP) o la probabilidad máxima de bloqueo (en CC).

Al definir al retardo o la probabilidad máxima de bloqueo como una medida del desempeño es posible buscar una solución óptima al problema de diseño. Sin embargo, existen parámetros (denominados como "parámetros en conflicto") que están íntimamente relacionados entre sí y que al mejorar uno se degrada el otro. Esto ocasiona que una solución óptima para cierto parámetro represente un desempeño muy pobre para el parámetro con el que se encuentra en conflicto.

Como ejemplos se tienen a:

1. El retardo y la conductividad: idealmente se desea que una red pueda manejar cualquier cantidad de mensajes por segundo (conductividad muy grande) pero intuitivamente puede verse que llegará un momento en el cual la red se satura y la conductividad empieza a disminuir y el retardo a aumentar [1]. Esto significa que teniendo una capacidad fija debe encontrarse un punto medio entre la conductividad que se requiere y el retardo máximo deseado.
2. El costo y el retardo: esto se debe a que el costo de cada línea depende de la capacidad deseada de transmisión y para disminuir el retardo deben escogerse líneas más rápidas (por lo tanto con más capacidad), teniendo como consecuencia que al disminuir el

retardo se incrementa el costo y viceversa. Tambien en este caso la solucion es encontrar un compromiso en el que se pueda obtener el mejor desempeño de cada uno de los parametros.

Otra solucion posible a estos conflictos es dividir el problema en varios subproblemas, tratando cada uno de ellos en forma independiente, "congelando" las variables de los subproblemas restantes para encontrar una solucion parcial (o localmente) optima. Por ejemplo, para encontrar una red confiable que presente la mejor combinacion de flujos entre nodos se utiliza un analisis de conectividad basado en la teoria de graficas ([1] cap 3). El diseño de la red se basa en la posibilidad de que algun nodo quede aislado debido a alguna falla en una linea, por lo que se asegura que siempre habra por lo menos un camino que conecte a cada nodo. En este caso se congelan el costo y el retardo para configurar la red (o mas bien se consideran fijos en un valor dado). A su vez, al realizar el analisis de retardo y costo de la red se considera alguna topologia dada sin importar su confiabilidad. Debido a la complejidad del problema en conjunto, se escogio al analisis de retardo como un indicador de un buen diseño, sin esto indicar que una red optima puede ser diseñada basandose unicamente en este indicador.

El problema puede caracterizarse de la siguiente forma [3]: "Una solucion optima al problema de diseño es aquella que minimize el retardo promedio del mensaje dado un costo total fijo de la red. El costo total puede expresarse como:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (3.1)$$

donde  $D$  es el costo total,  $n$  es el número de líneas y  $D_i$  esta dada

por:

$$D_i = f(d_i, C_i) \quad (3.2)$$

donde  $d_i$  es el costo de la línea  $i$  y  $C_i$  es la capacidad de la línea  $i$ ".  $D_i$  es una función que refleja el costo de cada unidad de capacidad (que se mide en bps). Un ejemplo de esta función es [4]:

$$D_i = 0.61 (40.05 + d_i^{0.973}) C_i^{0.728} \quad (3.3)$$

Comunmente se escoge que  $D_i$  represente la longitud del canal, con lo que se tiene que:

$$D_i = d_i C_i \quad (3.4)$$

La función de la ec. (3.4) asocia linealmente el costo del canal con su capacidad, resultando en una disminución de complejidad matemática de la función objetivo. Finalmente el problema queda expresado de la siguiente forma:

"Debe minimizarse:

$$T = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_i / \gamma \quad (3.5)$$

(donde  $T$  es el retardo promedio de la red,  $T_i$  es el retardo promedio introducido por el canal  $i$ ,  $\lambda_i$  es el número promedio de mensajes que entran al canal  $i$  por segundo y  $\gamma$  es el total de llegadas de mensajes a la red), utilizando alguna de las variables como: asignación de capacidades, estrategia de enrutamiento, disciplina de control de flujo o topología, teniendo como restricción a la ec. (3.4)."

Es conveniente delimitar la responsabilidad de cada variable en el diseño, tomando en cuenta que siempre habrá una relación entre ellas. A continuación se define cada una de ellas, tratando también de explicar cómo se realiza la optimización utilizando esa variable.

### 3.1 ASIGNACION DE CAPACIDADES

Esta asignacion debe proveer a la red de un grado especifico de servicio a traves de la capacidad de cada linea. La capacidad es un factor critico en redes con CP ya que esta determina el retardo en el cual se basa el diseño. En cambio en redes de CC se sabe que la linea debe estar ajustada a las necesidades del usuario; por ejemplo: si se esta transmitiendo voz digitalizada a 4800 bps deberan proveerse lineas con multiplos enteros de esta capacidad, por lo que el problema de asignacion de capacidades en CC es trivial. Es por esto que existen diferentes estrategias para asignar la capacidad de una red de CP [5].

Estas son:

1. Capacidad proporcional a la raiz cuadrada del flujo que las atraviesa.
2. Capacidad identica en toda la red.
3. Capacidad proporcional al trafico que atraviesa cada rama.
4. Metodo Min-Max (o de Chebyshev) en el cual se asignan capacidades de tal forma que se minimiza el mayor retardo esperado. Esto equivale a crear una red con retardos identicos en cada linea.

El uso de cada estrategia depende de las características del desempeño que se requerira de la red bajo ciertas condiciones. Sin embargo existen 2 factores importantes que afectan a cada metodo de asignacion. Estos son:

1. La estrategia de enrutamiento: determina el trafico "conjunto" que fluira entre 2 nodos. Este trafico depende directamente de las rutas que se escojan para enviar mensajes de un nodo a otro.



2. La suposición de independencia: asume que cada mensaje que arriba a un nodo de la red es independiente del tráfico que aparece en cualquier otro punto de la red. Esto significa que cada vez que un mensaje arriba a un nodo de la red, el modelo lo considera como un nuevo mensaje aun cuando su origen sea otro nodo de la red; por esto se dice que el mensaje no "recordara" su historia dentro de la red. Esta suposición elimina la dependencia entre los tiempos de llegada y las longitudes de mensajes que viajan en la red, trayendo como consecuencia que estos pueden ser considerados como variables aleatorias con distribución exponencial. Aun cuando esta idea no corresponde a la realidad dentro de una red, se ha comprobado por medio de simulaciones que debido a la independencia de las fuentes externas y de que las fuentes "internas" (nodos de la red) poseen diversos caminos de comunicación entre ellos, el modelo matemático resultante es muy semejante a la realidad.

Tomando estos factores en cuenta, el tráfico que circula en cada rama tiene como componentes a: (1) El tráfico que tiene como destino a uno de los nodos conectados por esa rama y (2) El tráfico que utiliza como nodo auxiliar a uno de los nodos conectados por esa rama y que esta destinado a otro nodo. Esto se expresa como:

$$\lambda_i = \sum_j \gamma_{jk} \quad (3.6)$$

donde  $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  es el número de nodos y  $\gamma_{jk}$  es el tráfico que va del nodo  $j$  al nodo  $k$  que atraviesa la rama  $i$ . El tráfico total que se presenta en la red es:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.7)$$

y el numero total de mensajes que entran a la red es:

$$\gamma = \sum_{jk} \gamma_{jk} \quad (3.8)$$

con lo que puede calcularse el numero promedio de nodos que atraviesa un mensaje dado por:

$$\bar{n} = \lambda/\gamma \quad (3.9)$$

Este parametro sera util para comparar el desempeño logrado por cada una de las estrategias de asignacion de capacidades. Sin embargo, la asignacion no solo depende del trafico en cada linea ( $\lambda_i$ ) sino tambien depende del retardo en la transmision de cada mensaje. Este retardo puede calcularse con la ec. (2.24) ya que se ha supuesto que cada nodo constituye un sistema de espera M/M/1. Con esto se tiene que:

$$T_i = 1/(\mu_i C_i - \lambda_i) \quad (3.10)$$

Gracias a la suposicion de independendencia puede simplificarse aun mas el analisis, ya que en lugar de tener una longitud media de mensajes en cada rama ( $\mu_i$ ) se tiene una longitud media de los mensajes en toda la red ( $\mu$ ).

Incorporando estos resultados a las estrategias de asignacion de capacidades, puede verse que la capacidad optima, segun el metodo de la raiz cuadrada esta dada por [4]:

$$C_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \frac{C(1-\rho) \sqrt{\lambda_i/\mu_i}}{\sum_j \sqrt{\lambda_j/\mu_j}} \quad (3.11)$$

en donde se tiene que:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3.12)$$

y

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu C} \quad (3.13)$$

La ec. (3.12) indica que la capacidad total de la red esta fijada de antemano. Substituyendo las ecs. (3.12) y (3.13) en la ec. (3.11) se tiene que:

$$C_i = \frac{1}{\mu} [\lambda_i + (\mu C - \lambda) \frac{\sqrt{\rho_i}}{\sum_j \sqrt{\lambda_j}}] \quad (3.14)$$

La segunda estrategia, que recibe el nombre de asignacion uniforme de capacidades, asigna capacidades identicas a cada una de las ramas de la red, esto es:

$$C_i = C/N \quad (3.15)$$

La tercera estrategia, que recibe el nombre de asignacion proporcional, indica que la capacidad debe ser proporcional a la demanda de trafico en cada rama, o sea:

$$C_i = \frac{\lambda_i}{\lambda} C \quad (3.16)$$

Uno de los problemas mas criticos con las estrategias proporcionales (1 y 3) es la desventaja que representa la diferencia tan marcada entre retardos y capacidades entre ramas con mucho y poco trafico, ya que a una rama con poco trafico se le asigna poca capacidad (provocando un mayor retardo) mientras a una rama con mucho trafico (comparado con el trafico total) se le asigna una buena proporcion de la capacidad [5]. Para evitar este fenomeno, se encontro un criterio intermedio en el que domina el retardo promedio mas grande. Esta estrategia recibe el nombre de criterio de Chebyshev

o Min-Max (debido a que minimiza el retardo máximo) que dice:

$$C_i = \frac{1}{\mu} \left[ \lambda_i + \frac{\mu C - \lambda}{N} \right] \quad (3.17)$$

En esta ecuación puede notarse que si  $\rho \ll 1$ , entonces  $\lambda_i \ll \mu C_i$ , con lo que se tiene la asignación uniforme ( $\mu C_i = \mu C / N$ ). En cambio si  $\rho \rightarrow 1$ , entonces  $\lambda_i \approx \mu C_i$ , que es esencialmente la asignación proporcional. Esto demuestra que el criterio cumple con los requisitos propuestos.

Cada estrategia de asignación proporciona un enfoque distinto del problema. Si solo interesa optimizar el retardo promedio de la red sin tomar en cuenta el retardo en cada rama, pueden utilizarse las estrategias 1 o 3. Si el retardo no es crucial para el diseño pero interesa tener una distribución uniforme de capacidad, favoreciendo a los nodos con poco tráfico, debe utilizarse la estrategia 2 o 3. Por último, si se busca una red que favorezca al usuario al proporcionarle un retardo aceptable en todos los nodos, además de no desperdiciar capacidad al balancear la asignación entre los usuarios con mucho tráfico y los usuarios con poco tráfico, deberá utilizarse la estrategia 4.

### 3.2 ESTRATEGIA DE ENRUTAMIENTO

Una propiedad inherente a las redes de computadoras debe ser la rapidez con la que puedan reconfigurarse en caso de algún cambio en su topología. Se han concebido varias técnicas de enrutamiento que proporcionan esta propiedad [6], [7].

El problema de enrutamiento está distribuido en el espacio y en tiempo y consiste en la asignación óptima de los recursos de transmisión para mandar una cierta cantidad de mensajes, minimizando

algun parametro de desempeño de la red. Este hecho ocasiona que deba encontrarse alguna forma de caracterizar globalmente la carga de la red para tomar una decision adecuada al reconfigurar la red

La constante de tiempo de este tipo de sistemas es pequeña y el control debe realizarse con informacion promedio del desempeño obtenida anteriormente. Por esto cada tecnica debe desempeñar las siguientes funciones:

1. Encontrar el estado global de la red basandose en reportes del estado (fallas, congestionamientos, etc.) de cada uno de los componentes de la red.
2. Encontrar rutas optimas basadas en el estado global.
3. Modificar las tablas de enrutamiento de cada componente de la red.

Ademas, cada tecnica debera tener como proposito:

1. La operacion eficiente de la red (que no haya recursos sobrecargados mientras existan otros que esten casi libres).
2. Realizar un enrutamiento preciso basado en informacion desconocida de trafico.
3. Adaptarse rapida y correctamente a cambios en la topologia.
4. Debera evitar ciclos y puntos muertos (cuando un nodo transmite un mensaje hacia otro nodo el cual lo enruta hacia el primero).

Estas tecnicas pueden clasificarse en 4 grandes grupos:

1. Centralizadas: utilizan una autoridad central que dicta las decisiones de enrutamiento a cada uno de los nodos en respuesta a las condiciones reportadas de la red.
2. Distribuidas: utilizan el intercambio de informacion entre nodos para que cada uno obtenga sus decisiones de enrutamiento; por

ejemplo, cada nodo transmite su retardo estimado de transmisión hacia todos los demás nodos. Al recibirlo, cada nodo actualiza sus estimaciones y a su vez también las transmite, con lo que dependiendo de la periodicidad del intercambio, cada nodo tiene una tabla "actualizada" de lo que está pasando en la red (por ejemplo: si una línea se daña, el retardo estimado tenderá a infinito, por lo que todos los nodos escogerán otro camino).

3. Aisladas: cada nodo opera independientemente haciendo uso exclusivo de datos locales (ejemplo: la longitud de la cola en cada línea) para adaptarse a condiciones cambiantes.
4. No-Adaptivos o Fijos: no existen ajustes debidos a condiciones de la red ya que este se define al construirla.

En todas las técnicas anteriores se obtendrá un mejor desempeño si el intervalo de actualización se hace pequeño. Sin embargo cada técnica responde de cierta manera a determinadas situaciones de la red. En una red balanceada y estable es recomendable usar un algoritmo no adaptivo, ya que el tráfico estará "naturalmente" balanceado, por lo que el intercambiar tablas de estimaciones es solamente un desperdicio de capacidad. En cambio, en redes no balanceadas, las técnicas centralizadas operan eficientemente la red debido a que conocen el estado de toda la red para tomar decisiones. Sin embargo, debido a la gran cantidad de información que recibe el centro de enrutamiento, las actualizaciones no pueden realizarse en un intervalo pequeño de tiempo, con lo que este tipo de técnicas responde muy lentamente a cambios en la topología. Como caso contrario, una estrategia distribuida responde rápidamente a cambios de topología de

la red (dependiendo de la cercanía de la falla), pero al no conocer el estado global de la red no es capaz de tomar decisiones optimas.

Para tomar ventaja de las diferentes estrategias se han diseñado estrategias "hibridas" (ejemplo: enrutamiento delta [7]). En estas tecnicas los nodos intercambian informacion para tener una rapidez de configuracion aceptable; sin embargo, cada determinado tiempo tambien reportan su condicion a un control central. Si este ultimo nota un cambio considerable en las condiciones de la red, las nuevas tablas seran proporcionadas por el control central, de lo contrario el control se mantiene en forma distribuida.

### 3.3 DISCIPLINA DE CONTROL DE FLUJO

Al incrementar la carga de la red llega un momento en que la capacidad no es suficiente y los mensajes empiezan a acumularse en los concentradores (se congestiona la red). Esta congestion se retroalimenta empeorando cada vez mas las condiciones de toda la red; por ejemplo: un concentrador congestionado no puede recibir mensajes por lo que los nodos que quieren comunicarse con ese concentrador deben esperar a que esta condicion desaparezca. Esto ocasiona que estos nodos tambien se congestionen, llegando rapidamente a un punto en que la red esta completamente saturada.

Para evitar esta situacion existen varias disciplinas para controlar el flujo entre los concentradores[1]. Estas son:

1. Asignacion previa de recursos: extrañamente esta es la disciplina utilizada por CC, ya que en el momento en que se detecta algun congestionamiento en la red (no hay capacidad de transmision), se le avisa al usuario que no se aceptaran mas mensajes dirigidos a

- esa region de la red (bloqueo "virtual").
2. Desecho de paquetes: en el caso de llegar al limite de la capacidad, el concentrador simplemente descarta el nuevo mensaje, indicandoselo al usuario para que este intente en otro momento.
  3. Control Isaritmico: este metodo mantiene un numero constante de paquetes en la red. Esto se logra con un numero fijo de "permisos" que son asignados a mensajes que llegan a la red. En caso de que un mensaje no consiga un permiso, no podra circular en la red y debera esperar hasta obtener uno o bien sera descartado.
  4. Paquetes ahogadores: este es un mecanismo que funciona al detectar un congestionamiento. Cada concentrador mantiene el porcentaje de utilizacion ( $p$ ) de sus lineas; en caso de que alguna sobrepase el umbral permitido, se transmite un paquete especial que indica al nodo que utiliza esa linea que disminuya su trafico. Este tipo de paquete se sigue mandando hasta que el porcentaje de utilizacion regrese a su valor permitido. Al no detectar la congestion, los nodos resumen su actividad normal.

### 3.4 TOPOLOGIA

Uno de los requerimientos de las redes de computadoras es que sean confiables, aun cuando existan fallas en algunos de sus componentes. Esto se logra al configurar una red suficientemente redundante que siga funcionando a pesar de las fallas (aunque a un nivel de desempeño mas bajo).

Las soluciones propuestas se basan en tecnicas heurísticas que generalmente arrojan buenos resultados. Estas tecnicas son [1][4]:



1. Metodo de Intercambios: se empieza con alguna configuracion arbitraria hasta que se llega a un minimo local por medio de transformaciones. Estas transformaciones se hacen de la siguiente manera:
  - a. Se añaden y desechan lineas de tal forma que se mantengan las restricciones de conectividad.
  - b. Se asignan los flujos y capacidades. Se calcula el costo de la configuracion y en caso de que esta sea mejor, se acepta la nueva topologia.
  - c. Si no se han realizado todas las posibles transformaciones locales se ejecuta de nuevo el paso a. En caso contrario se encontro alguna configuracion optima.
2. Metodo de Eliminaciones: este metodo es fundamentalmente el metodo de intercambios sustituyendo el paso a por:
  - a. Se asigna una capacidad 0 a las lineas que se quieren eliminar.

Para realizar el analisis de conectividad se utiliza el peor comportamiento de la red y se busca una red que tenga una probabilidad menor que  $P$  de quedar con algun nodo aislado. En esta tecnica se utilizan simulaciones de eventos discretos de tipo Monte-Carlo en las cuales se obtiene el valor de esta probabilidad. Con esto el diseñador puede agregar o quitar lineas de la red e intentar de nuevo la simulacion para ver el resultado.

Es conveniente mencionar que el problema de diseño ha sido estudiado principalmente para redes de CP aun cuando la mayoría de los conceptos presentados en este capitulo pueden ser aplicados facilmente a redes de CC.

#### 4. MODELADO DE REDES

Una gran variedad de herramientas matemáticas han sido aplicadas para modelar redes de computadoras [8]; particularmente, se utilizan varios aspectos de la teoría de procesos estocásticos para entender el comportamiento del sistema cuando se incrementa su utilización, además de predecir el comportamiento de redes bajo ciertas condiciones. Se han aplicado modelos de procesos Markovianos para estudiar los procedimientos para controlar el flujo y técnicas de optimización para determinar la estrategia de enrutamiento.

Con todo esto se logra un muy buen análisis de estas redes, pero hay ocasiones en las cuales deben abandonarse estas técnicas analíticas para dar paso a la simulación. Esto se debe principalmente a que la teoría aun no puede tratar situaciones reales (ejem: evitar el uso de la suposición de independencia); es más, la mayoría de los sistemas que se han implementado fueron estudiados por medio de simulaciones antes de ser construidos. Es importante mencionar que aun cuando los resultados de estas simulaciones han abierto el horizonte de las redes de computadoras, es conveniente tomar en cuenta que estos resultados están basados en suposiciones que violan las leyes de la estadística, por lo que deberán analizarse cuidadosamente sus rangos de confiabilidad.

En este capítulo se presentan las características de de redes con cada uno de los tipos de conmutación y su representación en modelos matemáticos con lo que será posible realizar el análisis y la simulación.

## 4.1 CONFIGURACION FISICA

### 4.1.1 REDES CON CONMUTACION DE PAQUETES

Una de las primeras redes de computadoras que introdujeron la CP como base para sus transmisiones fue la red ARPA que conecta a varias universidades e industrias militares de los Estados Unidos. La investigacion hecha para la construccion de esta red ha proporcionado la base teorica y practica de la mayoria de los sistemas actuales, por lo que se presenta la configuracion de esta red como representativa de este tipo de redes.

Generalmente se utilizan minicomputadoras para conectar al posible usuario (una computadora o terminal) con la red, ademas de tener como funcion almacenar los mensajes y realizar la conmutacion. Estas minicomputadoras reciben diversos nombres como: procesador de comunicaciones, concentrador programable, concentrador de mensajes o interfaz procesadora de mensajes, pero el mas comunmente utilizado es el de IMP (Interface Message Processor). Los IMPs realizan las siguientes funciones:

1. Aceptan los mensajes que les mandan las terminales o los sistemas de computo conectados a ellos para ser transmitidos en la red.
2. Recodifican el mensaje a un formato estandarizado de mensajes que es de uso universal a traves de la red.
3. Almacenan los mensajes mientras estos esperan su transmision (ya sean nuevos mensajes o mensajes que estan en transito hacia otros IMPs).
4. Dividen el mensaje en pequeños bloques llamados paquetes a los cuales se les agregan caracteres de direccion, control y chequeo

de errores.

5. Almacenan tablas de enrutamiento que son utilizadas para determinar el siguiente concentrador en la ruta de un mensaje hacia su destino final.
6. Llevan a cabo el chequeo de errores. Transmiten y reciben mensajes de reconocimiento como parte de un procedimiento de detección de errores y retransmisión; además, proveen la función de control de flujo para aliviar una posible congestión en el tráfico de la red.

Para un buen funcionamiento de la red deben encontrarse tamaños adecuados de paquetes, ya que en caso de ser muy largos provocarían un retardo que se acumula al retransmitirlos y en el caso de ser muy cortos se tiene una utilización pobre de los recursos de transmisión. Se encontró que el tamaño máximo "óptimo" de un mensaje entre un sistema y un IMP debe ser de 8063 bits que puede ser segmentado en 8 paquetes de 1008 bits cada uno [1],[5]. En la práctica, la mayoría de los mensajes se transmiten en un solo paquete por lo que se ahorra tiempo al no tener dispersas las diversas partes del mensaje en la red y tener que esperar a que lleguen a su destino.

El contenido de un paquete típico puede verse en la figura 4. En estas redes el carácter SYN se utiliza para delimitar físicamente el inicio y terminación de cada paquete (sincronización) y los caracteres DLE y STX indican el inicio y terminación de la información del paquete. De la información contenida en el paquete el IMP genera los 2 primeros campos (ACK y PACKET HEADER). Este último es el que contiene toda la información con la cual el paquete puede viajar

independientemente y puede verse su contenido en la figura 5. Los 2 siguientes campos (HOST/HOST PROTOCOL y TEXT corresponden al protocolo (o la comunicacion) entre los sistemas de computo conectados a la red y al texto del mensaje respectivamente. El IMP no utiliza o interpreta ninguno de estos campos debido a que corresponden a comunicaciones entre los niveles superiores que estan fuera de la Subred de Comunicaciones, esto significa que el IMP recibe el texto y este es insertado en un esqueleto preparado por el IMP que le permite viajar hacia su destino y que a su vez permite al IMP desempeñar las funciones de los 3 niveles inferiores (ver sec. 1.2).

Existen dos sumas de verificacion que se generan con cada paquete. La primera (generada en el IMP) permite detectar errores del procesador o de la memoria de cada IMP y la segunda (generada por el conmutador) permite la deteccion de errores en las lineas de transmision. Estas sumas se generan en el IMP que recibe el mensaje y se verifican en cada uno de los IMPs que participan en la ruta hacia el destino. En caso de no detectarse ningun error, el IMP que recibio el mensaje genera un mensaje de reconocimiento (ACK) que inserta en el primer mensaje que vaya en direccion contraria, para indicar al IMP transmisor que el mensaje fue recibido correctamente y que este ultimo puede transmitir el siguiente mensaje, ya que de lo contrario transmitira el mismo mensaje y esperara el ACK para verificar que fue recibido correctamente. Sin embargo, ademas de estos reconocimientos de punto a punto de la red se tiene un paquete especial llamado RFNM (Ready For Next Message) que indica al usuario que genero el mensaje que este arribo a su destino correctamente y que puede continuar con

la transmision. Es por esto que se habla tambien de reconocimientos de origen a destino.

Ademas, se han separado campos para indicar diversas propiedades y características de un paquete. Algunos de los campos mas importantes son:

1. Prioridad (PRIORITY): indica si se trata de un paquete de emergencia o de control. Estos paquetes tienen la propiedad de poder "saltar" a los paquetes con mas baja prioridad y asi transmitirse lo mas rapido posible.
2. Reconocimientos (ACK): indica el numero del ultimo paquete recibido correctamente.
3. IMP fuente (SOURCE): contiene la dirección del IMP que genero el mensaje.
4. Numero del mensaje (MESSAGE NUMBER): asignado por el IMP fuente, es un numero que se asigna consecutivamente a cada uno de los mensajes que van del usuario A hacia el usuario B. Los RFNMs se refieren a este numero para indicar una buena recepcion.
5. S/M (single/multiple): indica que el mensaje se compone de un solo paquete o que fue dividido en varios paquetes.
6. Ultimo Paquete (LAST PACKET): indica la terminacion de un mensaje con multiples paquetes.
- 7.Codigo del Paquete (PACKET CODE): existen diversos tipos de paquetes de los cuales los mas importantes son los de datos (codigo 0) o los RFNMs (codigo 4); tambien existen paquetes que hacen mediciones de las características de la red o que se utilizan

en mantenimiento.

8. IMP destino (DESTINATION): indica hacia adonde se dirige el paquete.

Una característica importante de este tipo de redes es el control de flujo ya que si el mensaje utiliza mas de un paquete, puede presentarse el caso en el cual el IMP receptor no tiene donde almacenar las diferentes partes del mensaje, por lo que no puede entregarlo al sistema de computo pero a su vez no puede recibir las partes faltantes. A esta situacion se le conoce como "estancamiento" debido al reensamblaje de mensajes. Una solucion a este problema es que al presentarse un mensaje que debiera dividirse en varios paquetes, se genera un paquete especial que "reserva" espacio en el IMP destino, con lo que el IMP fuente debe esperar hasta que se le conteste esta "reservacion" para empezar a transmitir. Otro Problema que puede presentarse es el de paquetes duplicados, ya que el ACK puede perderse o tardarse en arribar y el IMP fuente realizara una retransmision suponiendo que no se recibio correctamente. Al llegar este nuevo paquete al IMP destino debiera ser identificado como un duplicado. Esto se logra mediante el bit SEQ en el encabezado que indica el numero en secuencia del paquete; por ejemplo: el transmisor manda un paquete con SEQ=0. En este momento el receptor espera tambien un paquete con SEQ=0. Al arribar el paquete el receptor manda un ACK y hace SEQ=1. Si se llegara a perder el ACK y se manda un duplicado, este tendra el mismo numero (SEQ=0), el receptor lo reconoce como duplicado y lo desecha. Para terminar el ciclo, al recibir el transmisor el ACK, este adelanta la secuencia haciendo

SEQ=1.

El enrutamiento en la red ARPA es de tipo distribuido en el cual cada IMP intercambia tablas de enrutamiento basadas en el retardo estimado a cada uno de los demas nodos. Al recibirlo, cada IMP compara esta tabla con la tabla anterior y guarda unicamente la ruta con el menor tiempo estimado. Esta tabla se intercambia cada 625 mseg.

El diseño de esta red tuvo como objetivo proveer la red mas barata posible manteniendo un retardo maximo entre origen y destino de 0.2 seg. En la parte del diseño topologico se requirio de una conectividad de 2 o sea cada nodo debe estar conectado por lo menos mediante 2 canales distintos; ademas, se busco que esta red acomodara variaciones en el trafico sin degradacion importante en su desempeño y que pudiera crecer ordenadamente de tal forma que se mantuviera un costo bastante bajo.

#### 4.1.2 REDES CON CONMUTACION DE CIRCUITOS

Desde los inicios de la telefonia se ha utilizado la idea de transmitir voz en forma mas o menos reconocible mediante la tecnica de conmutacion de circuitos (comunmente llamada multiplexaje por division de tiempo). En la actualidad, debido a que la infraestructura para este tipo de sistemas ya esta construida, el sistema telefonico ha sido utilizado para tambien transmitir datos, aun cuando este sistema presenta desventajas como una alta probabilidad de error o que generalmente son propiedad exclusiva de un servicio publico y es dificil mantener la privacidad deseada. Es por esto que el sistema telefonico en general esta actualizando sus tecnicas y equipo con:



transmisiones por satélite, servicios digitales, ciertas facilidades para implementar redes, etc., para cumplir con esta demanda [1],[12].

El sistema telefonico esta organizado en una jerarquia altamente redundante de varios niveles. Cada telefono esta conectado directamente a una oficina central local. Generalmente la clave y los 3 primeros digitos de un numero telefonico forman la clave unica de esta oficina y los 4 ultimos digitos representan el numero de suscriptor de esa oficina. Si un usuario desea llamar a alguien que esta conectado a su misma oficina central, esta oficina establece directamente la conexion entre los 2 telefonos. En caso de que el telefono receptor se encuentre conectado a otra oficina local, se utilizan las llamadas oficinas de tarifa a las cuales estan conectadas diferentes oficinas centrales. Si estos telefonos estan conectados a una misma oficina de tarifa, la comunicacion se establece a traves de esta oficina; de lo contrario, existen oficinas sectoriales que conectan a las oficinas de tarifa y a su vez existen oficinas regionales que conectan a las oficinas sectoriales. Este proceso puede verse mas claramente en la figura 6.

El canal de comunicacion entre cada una de las diversas oficinas varia dependiendo de las necesidades. Entre las oficinas centrales y los usuarios basta con cables aislados de cobre; sin embargo, entre las oficinas centrales y las oficinas de tarifa se utilizan cables coaxiales, microondas, etc. Actualmente para niveles superiores se estan intentando utilizar fibras opticas que tienen un ancho de banda muy grande con el cual pueden transmitirse mayor cantidad de llamadas que en cables normales.

Para mantener un orden y facilitar la conexión de redes con diferentes protocolos, se han intentado estandarizar las interfaces que conectan a estos sistemas. Uno de estos estándares es el llamado X.21 (propuesto por CCITT) en el cual se detalla la interfaz entre el sistema de cómputo (llamado DTE) y el equipo de conmutación (llamado DCE). El DTE utiliza una línea para transmitir datos (T) y una segunda línea para transmitir información de control (C). El DCE utiliza estas mismas líneas denominándolas como (R) para datos e (I) para control. Cuando el DTE desea hacer una llamada (o sea "levanta el teléfono") lo indica al hacer  $T=0$  y  $C=0$  (normalmente todas las líneas están en un 1 lógico que indica que no se están usando). El DCE detecta esta situación y empieza por transmitir el carácter ASCII "+" en R; este es el tono que indica al DTE que puede empezar a marcar el número que desea. El DTE "marca" el número al mandar la dirección del DTE al que desea conectarse como una serie de caracteres en T. En este punto el DCE manda lo que se llama como "señales de una llamada en progreso" para informar al DTE del resultado de su llamada (puede ser: lista, número ocupado, DTE destino fuera de servicio, sistema congestionado, etc.). En caso de que se conecte la llamada, el DCE hace  $I=0$  para indicar que puede iniciarse la transmisión de datos. Al terminar el DTE indica mediante  $C=1$  que ha terminado de transmitir y que puede desconectarse el circuito.

Resumiendo, las funciones básicas del DCE son:

1. Detectar la necesidad de servicio.
2. Detectar el número (dirección) a la que se desea transmitir.
3. Revisar las líneas de transmisión para encontrar alguna libre en la

cual pueda establecerse la comunicacion.

4. En caso de encontrarse todas las lineas ocupadas o que el receptor de la llamada este ocupado, el DCE debe avisar al usuario para que este tome la accion adecuada (ejemplo: "colgar"). En caso contrario debe avisarse al receptor que esta siendo llamado y en caso de no contestar en un tiempo razonable debera desconectar el circuito.
5. Realizar la comunicacion y al terminar deben desconectarse las lineas que intervinieron en ella.

Estas funciones se llevaran a cabo en cada DCE que intervenga en la ruta de la llamada, por lo que se puede presentar un bloqueo en cualquiera de los DCE intermedios.

Por ultimo cabe mencionar que en la actualidad el establecimiento de la llamada se hace utilizando paquetes, o sea para establecer el circuito el DTE manda un paquete llamado de "requerimiento". Este paquete esta determinado por el estandar de CCITT llamado X.25 y su contenido puede verse en [1]. El DTE receptor contesta con otro paquete llamado de "aceptacion" con lo que la llamada prosigue en forma normal. Este punto es de suma importancia debido a la caracteristica inherente de trafico hibrido (circuitos y paquetes) ya que se aprecia que este hecho apoya la decision de proporcionar este servicio en forma conjunta para mejorar cada uno de los tipos de conmutacion por separado ademas de aprovechar las ventajas de cada uno de ellos.

Una red con CC que utiliza el multiplexaje por division de tiempo puede modelarse como canales que transmiten en marcos fijos de tiempo

que se encuentran ranurados y que en cada ranura se transmite una porcion del mensaje (figura 7) [4],[14]. Cada marco tiene una duracion de  $b$  seg y suponiendo que se tiene una capacidad de  $R$  bits/seg, se tendran marcos de  $N = bR$  bits. Al tratar de establecer una llamada, el DCE busca una ranura (o subcanal) en el cual pueda situar la comunicacion. Esta busqueda se realiza en una tabla que el DCE maneja en la cual se indica que llamadas estan en progreso y a que ranura se encuentran asignadas. En caso de que todas las ranuras esten asignadas, el concentrador no podra situar la llamada y esta es desechada \*. En el caso en que se encuentre una ranura disponible, el concentrador actualiza la tabla de llamadas y situa la llamada en el siguiente marco.

Por otro lado, al terminar una llamada se actualiza la tabla y generalmente se "adelantan" todas las llamadas que estan asignadas a las ranuras siguientes, ya que esto facilita la busqueda de nuevas ranuras (ejemplo: se puede mantener el numero de la ultima ranura asignada), aunque el tiempo de actualizacion de estas tablas puede ser muy costoso.

#### 4.1.3 REDES CON CONMUTACION HIBRIDA

Actualmente existen muy pocas redes comerciales que utilizan la conmutacion hibrida, ya que la mayoria de las redes que se han construido estan dedicada a la investigacion de este concepto tan novedoso [2],[13].

-----  
\* Aunque ciertos sistemas tienen la capacidad de almacenarla durante cierto tiempo en el que se le da la oportunidad de ser asignada.

Una de las redes más conocidas (llamada PACUIT) utiliza uno de los conceptos más aceptados en redes de conmutación híbrida que es el de la envolvente ranurada (llamado SENET - Slotted Envelope Network), el cual consiste en sobreponer una red con CP a una red con CC. Esto significa que se tienen los mismos componentes que en estas 2 redes (IMPs en el caso de CP y conmutadores en el caso de CC) construidos en un solo dispositivo que maneja los 2 tipos de tráfico. Este dispositivo debe mantener transparente al tráfico sincrónico (de CC) la estructura de la red (evitar retardos considerables provocados por paquetes) y a su vez deberá obtener la mayor conductividad posible y la mejor utilización de los recursos de transmisión.

El esquema ideado para estas redes puede apreciarse en la figura 8. El marco se encuentra dividido en ranuras de tiempo que son separadas en 2 distintas regiones. En la primera región las ranuras son asignadas al tráfico de CC y en la segunda región se asigna el tráfico de CP. Estas regiones se encuentran divididas por una frontera que puede ser fija o móvil. El marco con frontera móvil distribuye dinámicamente la capacidad de transmisión entre el tráfico de CC y de CP, a diferencia del marco con frontera fija en el cual se tienen un número determinado de ranuras para cada tipo de tráfico, que en caso de no estarse utilizando quedan libres; sin embargo, es conveniente fijar un número mínimo de ranuras a cada uno de los tráficos, a fin de garantizar un grado mínimo de servicio.

Por otro lado, puede apreciarse en la figura que el concentrador genera tráfico de señalización para cada tipo de conmutación. Esta

señalización indica al receptor la forma en que fue armado el marco (nuevas llamadas, terminaciones, número de paquetes, etc.) para que este último pueda ser desarmado correctamente, ya que el receptor debe actualizar las tablas de llamadas en progreso para poder realizar el multiplexaje. Cada vez que termine una llamada deberán adelantarse las llamadas de las ranuras que le siguen, para con esto proporcionar más capacidad para el tráfico de CP mediante la frontera móvil.

#### 4.2 CONSIDERACIONES GENERALES EN LOS MODELOS

Generalmente cuando no se está estudiando el problema de enrutamiento, se considera una estrategia fija de enrutamiento o simplemente se considera una ruta primaria y una secundaria [3], [5]; además, al plantear un modelo de una red de computadoras, se consideran como datos iniciales a:

1. La localización de cada nodo \*.
2. Los requerimientos del tráfico (en mensajes/seg).
3. La topología de la red.
4. La función de costo.

El primer paso que debe realizarse al plantear el modelo es encontrar el tráfico conjunto de la red utilizando la ec. (3.6). Con esto se encuentra el número de mensajes que viajarán en cada línea. Al haber acomodado los requerimientos del tráfico en cada línea dependiendo de la estrategia de enrutamiento, es posible asignar la capacidad a las líneas que componen a la red, quedando establecidas así todas las características de la red con lo que puede analizarse su

\* Aunque existen técnicas para encontrar la localización óptima de cada nodo dependiendo del número de sistemas que estarán conectados a él [1], se supone que este análisis fue hecho anteriormente.

desempeño bajo las condiciones que se deseen, utilizando cualquiera de las técnicas mencionadas anteriormente. Este desempeño depende de las características particulares de cada tipo de conmutación por lo que en las siguientes secciones se analiza con más detalle cada tipo de red.

#### 4.3 MODELO DE REDES CON CONMUTACION DE PAQUETES

Una red con CP puede modelarse como una red de sistemas de espera del tipo M/M/1. En esta red cada nodo se divide en varios sistemas de espera, donde cada sistema representa una de las líneas que tienen como origen a ese nodo \*.

Este modelo tiene 2 parámetros importantes: la media de tiempos entre llegadas ( $\lambda_i$ ) y la media de tiempos de servicio ( $\mu_i$ ) que debido a la suposición de independencia y por comodidad se asume constante para toda la red ( $\mu_i = \mu$ ). Esta suposición corresponde a la realidad en el diseño de redes ya que se tratan de instalar los concentradores en lugares donde se conoce el tráfico esperado y con esto es posible balancear estáticamente a la red; además, se trata de que los concentradores sean lo más parecidos posible para mantener este tiempo de servicio constante, aun cuando este parámetro también depende del tráfico a la entrada del concentrador el cual puede hacer que se "degrade" el tiempo de servicio.

Para analizar la "efectividad" de cierta red, se utiliza la longitud media de la cola (dada en la ec. (2.21)) con la cual es posible encontrar la distribución de los mensajes en la red y así tener una medida del desempeño de la red; además, el tiempo total en el sistema puede calcularse como:

-----  
\* Este modelo puede hacerse gracias a la suposición de independencia.

$$W_i = T_i - 1/(\mu C_i) \quad (4.1)$$

#### 4.4 MODELO DE REDES CON CONMUTACION DE CIRCUITOS

El modelo de una red con CC asume que el proceso de asignacion de llamadas es discreto, esto es, las llamadas seran asignadas a sus respectivas ranuras solamente en el empiezo de un marco, con lo que en promedio una llamada debera esperar  $b/2$  seg para saber el resultado de su asignacion; ademas, esto significa que las ranuras que fueron asignadas a una llamada no pueden ser utilizadas hasta que se presente un nuevo marco. Por otro lado, se supone que el tamaño de la ranura es constante y que esta puede acomodar la razon de digitalizacion de la llamada. Esto significa que la fuente siempre genera a la misma razon de bits, por lo que no podran mezclarse diferentes traficos en las fuentes sino tendran que ser mezclados "sobre las lineas" [4]. Bajó ciertas condiciones, puede aproximarse una red con CC como una red de sistemas de espera del tipo M/M/c/c. Esta aproximacion se cumple si  $\lambda b \ll 1$  ( $\approx 0.01$ ) y si  $S \mu b \ll 1$  ( $\approx 0.01$ ), donde S es el tamaño de la ranura en seg. Esto se debe a que los sistemas M/M/c/c son sistemas continuos y en este caso se esta tratando de modelar un sistema discreto. Esta suposicion esta basada en que la variacion en el trafico es muy lenta a comparacion del tamaño del marco; por ejemplo, el tamaño del marco esta entre 5 y 50 ms mientras la duracion de una llamada (en este caso el tiempo de servicio) esta entre 60 y 300 seg. Este hecho es muy importante ya que el tamaño del marco no debe exceder ciertos limites; si el marco es muy pequeño, el manejo del marco se hace mas frecuentemente implicando con esto un mayor tiempo de procesamiento, ademas de un



mayor tráfico de señalización que reduce la utilización efectiva del canal. Por otro lado, si es muy grande, el concentrador debe almacenar la llamada más tiempo con lo que el establecimiento de un circuito puede llevarse más tiempo del requerido [14].

Este modelo puede extenderse para manejar llamadas con diferentes razones de bits siempre y cuando estas sean múltiples enteros de la razón con la que se diseñó originalmente la red. Esto se debe a que estas llamadas pueden verse como si utilizaran más de un servidor.

El diseño de este tipo de redes se basa en cumplir con una probabilidad máxima de bloqueo entre origen y destino; por ejemplo, la probabilidad de bloqueo entre 2 puntos X y Z unidos por un tercero Y está dada por:

$$P_{b_{xz}} = P_{b_{xy}} + P_{b_{yz}} + P_{b_{xy}} P_{b_{yz}} \quad (4.2)$$

Al extender esta ecuación a varios nodos puede verse que se tendrá la sumatoria de los productos dobles, triples, etc. hasta el producto de la probabilidad de todas las líneas que conecten a 2 nodos. Este hecho presenta dificultades al tratar de estimar cuál será la probabilidad de bloqueo entre 2 puntos ya que no se tiene ningún dato inicial. Suponiendo que las probabilidades son muy pequeñas (alrededor de 5%) puede aproximarse la ec. (4.2) como la suma de la probabilidad individual de bloqueo de cada línea. Esto hace posible el cálculo de la probabilidad de bloqueo presentada por una línea entre 2 puntos mediante el siguiente procedimiento:

1. Con los parámetros iniciales de la red se encuentra el número de

ranuras (o circuitos)  $S_i$  de cada línea que cumplan que la probabilidad de bloqueo  $B(\lambda_i, S_i)$  sea menor que la probabilidad máxima esperada de la red. Esto asegura que todas las líneas cumplirán con este requerimiento.

2. Se corrigen las medias de tiempos entre arribos al encontrar el tráfico "real" que se presenta en cada línea:

$$\lambda_i = \gamma_{ik} + \sum_j (1 - P_{b_{ij}}) \gamma_{ij} \quad (4.3)$$

3. Se calculan de nuevo el número de circuitos en cada línea, utilizando el tráfico "real" encontrado y se corrigen las probabilidades de bloqueo ( $P_b^*$ ).
4. Si  $|P_b - P_b^*| > \epsilon^2$  se repite el paso 3, de lo contrario se ha encontrado una solución que asegura que se cumple el requerimiento de la probabilidad máxima de bloqueo y que posee las características "corregidas" descritas anteriormente.

En este punto se conocen completamente los requerimientos de la red, con lo que es posible calcular la capacidad que se utilizara en la red. Si la razón de digitalización de una llamada es  $V$  bps, deben proveerse en cada marco de  $b$  seg,  $x$  bits para poder acomodarla. Esto significa que el tamaño de la ranura (en bits) estara dado por:

$$x = bV \quad (4.4)$$

por lo que la duración (en seg) de una ranura estara dada por:

$$d = x/C \quad (4.5)$$

también se sabe que la duración de una ranura esta dada por [4]:

$$d = b/S \quad (4.6)$$

por lo que utilizando las ecs. (4.4), (4.5) y (4.6) se obtiene:

$$C = VS \quad (4.7)$$

En este caso se escogen como parametros representativos del modelo a la intensidad de trafico \* y la probabilidad maxima de bloqueo para representar las condiciones que presenta la red al trafico que circula en ella.

#### 4.5 MODELO DE REDES CON CONMUTACION HIBRIDA

Este modelo es basicamente la superposicion del modelo de CP al modelo de CC. Se tienen marcos que estan divididos en 3 compartimientos: el primer compartimiento contiene al trafico de CC, el segundo contiene al trafico de CP y el tercero consiste de capacidad no utilizada. El tamaño de estos compartimientos varia de marco a marco ya que la asignacion se realiza dinamicamente dependiendo de la politica de la frontera.

El primer compartimiento ocupa no mas de cierta porcion del marco (digamos  $N_c$  bits), la cual debe cumplir con todos los requerimientos descritos anteriormente para una red con CC. En el segundo compartimiento se transmiten en serie los paquetes que estan en la cola. En la version de frontera fija, esta transmision solamente puede ocupar  $(N - N_c)$  bits del marco que no estan disponibles para el trafico con CC. En la version de frontera movil, la transmision de paquetes puede ocupar toda la capacidad que sobra despues de acomodar al trafico con CC. Los paquetes pueden ser de tamaño variable y la unica restriccion es que estos paquetes esten completamente contenidos dentro de un solo marco, implicando con esto que generalmente el tamaño del paquete sera mucho menor que el

\* Tambien llamada carga y que esta dada en unidades de "Erlangs".

tamaño del marco. Este esquema permite seguir modelando el tráfico mediante un sistema M/M/1 (en paquetes) y un sistema M/M/c/c (en circuitos), ya que distribuye el tráfico en el marco y supone que el servidor posee una cierta capacidad mínima de transmisión que se presenta periódicamente. El tercer compartimiento consiste de capacidad "desperdiciada" del marco, la cual se presenta cuando la cola de paquetes está vacía o cuando un paquete no puede acomodarse en lo que resta del marco. Uno de los requerimientos en el diseño es hacer que este compartimiento desaparezca o por lo menos hacerlo despreciable a comparación del tamaño de los otros dos compartimientos [14].

Dependiendo de la política de administración del marco, las ranuras con tráfico de CC y CP pueden estar localizadas en puntos arbitrarios del marco o confinadas en ciertas regiones dentro del marco. Esto es una decisión de la implementación y no afecta al análisis; además, se supone que existe un proceso estocástico que describe la posición de un cierto conmutador de "acceso" al canal que periódicamente cambia entre la "posición" de CP o de CC. Sea  $\delta$  la probabilidad de que el canal esté disponible para transmitir paquetes, el valor para la estrategia de frontera fija estará dado por:

$$\delta_f = \frac{N}{N + [S/I]} \quad (4.8)$$

donde  $N$  es el número de ranuras asignadas a paquetes,  $I$  es el número de ranuras asignadas a circuitos y  $[x]$  denota el mayor entero menor o igual a  $x$ . El valor para la estrategia de frontera móvil estará dado por:

$$\delta_m = \frac{N + [(S - \varepsilon)/I]}{N + [S/I]} \quad (4.9)$$

donde  $\varepsilon$  es el promedio de ranuras utilizadas por circuitos (o bien el numero de clientes promedio en circuitos) y esta dada por la ec. (2.29). Puede verse que en este caso el retardo estara dado por [4]:

$$T = \frac{t(2 - \lambda t)}{2(\delta - \lambda t)} \quad (4.10)$$

donde  $t$  es el intervalo de tiempo de transmision de un paquete dado por:

$$t = 1/(\mu C) \quad (4.11)$$

sustituyendo la ec. (4.11) en la ec. (4.10) se tiene:

$$T_i = \frac{2C_i - \rho_i}{2\mu C_i(\delta C_i - \rho_i)} \quad (4.12)$$

donde  $i = 1, 2, \dots, m$  (numero de ramas).

La suposicion principal para llegar a este resultado es la independencia en el tiempo de las ranuras ocupadas por circuitos o paquetes. En el caso de la frontera fija no existe ningun problema; sin embargo, en el caso de la frontera movil existe una gran correlacion, particularmente bajo condiciones de trafico pesado. La solucion a este problema es muy complicada [15] y es inutil utilizarla para propositos de diseo, por lo que esta suposicion debera ser tomada en cuenta al interpretar los resultados.

Para resolver el problema de asignacion de flujos y capacidades pueden utilizarse 2 metodos: resolver el problema por separado para el trafico de CC y CP o resolver el problema combinando los requerimientos de los dos tipos de trafico. En un principio, la segunda opcion produce mejores resultados en cuestion de costo; sin

embargo, debido a la interacción entre rutas primarias y alternativas, la optimización en CC es más compleja que en CP, por lo que se prefiere utilizar la primera estrategia. Esta estrategia acomoda al tráfico de CP basándose fuertemente en el resultado de la asignación del tráfico de CC.

En este esquema, la administración del marco es un parámetro muy importante. Si se escoge una frontera fija, debe seleccionarse cuidadosamente la asignación de las ranuras a CC ya que en caso de asignar demasiadas ranuras para tratar de disminuir la probabilidad de bloqueo, se incrementa el retardo de paquetes ocasionado por una falta de ranuras para transmitir; así mismo, cuando se asignan demasiadas ranuras para CP, la probabilidad de que una llamada quede bloqueada aumenta considerablemente. Este conflicto puede aminorarse mediante el uso de la frontera móvil ya que las ranuras que no están siendo utilizadas en CC son asignadas dinámicamente a CP para no ser desperdiciadas; sin embargo, si se tiene una alta intensidad de tráfico de CC que hace que se utilicen casi siempre todas las ranuras disponibles, el desempeño no se ve afectado por el tipo de estrategia para administrar el marco.

Es importante garantizar el nivel de funcionamiento de cada clase de tráfico. Es por esto que se deben reservar cierto número de ranuras para cada una de las clases, ya que en caso de tener una frontera móvil se garantiza de esta forma un grado mínimo de servicio que no se ve afectado por condiciones cambiantes en la intensidad de tráfico de uno u otro tipo de conmutación.

Otro factor importante en el desempeño de una canal "hibrido" es la razon de digitalizacion ( $V$ ) que puede ser cualquiera de las usadas en las diferentes tecnicas de modulacion (ejemplo: PCM (48-64 Kbps), DPCM (32-48 Kbps), CVSD (16-32 Kbps), LPC (2.4-16 Kbps) [14]). Debido a que el numero de ranuras en un marco es fijo, al incrementar  $V$ , el tamaño de cada ranura debe aumentar para ser posible seguir acomodando en una sola ranura la razon de bits. Esto trae como consecuencia que la porcion de la capacidad total asignada a CC aumenta, mientras la capacidad disponible para CP disminuye, aumentando asi el retardo de paquetes que viajan en la red. Por otro lado, al escoger un tamaño de paquete debera tenerse en cuenta: el tamaño de los mensajes, el retardo ocasionado por paquetes muy largos o la perdida de eficiencia ocasionada por encabezados en paquetes muy pequeños, la duracion del marco, la necesidad de fragmentar un paquete sobre varios marcos y en general la operacion eficiente del canal bajo la politica de frontera movil ya que esta operacion estara directamente relacionada con la relacion entre el tamaño del paquete y el tamaño de las ranuras.

Todo esto lleva a la conclusion de que el diseño de este tipo de redes debera encontrar un buen compromiso entre todas estas propiedades y ademas debera resaltar las ventajas de utilizar un esquema hibrido (preferentemente con frontera movil).

## 5. SIMULACION DE REDES DE COMPUTADORAS

En este capítulo se describen la implementación de un programa de simulación y los resultados obtenidos. Este simulador tiene como propósito experimentar con las suposiciones y predicciones realizadas en los modelos teóricos además de sugerir nuevas líneas de estudio para estos modelos. Actualmente, debido a que el costo de las microcomputadoras ha disminuido notablemente, se han propuesto simuladores "reales" o prototipos [16] en los cuales es posible implementar los protocolos, algoritmos de enrutamiento, sistemas operativos e inclusive las técnicas de comunicación más avanzadas para lograr un análisis integrado de todos estos parámetros. Esto permite obtener mediciones de los desempeños y características de redes a gran escala a una fracción del costo real y en ciertos casos a un costo menor que el del análisis por medio de una simulación por computadora; es más, este tipo de sistemas proveen ciertas ventajas adicionales al facilitar la implementación final ya que la mayoría de los problemas de "hardware" (acoplamientos, parámetros de dispositivos reales, etc.) ya fueron resueltos en el prototipo, además de proporcionar una flexibilidad en la actualización y evaluación general de nuevos sistemas.

### 5.1 ESPECIFICACIONES

El simulador requiere de las siguientes especificaciones de diseño:

1. El número de nodos ( $n$ ).
2. Una descripción de la topología en la cual se utiliza la matriz de



incidencia o conectividad en la cual cada renglon  $i$  señala un origen, cada columna  $j$  señala un destino y cada elemento  $ij$  contiene un 1 para indicar que existe una línea que conecta al origen  $i$  con el destino  $j$  o un 0 que indica que no existe conexión entre esos 2 nodos. Generalmente se considera que cada línea es del tipo simplex.

3. El número total promedio de mensajes ( $\lambda$ ) que entran a la red por segundo.
4. La longitud promedio de mensajes ( $1/\mu$ ).
5. La matriz de tráfico en la cual cada elemento  $ij$  representa un porcentaje del tráfico total de la red que tiene como origen al nodo  $i$  y como destino al nodo  $j$ .
6. El número de clases de prioridad y la razón de arribos relativos entre los mensajes de cada clase  $*$ .
7. Un parámetro que indique cuando terminar la simulación. Normalmente se escoge el número total de mensajes a ser transmitidos a través de la red.

## 5.2 MODELOS UTILIZADOS

En el simulador se intenta optimizar el diseño de la red utilizando los métodos de optimización descritos anteriormente. En el caso de redes de CP se escoge al retardo como medida de desempeño y como variable se utiliza a la capacidad. Esta capacidad es asignada a cada rama de la red mediante los métodos vistos en la sec. (3.1.1) y nos permite proporcionar una flexibilidad adicional al diseño de redes con diversas propiedades.

-----  
\* En esta primera etapa serán omitidas.

En el caso de redes con CC se escoge a la probabilidad máxima de bloqueo en cada rama como el indicador a optimizar y como variable se utiliza también a la capacidad. Esta capacidad es asignada mediante el uso de los métodos descritos en la sec. (4.5) en los cuales se toman en cuenta el tamaño del marco, la probabilidad máxima de bloqueo y la intensidad de tráfico para encontrar el número de ranuras que deben asignarse a cada línea. Finalmente, la capacidad puede encontrarse utilizando el número de ranuras y la razón de digitalización de voz.

En redes híbridas se integraron estos dos modelos al tratar de minimizar el retardo a la vez que se intenta cumplir con los requerimientos de la probabilidad máxima de bloqueo. Esto se logra al calcular, mediante los métodos mencionados, el número de ranuras que es necesario asignar a cada tipo de tráfico para cumplir con estos requerimientos. Sin embargo, este esquema se ve afectado por la forma en que se administra la frontera dentro del marco, ya que en caso de tener una frontera móvil, la asignación dinámica del tráfico puede ocasionar que la red tenga un comportamiento muy diferente al supuesto inicialmente; sin embargo, una de las herramientas más poderosas para analizar este tipo de redes es precisamente la simulación, por lo que es útil implementar estas técnicas aun cuando el diseño tenga que hacerse por "prueba y error", a diferencia de los dos primeros esquemas en los que se conoce de antemano el efecto de cada variable en el diseño.

### 5.3 ESTIMADORES

Con el propósito de verificar los resultados de la simulación (en redes de CC y CP) y los modelos utilizados por implementarla; además de obtener mediciones precisas de las condiciones de redes híbridas (ya que los modelos teóricos no representan las características dinámicas de estas redes), se implementaron estimadores que representan a los parámetros más críticos de diseño. La confiabilidad de estos estimadores depende de las condiciones de simulación (ejemplo: evitar efectos transitorios) y de las suposiciones hechas para formularlos. Se puede apreciar que si el simulador se deja correr un tiempo razonable (ejemplo: 5000 mensajes), estos estimadores tienen un 5% de error con respecto a los valores calculados.

Uno de los parámetros estimados es la intensidad de tráfico, la cual se presenta en los diversos tipos de redes. El estimador para este parámetro puede calcularse de la siguiente manera:

$$E_{P_i} = \frac{MG_i/t_{MG_i}}{SR_i/t_{SR_i}} \quad (5.1)$$

donde para cada línea  $i$ ;  $1 \leq i \leq m$ ;  $MG_i$  es el número de mensajes que arribaron a ese sistema de espera,  $t_{MG_i}$  es la suma del tiempo que tardaron en arribar los mensajes,  $SR_i$  es el número de servicios realizados por esa línea y  $t_{SR_i}$  es la suma de tiempos de servicio. Estos parámetros incluyen tanto a los mensajes generados por fuentes externas como a los mensajes que arribaron a un nodo en tránsito hacia otros nodos de la red.

Para redes de CP se considero que los parametros mas representativos son: el retardo, dado por

$$E_{T_i} = \frac{t_{SR_i} + t_{e_i}}{SR_i} \quad (5.2)$$

(donde  $t_{e_i}$  es la suma de tiempos que cada mensaje tuvo que esperar en la cola \*) y la longitud promedio de la cola estimada como:

$$E_{L_i} = L_{m_i} / t_{SR_i} \quad (5.3)$$

donde  $L_{m_i}$  es la longitud media de la cola que se calcula como la longitud de la cola (en mensajes "esperando") multiplicada por el tiempo que la cola permanecio con esa longitud.

Para redes de CC se considero que el parametro mas representativo es la probabilidad maxima de bloqueo que se calcula como:

$$E_{p_{b_i}} = \frac{MB_i}{MB_i + SR_i} \quad (5.4)$$

donde  $MB_i$  es el numero de mensajes "bloqueados" en la rama  $i$ . Este estimador presenta ciertas discrepancias con el parametro real ya que deben generarse suficientes mensajes (alrededor de 100,000 [14]) para tener una buena confiabilidad. Esto se debe a que con una pequeña variacion en el trafico (aproximadamente un 5%), que no puede ser evitado en la simulacion, la probabilidad de bloqueo puede tener variaciones de hasta un 30%, dependiendo de la region en que se este

-----  
\* Puede verse que la suma del tiempo de servicio y el tiempo esperado en la cola es el tiempo total que el mensaje estuvo en un nodo (ec. 2.22).

trabajando (figura 9). Esto provoca que el costo de simulacion sea alto y solo puedan obtenerse unas cuantas muestras para realizar la estimacion.

Por ultimo, para redes hibridas se utilizan estos mismos parametros para estimar las caracteristicas de cada una de las regiones del marco de transmision; ademas, en estas redes existe un problema fundamental que se presenta debido a que la constante de tiempo de una red de CP es muy pequena a comparacion con la constante de la red de CC (normalmente la diferencia esta en 2 ordenes de magnitud). Esto provoca que mientras la parte de CP de la simulacion se encuentra en estado estable la parte de CC todavia se encuentra en estado transitorio. Como consecuencia, deben correrse simulaciones muy largas que presentan los problemas ya descritos anteriormente [14].

Es importante mencionar que aunque estos estimadores proporcionan una buena descripcion de las caracteristicas de una red, deben obtenerse varias muestras de la misma red para obtener un buen rango de confiabilidad de estos parametros \*.

#### 5.4 ENRUTAMIENTO

El enrutamiento es un factor muy importante que afecta al desempeño de una red. Por esta razon se dedico especial atencion a mantener flexible el enrutamiento en el simulador para poder implementar en un futuro los nuevos esquemas de enrutamiento que se diseñen. En esta primera etapa se utilizo un algoritmo de enrutamiento

\* Los datos presentados en esta tesis fueron estimados haciendo un estudio estadistico de 5 corridas (muestras) diferentes, utilizando puntos de regeneracion

estatico en el cual se escoge el menor recorrido de un mensaje en la red. Este algoritmo utiliza la matriz de conectividad (MC) para encontrar la llamada matriz de distancias (MD) con la cual se encuentra el numero minimo de nodos que debera atravesar un mensaje para llegar a su destino. Esta MD se encuentra de la siguiente manera (figura 10):

1. Se hace  $MD = MC$ .
2. Se encuentran las rutas de longitud 2 de la siguiente forma: si  $i$  esta conectado a  $j$  entonces todas las rutas conectados a  $j$  estaran a una distancia 2 de  $i$  (siempre y cuando no exista una ruta directa entre ese nodo y el nodo  $i$ ).
3. Se encuentran las rutas de longitud 3,4,... hasta que ya no existan rutas de mayor longitud.
4. Si existen rutas con longitud 0, estas significan que no existe ruta posible entre esos nodos (el nodo esta aislado).

Sin embargo, cuando este algoritmo encuentra mas de una ruta minima posible, se escoge un camino arbitrariamente. Es por esto que la ruta "optima" se decide tomando en cuenta la ruta con menor trafico conjunto para asegurar que los mensajes encontraran el menor trafico posible ademas de que al "balancear" estaticamente la red se obtendran capacidades mas equitativas en toda la red.

## 5.5 CONTROL DE LA SIMULACION

La simulacion se hace bajo la politica de eventos discretos, en la cual el programa actualiza los parametros de la red solamente cuando existe un evento que afecta a la simulacion. Estos eventos pueden ser:

1. Arribo de mensajes: el simulador "genera" mensajes en cada una de

las líneas (definidos por su origen, destino, tiempo de arribo a la red y longitud) con la frecuencia requerida en el diseño ( $\lambda_i$ ); esto se logra encontrando el siguiente tiempo aleatorio de arribo (utilizando una distribución exponencial con media  $\lambda_i$ ). Cada mensaje es colocado en la cola del origen al que haya arribado y ahí espera hasta que sea servido (en el caso de CP) o se genera su servicio (en el caso de CC).

2. Generación de servicios: al llegar un mensaje a una cola y dependiendo de la disciplina de servicio, se especifica el tiempo en que será "transmitido" a su destino (que también se genera a partir de una distribución exponencial con media  $\mu$ ). Cuando la red es de CC, el simulador redondea el tiempo de servicio al tiempo de inicio del marco más cercano, con el propósito de cumplir con las proposiciones hechas en un principio y busca una ranura disponible dentro del marco de cada uno de los nodos que serán utilizados para la transmisión; sin embargo, en caso de no encontrar ranuras disponibles, el simulador simplemente desecha el mensaje. En el caso de una red de CP, el simulador solo se preocupa de mandar el mensaje al siguiente nodo.
3. Terminación de servicio: en caso de tener una red con CC, el simulador debe actualizar la tabla de ranuras disponibles y terminar con la transmisión. Sin embargo, en el caso de redes con CP, el simulador debe revisar si el nodo al que se transmitió era el destino final de ese mensaje. En caso de que el mensaje este destinado a ese nodo, el simulador sabe que fue entregado exitosamente, de lo contrario, este nodo es un nodo intermedio y

el simulador debe tomar el mensaje y colocarlo, siguiendo la estrategia de enrutamiento, en la cola hacia el siguiente destino (ya sea intermedio o final).

Durante cada uno de estos eventos se acumulan las estadísticas que servirán para calcular los estimadores descritos anteriormente. El control de la simulación puede resumirse en el siguiente algoritmo:

```

REPEAT
  IF tiempo-sgte-mensaje > tiempo-sgte-servicio THEN
    (* el evento siguiente es una terminación de servicio *)
    fin-de-servicio
  ELSE BEGIN
    (* el evento siguiente es un arribo de mensaje; se genera su servicio y se encuentra el tiempo de arribo del siguiente mensaje en esa línea *)
    genera-servicio;
    genera-mensaje;
  END; (* IF *)
  (* en caso de haber llegado a un punto de regeneración, se calculan los estimadores y se inicializan de nuevo las estadísticas *)
  IF punto-de-regeneracion THEN
    BEGIN
      calcula-estimadores;
      inicializa-estadisticas;
    END; (* IF *)
  ELSE
    acumula-estadisticas;
UNTIL contador-servicios >= total-servicios;

```

El proceso de simulación se divide en 2 partes principales: la simulación en estado transitorio en la cual se inicializa la red y se permite que la red alcance un estado estable (ejemplo: mensajes en todas las colas) y la simulación en estado estable en la cual se acumulan las estadísticas y se calculan los estimadores. Normalmente el



estado transitorio es un 10% del tiempo total de simulacion.

## 5.6 EJEMPLO

Esta seccion proporciona un ejemplo del diseño de una red. Se presentan las características que se desean y se utiliza el simulador para analizar esta red bajo los 3 diferentes tipos de redes presentadas, con el proposito de comparar los desempeños que se obtienen con redes separadas y el desempeño que se obtiene al conjuntar los 2 tipos de trafico en una red hibrida \*. El ejemplo que se utilizo fue:

"Se desea construir una red de computadoras que conecte a los centros de computo de las dependencias gubernamentales en las siguientes ciudades: D.F., Monterrey, Guadalajara, Tijuana y Merida. La configuracion que se propone para esta red puede verse en la figura 11. Las características del trafico entre estos centros de computo puede verse en las corridas del apendice A"

Se presenta a continuacion el estudio estadistico realizado con las diversas muestras obtenidas de los estimadores.

.....  
\* En el apendice A pueden encontrarse ejemplos de las corridas del simulador realizadas para la presentacion de este problema.

RED CON CONMUTACION DE PAQUETESRETARDOS DE TIEMPOPromedios: (P):

-	2.386	2.395	-	-
2.387	-	2.361	-	2.416
2.343	2.382	-	2.323	2.405
-	-	2.366	-	2.384
-	2.347	2.387	2.368	-

Desviacion estandar (S):

-	0.021	0.018	-	-
0.034	-	0.040	-	0.063
0.036	0.030	-	0.012	0.091
-	-	0.027	-	0.071
-	0.031	0.074	0.073	-

Error (%) = (Vest-Vcal)\*100/Vcal:

-	0.421	0.8	-	-
0.463	-	-0.506	-	1.984
-1.389	0.506	-	-2.231	1.434
-	-	-0.295	-	0.464
-	-1.054	0.675	-0.042	-

Variacion (%) = S\*100/P:

-	0.880	0.752	-	-
1.424	-	1.694	-	2.608
1.536	1.259	-	0.517	3.784
-	-	1.141	-	2.978
-	1.321	3.1	3.083	-

RED CON CONMUTACION DE PAQUETESINTENSIDADES DE TRAFICOPromedios (P): (x10<sup>-3</sup>)

-	4	4	-	-
4	-	2	-	0.621
4	0.955	-	4	1
-	-	3	-	2
-	2	1	0.819	-

Desviacion estandar: (x10<sup>-4</sup>)

-	4	-	-	-
4	-	-	-	0.351
-	0.234	-	-	4
-	-	4.899	-	-
-	-	4	0.205	-

Error (%):

-	-	-	-	-
-	-	-	-	5.001
-	-0.890	-	-	-
-	-	5	-	-
-	-	-	-1.207	-

Variacion (%):

-	1	-	-	-
1	-	-	-	5.651
-	2.444	-	-	4
-	-	16.330	-	-
-	-	4	2.505	-

RED CON CONMUTACION DE PAQUETESLONGITUD PROMEDIO DE COLASPromedios ( $\times 10^{-3}$ ):

-	4	4	-	-
4	-	2	-	0.623
4	0.956	-	4	1
-	-	3	-	2
-	2	1	0.819	-

Desviacion estandar ( $\times 10^{-4}$ ):

-	4	-	-	-
4	-	-	-	0.369
-	0.228	-	-	4
-	-	4.899	-	-
-	-	4	0.202	-

Error (%):

-	-	-	-	-
-	-	-	-	5.150
-	0.897	-	-	-
-	-	5	-	-
-	-	-	-1.254	-

Variacion (%):

-	1	-	-	-
1	-	-	-	5.918
-	2.386	-	-	4
-	-	16.330	-	-
-	-	4	2.461	-

RED CON CONMUTACION DE CIRCUITOSCARGA DEL SISTEMAPromedios:

-	11.763	31.154	-	-
11.922	-	19.473	-	18.978
29.957	19.599	-	9.845	26.923
-	-	9.879	-	26.095
-	18.872	28.412	25.707	-

Desviacion estandar:

-	0.278	0.555	-	-
0.362	-	0.742	-	0.533
0.560	0.380	-	0.249	0.841
-	-	0.277	-	0.506
-	0.310	0.726	0.595	-

Error (%):

-	-1.975	6.342	-	-
-0.65	-	1.422	-	0.925
2.256	2.078	-	7.127	-1.615
-	-	7.497	-	0.327
-	0.362	3.826	-1.165	-

Variacion (%):

-	1.363	1,781	-	-
3,036	-	3,810	-	2,809
1,869	1,939	-	2,529	3,124
-	-	2,804	-	1,939
-	1,643	2,555	2,315	-

RED CON CONMUTACION DE CIRCUITOSPROBABILIDAD DE BLOQUEOPromedios:

-	7.461	8.186	-	-
8.324	-	9.157	-	7.527
9.020	9.725	-	11.153	7.947
-	-	9.202	-	7.070
-	8.127	7.731	7.476	-

Desviaciones estandar:

-	0.716	0.731	-	-
1.059	-	1.484	-	1.139
1.008	0.809	-	1.384	1.542
-	-	1.216	-	1.185
-	0.689	0.918	1.180	-

Error (%):

-	-1.112	-4.134	-	-
-2.904	-	2.359	-	-7.360
5.633	0.779	-	24.267	-9.405
-	-	2.529	-	-14.313
-	0.025	-11.867	-9.393	-

Variacion (%):

-	9.597	8.930	-	-
12.722	-	16.206	-	15.132
11.175	8.319	-	12.409	19.404
-	-	13.215	-	16.761
-	8.478	11.874	15.784	-

RED CON CONMUTACION DE CIRCUITOSPROBABILIDAD DE BLOQUEO CALCULADAPromedios:

-	7.913	11.480	-	-
8.361	-	9.561	-	8.505
9.569	9.807	-	11.391	8.1
-	-	11.524	-	8.401
-	8.273	10.518	7.782	-

Desviacion estandar:

-	0.778	0.896	-	-
1.061	-	1.614	-	1.123
0.877	0.822	-	0.945	1.334
-	-	1.048	-	0.836
-	0.645	1.384	0.942	-

Error (%):

-	-7.699	34.442	-	-
-2.473	-	6.875	-	4.677
12.062	9.624	-	26.919	-7.661
-	-	28.401	-	1.818
-	1.822	19.916	-5.684	-

Variacion (%):

-	9.832	7.805	-	-
12.690	-	16.881	-	13.204
9.165	8.382	-	8.296	16.469
-	-	9.094	-	9.951
-	7.796	13.158	12.105	-

RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)CARGA DEL SISTEMA (CIRCUITOS)Promedios:

-	12.251	30.399	-	-
11.826	-	19.231	-	19.491
29.328	18.822	-	9.248	27.175
-	-	9.472	-	26.661
-	19.147	28.999	26.253	-

Desviacion estandar:

-	0.331	0.420	-	-
0.789	-	0.651	-	0.632
0.801	0.2	-	0.401	0.357
-	-	0.328	-	0.205
-	0.524	0.666	0.520	-

Error (%):

-	2.092	3.765	-	-
-1.450	-	0.161	-	3.653
0.109	-1.969	-	0.631	-0.694
-	-	3.069	-	2.503
-	1.824	5.971	0.934	-

Variacion (%):

-	2.702	1.382	-	-
6.672	-	3.385	-	3.243
2.731	1.063	-	4.336	1.314
-	-	3.463	-	0.769
-	2.737	2.297	1.981	-



RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)PROBABILIDAD DE BLOQUEO (CIRCUITOS)Promedios:

-	9.604	6.994	-	-
7.786	-	8.495	-	8.711
7.911	7.901	-	9.163	8.226
-	-	8.353	-	8.051
-	8.830	8.880	9.099	-

Desviacion estandar:

-	0.990	1.150	-	-
2.549	-	1.619	-	1.531
1.088	0.799	-	1.744	0.783
-	-	1.525	-	0.355
-	1.282	1.410	1.021	-

Error (%):

-	12.026	-18.093	-	-
-9.180	-	-5.041	-	7.212
-7.354	-11.681	-	2.095	-6.224
-	-	-6.930	-	-2.424
-	8.677	1.231	10.278	-

Variacion (%):

-	10.308	16.443	-	-
32,738	-	19,058	-	17,575
13,753	10,113	-	19,033	9,519
-	-	18,257	-	4,409
-	14,519	15,878	11,221	-

RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)

PROBABILIDAD DE BLOQUEO CALCULADA

Promedios:

-	9.323	10.262	-	-
8.187	-	9.044	-	9.594
8.615	8.165	-	9.214	8.472
-	-	10.013	-	9.334
-	8.856	11.514	8.661	-

Desviacion estandar:

-	0.966	0.666	-	-
2.183	-	1.375	-	1.321
1.193	0.410	-	1.438	0.566
-	-	1.195	-	0.346
-	1.081	1.145	0.861	-

Error (%):

-	8.748	20.178	-	-
-4.503	-	1.095	-	18.080
0.890	-8.730	-	2.663	-3.420
-	-	11.565	-	13.126
-	8.997	31.259	4.969	-

Variacion (%):

-	10.361	6.490	-	-
26.664	-	15.203	-	13.769
13.848	5.021	-	15.607	6.681
-	-	11.934	-	3.707
-	12.206	9.944	9.941	-

RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)RETARDO DE TIEMPO (PAQUETES)Promedios:

-	2.210	2.187	-	-
2.196	-	2.161	-	2.176
2.165	2.204	-	2.166	2.187
-	-	2.169	-	2.187
-	2.203	2.176	2.173	-

Desviacion estandar:

-	0.031	0.030	-	-
0.023	-	0.022	-	0.044
0.027	0.045	-	0.020	0.048
-	-	0.045	-	0.037
-	0.035	0.066	0.028	-

Error (%):

-	-6.987	-7.955	-	-
-7.576	-	-8.819	-	-8.263
-8.880	-7.004	-	-8.723	-7.760
-	-	-8.597	-	-7.838
-	-7.125	-8.224	-8.428	-

Variacion (%):

-	1.403	1.372	-	-
1.047	-	1.018	-	2.022
1.247	2.042	-	0.923	2.195
-	-	2.075	-	1.692
-	1.589	3.033	1.289	-

RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)INTENSIDADES DE TRAFICO (PAQUETES)Promedios ( $\times 10^{-3}$ ):

-	3	4	-	-
3	-	0.867	-	2
4	0.894	-	2	1
-	-	2	-	2
-	2	1	2	-

Desviacion estandar ( $\times 10^{-4}$ ):

-	-	4.899	-	-
-	-	0.289	-	-
4.899	0.409	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Error (%):

-	-2.5	-	-	-
-2.5	-	-8.448	-	-
-	-5.554	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Variacion (%):

-	-	12.248	-	-
-	-	3.332	-	-
12.248	4.575	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

RED CON CONMUTACION HIBRIDA (FRONTERA MOVIL)LONGITUD DE COLAS (PAQUETES)Promedios ( $\times 10^{-3}$ ):

-	3	4	-	-
3	-	0.87	-	2
3	0.894	-	2	1
-	-	2	-	2
-	2	1	2	-

Desviacion estandar ( $\times 10^{-4}$ ):

-	-	4.899	-	-
-	-	0.289	-	-
4.899	0.409	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Error (%):

-	-25	-	-	-
-25	-	-8.218	-	-
-25	-5.655	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

Variacion (%):

-	-	12.248	-	-
-	-	3.329	-	-
16.330	4.578	-	-	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-

## 5.7 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Resumiendo los resultados obtenidos con el simulador se tiene que:

<u>PARAMETRO</u>	<u>ERROR</u>		<u>VARIACION</u>	
	<u>PROMEDIO</u>	<u>DESVIACION</u>	<u>PROMEDIO</u>	<u>DESVIACION</u>
<b>PAQUETES</b>				
Retardo de tiempo	± 0.876%	± 0.631%	± 1.863%	± 1.001%
Intensidad de trafico	± 0.864%	± 1.728%	± 2.638%	± 4.204%
Long. de colas	± 0.879%	± 1.754%	± 2.650%	± 4.219%
<b>CIRCUITOS</b>				
Carga del sistema	± 2.683%	± 2.418%	± 2.465%	± 0.592%
Prob. de bloqueo	± 6.863%	± 6.420%	± 12.858%	± 3.306%
Prob. calculada	± 12.148%	± 10.414%	± 11.059%	± 2.954%
<b>RED HIBRIDA</b>				
Carga del sistema	± 2.059%	± 1.581%	± 2.720%	± 1.477%
Prob. de bloqueo	± 7.746%	± 4.340%	± 15.202%	± 6.387%
Prob. calculada	± 9.873%	± 8.246%	± 11.527%	± 5.536%
Retardo de tiempo	± 8.013%	± 0.637%	± 1.639%	± 0.561%
Intensidad de trafico	± 4.572%	± 8.7%	± 2.315%	± 4.285%
Long. de colas	± 6.348%	± 10.037%	± 2.606%	± 5.026%

Puede verse en esta tabla que con el simulador de redes de CP se obtienen estimadores con un error de aproximadamente 1%; esto se debe a que con el numero de mensajes con el que se simulo (30,000 mensajes) la red alcanza un estado estable y el error en los estimadores debido al estado transitorio desaparece. En el caso de la red

de CC se pueden observar 2 casos:

(1) El error en la estimación de la carga provoca que la probabilidad de bloqueo calculada al final de la simulación sea diferente de la probabilidad de bloqueo calculada en un principio. Esto apoya la afirmación de la sec. 5.3, ya que se comprueba que pequeñas variaciones en el tráfico provocan grandes variaciones de la probabilidad de bloqueo. Sin embargo, también puede notarse que la probabilidad de bloqueo estimada se aproxima más al valor real debido a que esta es calculada sin las suposiciones anteriormente planteadas.

(2) Esta red requiere de más mensajes simulados ya que de lo contrario se tiene una gran variación de los valores estimados con respecto a los valores reales. Esto se debe a que generalmente el simulador se utiliza en regiones de la probabilidad de bloqueo que presentan una gran variación con respecto al tráfico (ver Figura 9), ocasionando con esto que el simulador alcance un estado estable más lentamente. En caso de que se quisiera salir de estas regiones (por ejemplo: una probabilidad de bloqueo de 20%), la estimación de la carga del sistema empieza a degradarse debido a que los productos de las probabilidades de bloqueo entre nodos con puntos intermedios ya no son despreciables. Por el contrario, se observó que en el caso en que se desee una probabilidad de bloqueo más pequeña (alrededor de 1%), deben correrse simulaciones bastante largas ya que el efecto de estas variaciones sobre la probabilidad ocasiona que los valores estimados sean muy diferentes de los valores reales y debe darse tiempo de que el simulador "ajuste" las estimaciones al desaparecer los efectos transitorios.

Por último, en el caso de la red con conmutación híbrida, se conjugan estos problemas, por lo que también deben correrse simulaciones

largas con las cuales sea posible obtener buenos estimadores. Además esta red posee una característica especial ya que debido a que la generación de los tiempos de servicio se hacen a partir de una distribución aleatoria, la longitud encontrada del mensaje puede rebasar los límites del marco, violando así una de las principales suposiciones hechas para modelar este tipo de redes. Es por esto que se limita la longitud del mensaje a una longitud máxima (ejemplo: 1008 bits), suponiendo que en caso de llegar un mensaje de una longitud mayor, este será dividido en varios paquetes. Sin embargo, este hecho modifica a los valores utilizados para estimar los parámetros de la parte de CP, por lo que se trata de minimizar su efecto al vigilar que el número de mensajes truncados o divididos (que aparecen al final de la simulación) sea mucho menor que el número de mensajes simulados.

Puede verse que con la frontera móvil se obtuvo una reducción del retardo en paquetes de aproximadamente 8%. Este hecho, apoyado por las ventajas anteriormente descritas para este tipo de conmutación indica que es conveniente utilizar en el ejemplo planteado, un esquema de conmutación híbrida.

Con este ejemplo se ha tratado de mostrar como se diseña una red de comunicación entre computadoras tomando en cuenta solamente las variables de retardo y la probabilidad de bloqueo sujetándolas a la minimización del costo total de la red. Además, puede verse la utilidad del simulador ya que se pueden obtener buenos estimadores con los cuales es posible juzgar el desempeño obtenido de la red bajo las condiciones propuestas.



## CONCLUSIONES

En general, el campo de redes de computadoras esta emergiendo y se encuentra aun en la etapa de experimentacion. Existen muchos problemas abiertos a la investigacion de los cuales pueden mencionarse:

1. Enrutamientos: aun cuando existen ya diversas estrategias que dan buenos resultados, deben buscarse estrategias que puedan manejar "inteligentemente" la informacion que poseen sobre el estado de la red, ya que al aumentar el numero de usuarios y el trafico de la red, debera utilizarse la capacidad de transmision mas en la transmision de datos que en la transmision de informacion de control.
2. Prioridades: al incrementarse el uso de las redes de computadoras deben proporcionarse distintos servicios para distintas clases de usuarios (por ejemplo: usuarios de bases de datos en tiempo real y usuarios de impresoras en batch). El efecto que presentan estas prioridades en los sistema de comunicacion representa una mayor complejidad en el modelo que fue planteado, ya que algunas de las suposiciones utilizadas para simplificarlo no siguen siendo validas.
3. Protocolos: se esta intentando implementar protocolos que proporcionen una mayor confiabilidad a la red (menor error en la entrega de mensajes), ademas de incrementar la seguridad en el acceso y uso de ella.
4. Sistemas de computo distribuidos: aunque ya se conocen varias ventajas que presenta un sistema de computo distribuido (especialmente en bases de datos), se esta investigando la posibilidad de tener sistemas operativos totalmente distribuidos en

la red que tomen ventaja de los diferentes componentes que participan en ella (procesadores, perifericos, etc.).

5. Integracion de la Subred del Usuario: existen muchas interacciones entre las dos subredes que no han podido ser estudiadas (ejemplo: eficiencia de nuevos protocolos y su impacto en la subred de comunicacion). Al obtener simuladores mas poderosos se podran implementar redes en las cuales pueda estudiarse estos fenomenos.

Ademas existen ya aplicaciones que utilizan los principios de las redes de computadoras pero que estan construidas enfocando otro tipo de problemas. Una de estas aplicaciones es la red local de acceso en la cual se conectan todos los instrumentos de comunicacion de una compania (como: telefonos, maquinas de escribir, computadoras, etc.) y se automatizan todos sus movimientos o transacciones. Tambien existen ya "super-redes" que conectan a diferentes redes de computadoras (generalmente redes locales de acceso), que presentan nuevos problemas de diseo e implementacion (ejemplos: protocolos, medicion del desempeno, coordinacion y control de la "super-red", etc.).

Es por esto que existe aun mucho por hacer en el estudio de redes de computadoras. En este campo puede profundizarse en diferentes problemas interesantes y que tienen una aplicacion casi inmediata en la realidad. Espero que este simulador sirva como una base experimental para tratar estos problemas, ademas de auxiliar en el problema tan intrincado de diseo, en el cual considero que Mexico debiera adentrarse lo mas pronto posible para no quedar relegado de lo que esta sucediendo alrededor del mundo. Ademas,

este simulador puede servir como una herramienta educativa para el estudio de redes de computadoras.

Existen aun muchas mejoras posibles al simulador. (como: manejo de prioridades, integracion de la señalizacion de cada trafico, implementacion de protocolos reales, etc.) que creo podran ser implementadas en etapas posteriores de la construccion de este simulador.

## APENDICE A: CORRIDAS DEL EJEMPLO DEL SIMULADOR

SIMULACION DE REDES DE COMPUTADORAS

CONDICIONES INICIALES:

SEMILLA INICIAL: 4.472E+06  
 NUMERO DE NODOS: 5  
 PUNTOS DE REGENERACION: 3  
 SERVICIOS EN EDO. ESTABLE: 3  
 SERVICIOS EN EDO. TRANSITORIO: 3  
 CAPACIDAD TOTAL DE LA RED [FPS]: 1.478E+06  
 TRAFICO TOTAL DE LA RED [MEN/SEG]: 10.000  
 LONGITUD PROMEDIO DE MENSAJE [BITS]: 250.000

OPCIONES DE ASIGNACION DE CAPACIDAD:

- 1: VALOR MEDIO CUADRATICO.
- 2: PROPORCIONAL.
- 3: UNIFORME.
- 4: CHERYSHEV O MIN-MAX.

OPCION: 3

CONNECTIVIDAD:

0	1	1	0	0
1	1	0	1	1
1	0	1	0	1
0	1	1	1	0

TRAFICO RELATIVO [X-MEN/SEG]:

0.000	15.000	3.000	3.000	5.000
15.000	0.000	4.000	6.000	2.500
3.000	4.000	1.000	2.000	1.000
3.000	6.000	2.500	0.000	3.500
5.000	2.500	1.000	3.500	0.000

DISTANCIAS ENTRE NODOS:

0	1	1	2	2
1	0	1	1	1
2	1	1	0	1

MEDIAS DE TIEMPOS DE LLEGADA [MEN/SEG]:

0.000	1.500	1.500	0.000	0.000
1.500	0.000	1.500	1.000	1.250
1.600	0.400	0.000	1.600	0.500
0.000	0.000	1.000	0.000	0.950
0.000	0.350	0.600	0.350	0.000

CAPACIDADES [BPS]:

0.000	105600.000	105600.000	0.000	0.000
105600.000	0.000	105600.000	0.000	105600.000
105600.000	105600.000	0.000	105600.000	105600.000
0.000	0.000	105600.000	0.000	105600.000
0.000	105600.000	105600.000	105600.000	0.000

PARAMETROS CALCULADOS:

RETRARDOS DE TIEMPO [MSEG]:

0.000	2.376	2.376	0.000	0.000
2.376	0.000	2.376	0.000	2.369
2.376	2.376	0.000	2.376	2.371
0.000	0.000	2.373	0.000	2.373
0.000	2.372	2.371	2.369	0.000

INTENSIDADES DE TRAFICO:

0.000	0.004	0.004	0.000	1.000
0.000	0.000	0.002	0.000	5.010E-14

0.004	9.471E-04	0.001	0.004	0.001
0.001	0.002	0.002	8.286E-04	0.002
0.000		0.001		0.000

LONGITUD PROMEDIO DE COLAS:

0.000	0.004	0.004	0.000	0.000
0.004	0.000	0.002	0.000	5.922E-04
0.004	9.470E-04	0.001	0.000	0.001
0.000	0.000	0.002	0.001	0.002
0.000	0.000	0.001	8.203E-04	0.000

PARAMETROS ESTIMADOS:

RETRARDOS DE TIEMPO EMERG:

0.000	2.415	2.573	0.001	0.000
2.343	0.000	2.415	0.001	0.400
2.351	2.410	0.001	0.316	0.400
0.000	0.000	2.402	0.001	2.379
0.000	2.313	2.379	2.337	0.000

INTENSIDADES DE TRAFICO:

0.000	0.004	0.004	0.000	0.000
0.003	0.000	0.002	0.000	6.133E-04
0.004	9.474E-04	0.000	0.004	0.001
0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
0.000	0.000	0.001	7.366E-04	0.000

LONGITUD PROMEDIO DE COLAS:

0.000	0.004	0.004	0.000	0.000
0.003	0.000	0.002	0.000	6.133E-04
0.004	9.494E-04	0.000	0.004	0.001
0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
0.000	0.000	0.001	7.875E-04	0.000

# SIMULACION DE REDES DE COMPUTADOR

## CONDICIONES INICIALES:

```

SEMIJA INICIAL: 4.541E+06
NUMERO DE NODOS: 5
PUNTOS DE REGENERACION: 1
TAMANO DEL BANDO (SEGS): 0.01
EPSILON DE CONVERGENCIA: 1.00E-03
SERVICIOS EN CADA ESTABLE: 30000
SERVICIOS EN CADA TRANSITORIO: 3000
TRAFFICO TOTAL DE LA RED (LLAM/SEG): 12.000
PROBABILIDAD MAXIMA DE BLOQUEO (%): 10.000
TIEMPO PROMEDIO DE RESPONSA (SEGS): 20.000
RAZON DE DIGITALIZACION DE VOZ (FPS): 4800.000
    
```

## CONNECTIVIDAD:

```

1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
    
```

## TRAFFICO RELATIVO (L-LLAM/SEG):

```

0.000 5.000 4.000 2.000 7.000
5.000 1.000 8.000 2.000 6.000
4.000 3.000 2.000 3.000 5.000
2.000 2.000 1.000 4.000 4.000
7.000 3.000 5.000 0.000 0.000
    
```

## DISTANCIAS ENTRE NODOS:

```

1 1 1 2 2
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
1 1 1 1 1
    
```



**MEDIAS DE TIEMPOS DE LLEGADA [LLAM/SEG]:**

0.000	1.000	1.465	0.000	0.000
1.000	1.000	1.750	1.000	0.940
1.465	1.060	0.000	1.465	1.368
0.000	1.100	0.465	0.000	1.300
0.000	1.040	1.368	1.368	0.000

**SLOTS POR MARCO:**

0	15	32	1	SLOTS
15	22	29	10	
32	17	17	10	
1	32	31	29	
1	1	1	1	

**CAPACIDADES [EPSI]:**

0.000	7200.000	15360.000	0.000	0.000
7200.000	0.000	10560.000	0.000	0.000
15360.000	10560.000	0.000	5760.000	1440.000
0.000	0.000	5760.000	0.000	13920.000
0.000	10560.000	14400.000	15920.000	0.000

**PARAMETROS CALCULADOS:**

**CARGA DEL SISTEMA [ENLANGS]:**

0.000	12.000	29.296	0.000	0.000
12.000	1.000	19.200	0.000	18.804
29.296	19.200	0.000	9.190	27.365
0.000	0.000	9.190	0.000	26.010
0.000	18.804	27.365	26.010	0.000

**PROBABILIDADES DE BLOQUEO [%]:**

100.000	8.573	8.579	100.000	100.000
---------	-------	-------	---------	---------

8.573	100.000	8.946	100.000	8.125
8.559	100.000	8.975	100.000	8.772
100.000	100.000	8.772	100.000	100.000

PARAMETROS INTERMEDIOS:

LLAMADAS NO SERVIDAS:

109	329	161
243	194	195
	113	206
	273	172

LLAMADAS SERVIDAS:

1221	1272	3164	2027
3105	1972	2062	2852
		0	2726
	1957	2916	2766

LLAMADAS TOTALES:

1330	1355	3603	2215
3348	2173	2256	3047
		1114	2973
	2157	3317	2960

PARAMETROS REALES:

CARGA DEL SISTEMA [ERLANGS]:

0.000	11.577	31.682	0.000	0.000
11.669	0.000	19.450	0.000	19.041

29.132	19.084	7.745	10.218	25.750
0.000	0.000	0.000	0.000	25.694
0.000	18.690	28.573	24.743	0.000

PROBABILIDADES DE BLOQUEO [X]:

0.000	6.125	8.982	0.000	0.000
8.195	1.000	0.599	0.000	7.269
7.258	9.250	1.000	12.747	6.400
0.000	0.000	11.592	0.000	8.917
0.000	3.165	8.313	5.811	0.000

PROP. DE BLOQUEO CALCULADA:

100.000	6.843	12.339	100.000	100.000
7.646	100.000	9.499	100.000	3.614
8.291	8.702	100.000	12.815	6.588
100.000	11.000	11.334	100.000	7.743
100.000	7.911	10.437	6.279	100.000

S I M U L A C I O N D E R E D E S H I B R I D A S D E C O M P U T A D O R A S

CONDICIONES INICIALES:

SEMILLA INICIAL:  
NUMERO DE NODOS:  
PUNTOS DE CONEXION:  
SERVICIOS EN NOD. ESTABLE:  
SERVICIOS EN NOD. TRANSITORIO:

4.659E+06

5  
3  
3

C O N E C T I V I D A D :

1  
1  
1  
1  
1

D I S T A N C I A S E N T R E N O D O S :

1  
1  
1  
1  
1

C I R C U I T O S

CONDICIONES INICIALES:

1  
1  
1

TRAFICO RELATIVO [X-LLAN/SEG]:

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

SEÑAS DE TIEMPO DE LLEGADA [LLAN/SEG]:

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

1.465  
1.051  
1.111  
1.151  
1.248

0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
1.563  
1.389  
0.000

SEÑAS POR BARCO:

15

15

15

15

15

CAPACIDADES EN SE:

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

0.000  
0.000  
0.000

PARAMETROS CULCHABOS:

0.000  
0.000  
0.000

PROBABILIDADES DE BLOQUEO E11:

100.000	0.373	8.539	100.000	100.000
100.000	0.373	8.539	100.000	100.000
100.000	0.373	8.539	100.000	100.000
100.000	0.373	8.539	100.000	100.000
100.000	0.373	8.539	100.000	100.000

P A Q U E T E S

CONDICIONES ESPECIALES:

TRAFICO TOTAL DE LA RED (MEN/SEG): 10.000  
 LONGITUD PROMEDIO DE MENSAJE (BITS): 250.000

OPCIONES DE PARTICION DE CAPACIDADES:

- 1: FIJA
- 2: MOVIL

OPCION: 2

TRAFICO RELATIVO E1-MEN/SEG1:

100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
100.000	100.000	100.000	100.000	100.000

MEDIAN DE TEMPO DE LLGADA E1-MEN/SEG1:

**SECTOS POR MARCO:**

1	22	22	0	
23	22	22	22	22
0	22	22	22	

**CAPACIDADES CONJUNTAS [CORS]:**

1772	177	2592			
2592	177	2592	1652	2448	2448
	2192	2448	2448	2448	2448

**PARAMETROS CALCULADOS:**

**RETARDOS DE TIEMPO [CORS]:**

0.000	0.376	0.376		
2.376	0.376	0.376	0.376	0.376
0.000	0.376	0.376	0.376	0.376
0.000	0.376	0.376	0.376	0.376

**INTENSIDADES DE TRAFICO:**

0.000	0.000	0.470	0.000	0.000
0.000	0.470	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

**LONGITUD PROMEDIO DE COLAS:**

0.000	0.000	0.470	0.000	0.000
0.000	0.000	0.470	0.000	0.000

PARAMETROS INFORMES:

LLAMADAS NO SERVIDAS:

171	137	173	199
240	137	173	199
171	137	173	199

LLAMADAS SERVIDAS:

1278	3443	1278	3443
1278	3443	1278	3443
1278	3443	1278	3443
1278	3443	1278	3443

LLAMADAS TOTALES:

1383	3686	1383	3686
1383	3686	1383	3686
1383	3686	1383	3686
1383	3686	1383	3686

PARAMETROS REALES:

CARGA DEL SISTEMA (ERLANGES):

11.005	12.008	12.776	13.111	13.332
29.748	29.748	29.748	29.748	29.748
11.005	12.008	12.776	13.111	13.332
11.005	12.008	12.776	13.111	13.332



0.000	7.500	9.533	0.000	0.000
0.207	0.000	0.000	0.000	0.000
7.302	7.077	0.000	0.035	0.000
0.000	0.000	7.000	0.000	0.000
0.000	0.000	7.330	0.771	0.000

PROB. DE BLOQUEO (CALCULADA):

1.000	0.000	10.000	1.000	10.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

RETARDOS DE TIEMPO (SEGUNDO):

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

INTENSIDADES DE TRAFICO:

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

LONGITUD PROMEDIO DE COLAS:

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

MENSAJES TRUNCADOS:

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

04	14	51	3	43
03	20	17	26	29
01	4	4	31	44
0	37	29	44	1

## APENDICE B: FIGURAS

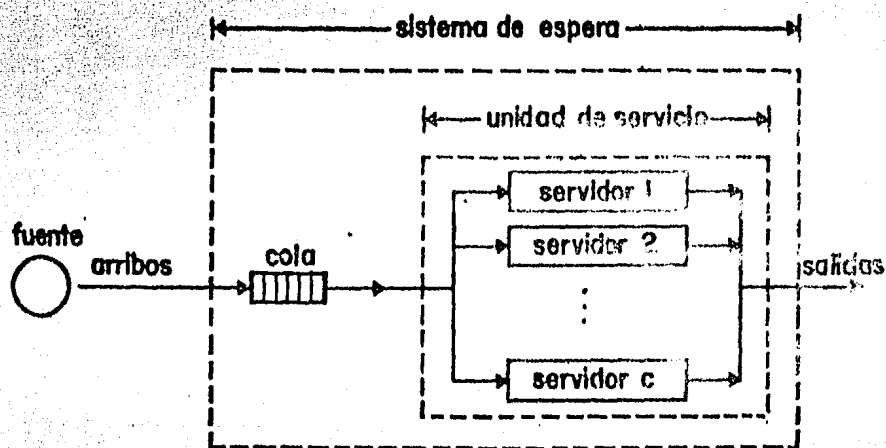


Figura 1. Componentes de un sistema de espera.

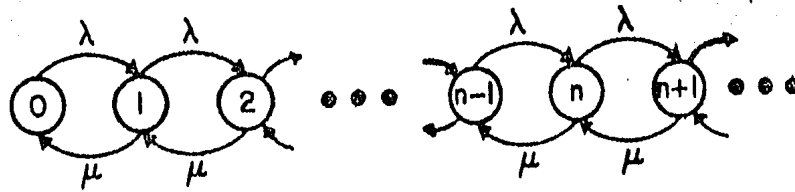


Figura 2. Diagrama de intensidades de transición para la cola M/M/1.

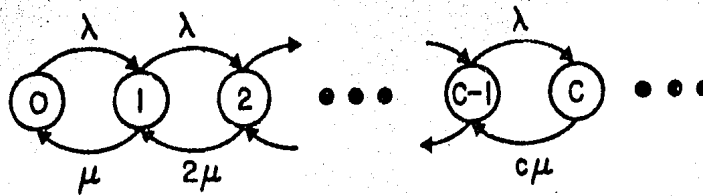


Figura 3. Diagrama de intensidades de transición para el sistema M/M/c/c.

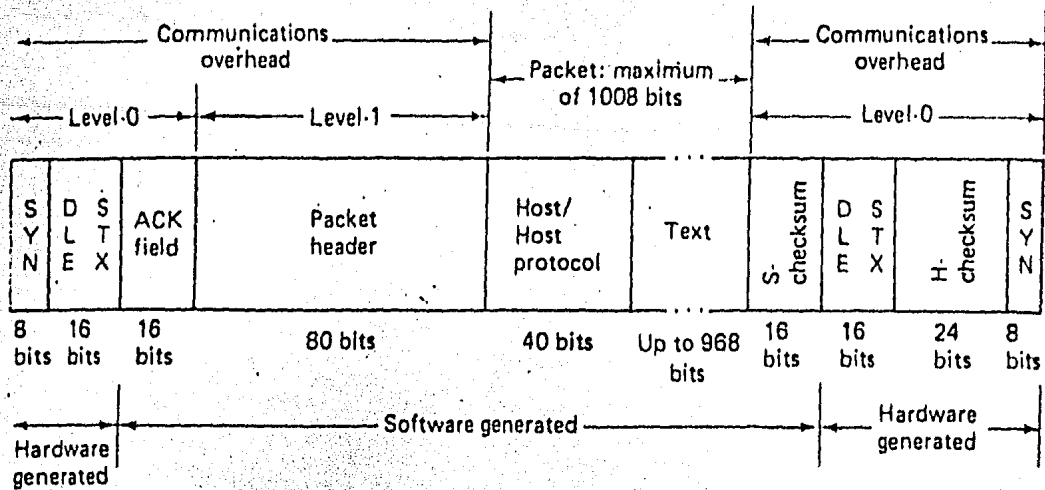


Figura 4. Formato del paquete de datos en la red ARPA.

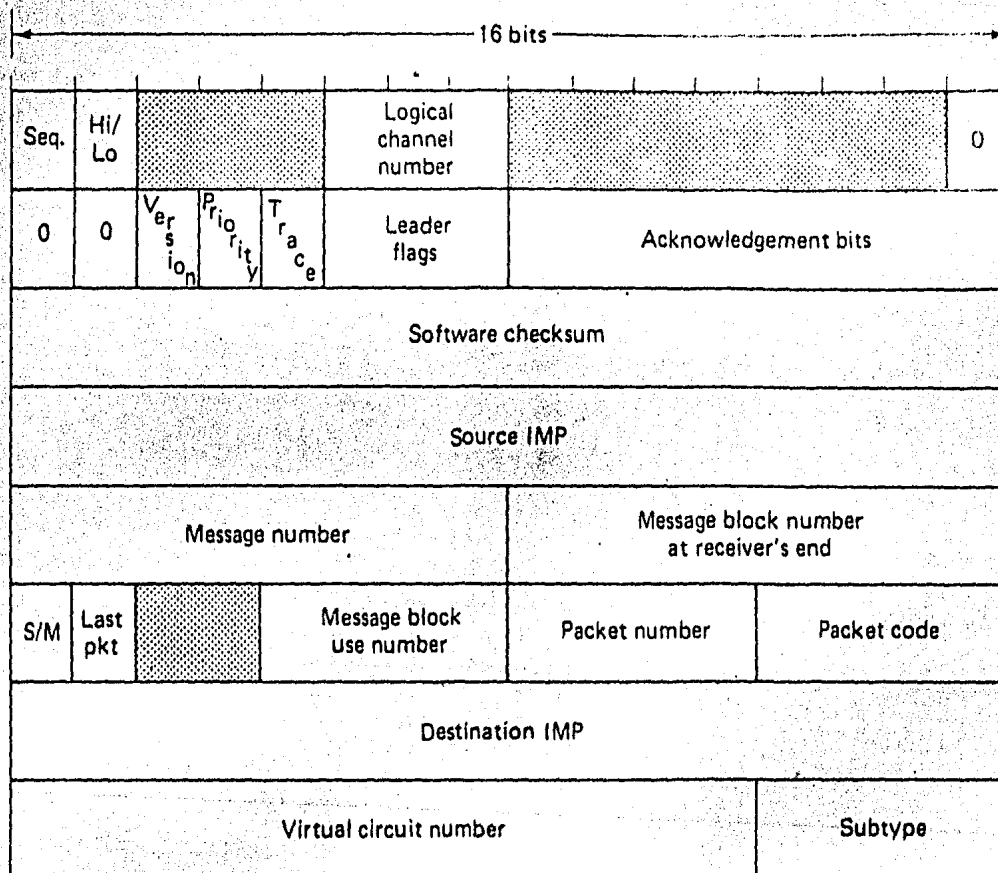


Figura 5. Encabezado de un paquete de datos en la red ARPA; los campos sombreados estan reservados para uso futuro.

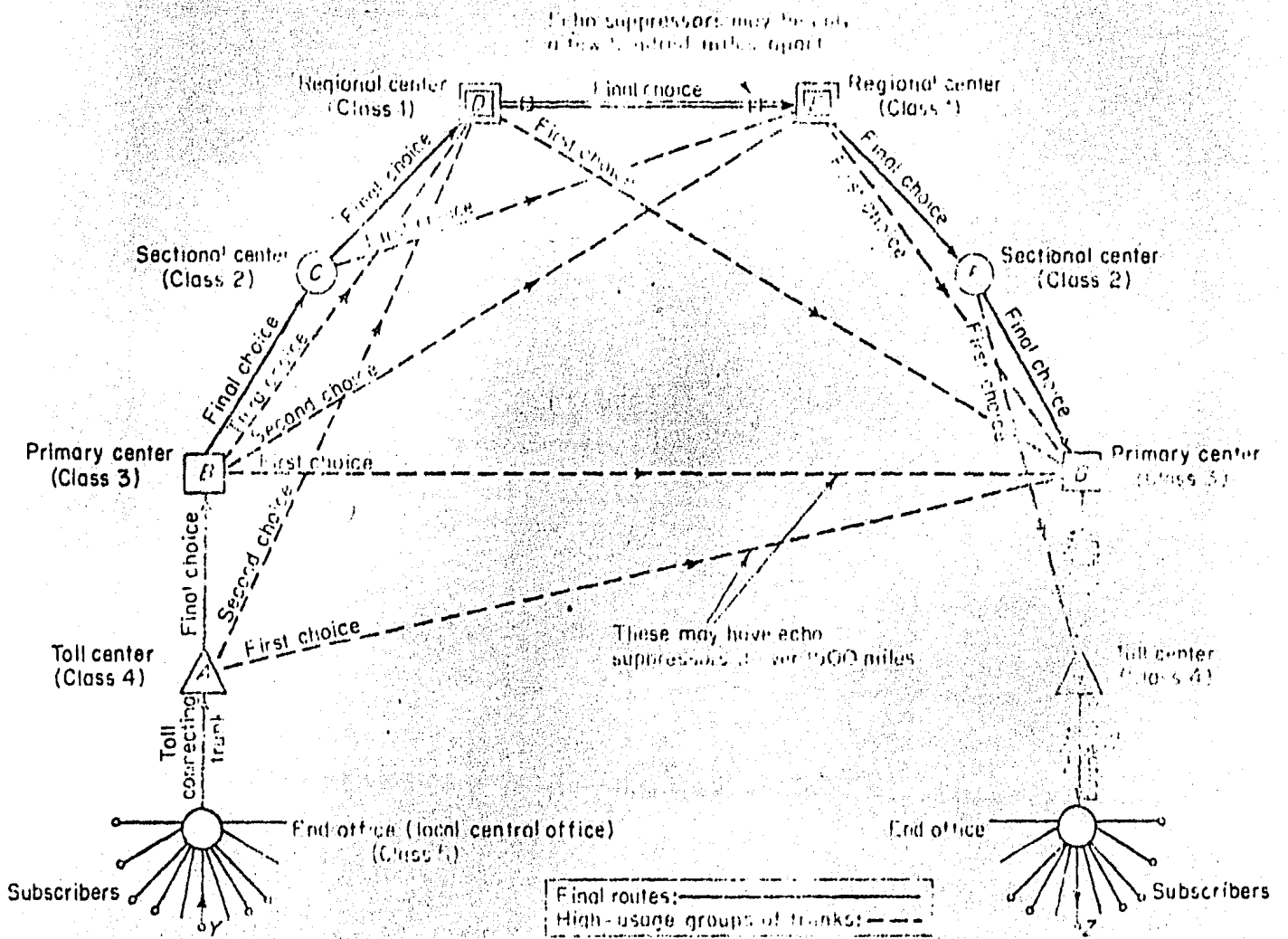


Figura 6. Diagrama de las jerarquias del sistema telefonico.

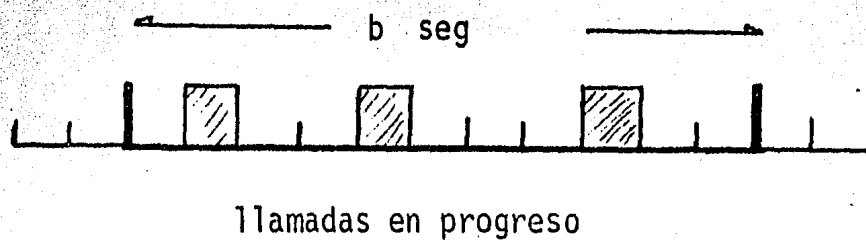


Figura 7. Estructura del canal con conmutacion de circuitos: marco con multiplexaje por division del tiempo.

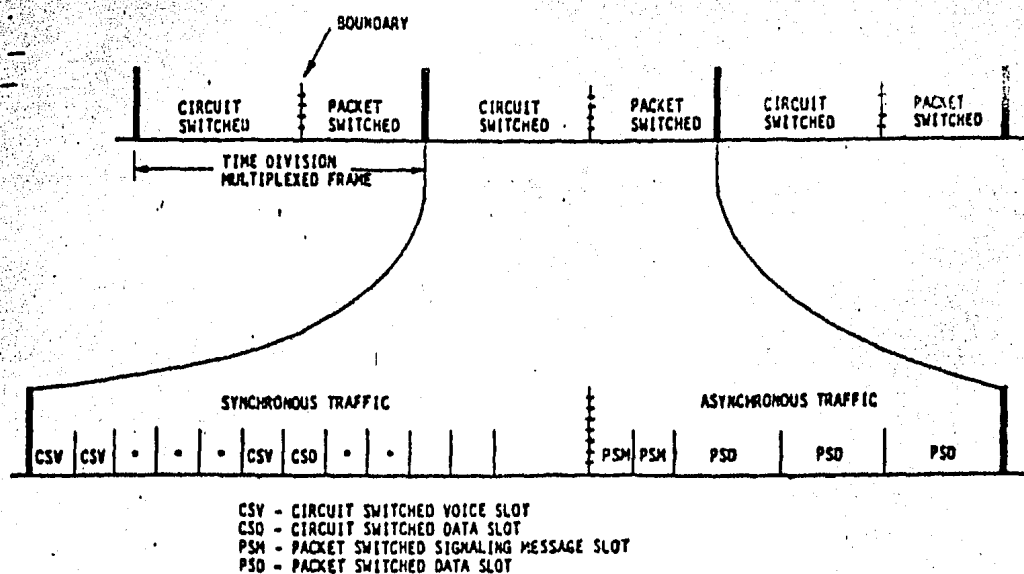


Figura 8. Estructura del canal con conmutacion hibrida: marco con multiplexaje por division del tiempo.

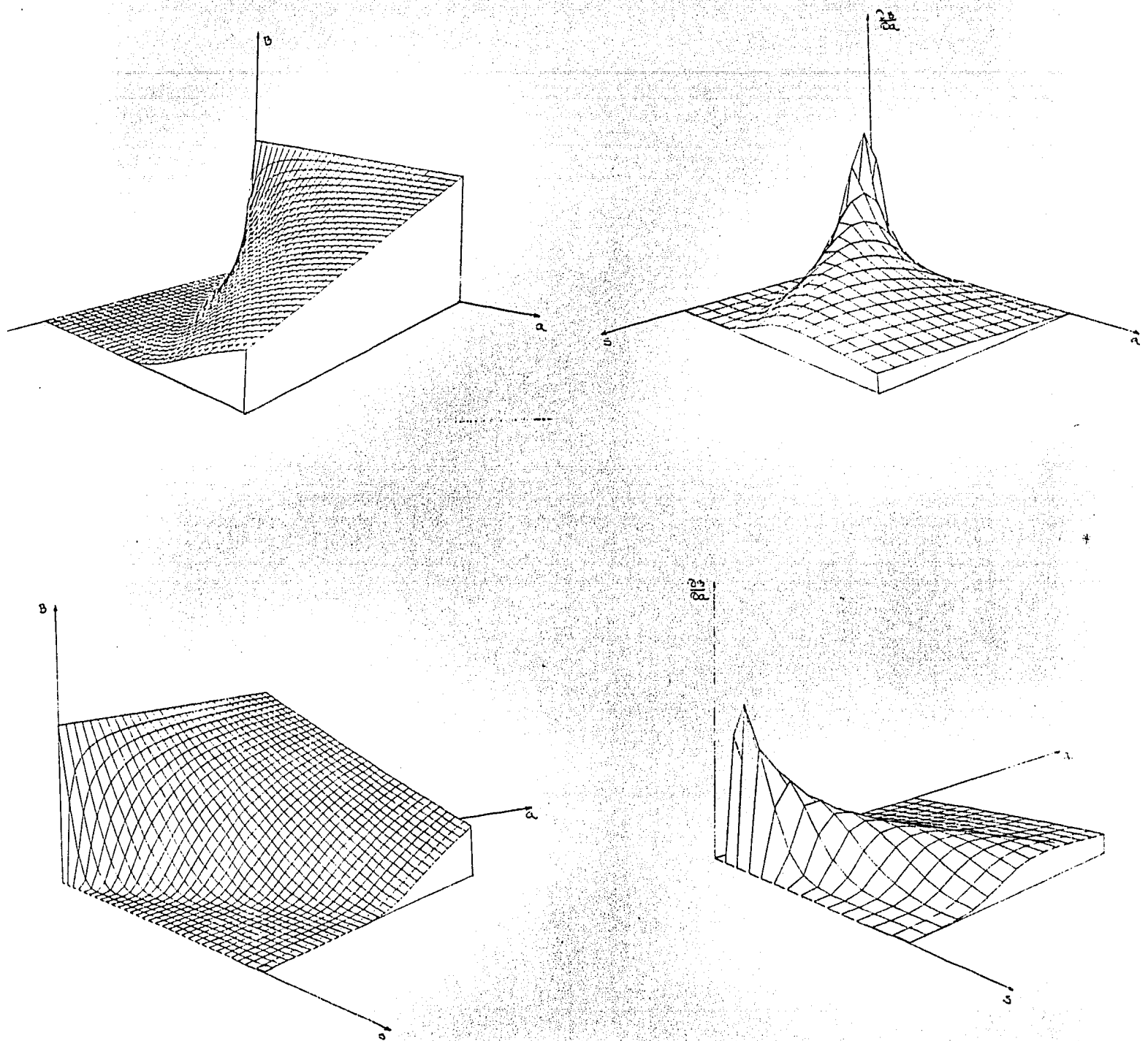


Figura 9. Graficas de la probabilidad de bloqueo y de su derivada parcial con respecto al trafico.



```

SIZE=largest subscript in array (SIZE=5 for 6x6 array);
DO ITER=1 to SIZE-1;
  DO I=0 to SIZE;
    DO J=0 to SIZE;
      IF X(I).Y(J)=ITER
        THEN DO K=0 to SIZE;
          IF X(J).Y(K)=1 AND X(I).Y(K)=0 AND I≠K
            THEN X(I).Y(K)=ITER+1;
        END;
      END;
    END;
  DO I=0 to SIZE;
    DO J=0 to SIZE;
      IF I≠J AND X(I).Y(J)=0
        THEN X(I).Y(J)=SIZE+1;
    END;
  END;

```

Set DEST=destination node:

```

TEST, NEXT__NODE=SIZE+1;
IF DEST=N THEN GO TO WE__ARE__DESTINATION;
DO I=0 to SIZE;
  IF X(N).Y(I)=1 AND X(I).Y(DEST)<TEST
    THEN DO:
      TEST=X(I).Y(DEST);
      NEXT__NODE=I;
    END;

```

```

END;
IF NEXT__NODE=SIZE+1 THEN GO TO NO__PATH;

```

NEXT\_\_NODE now contains proper value for next node

Unless:

- (1) the routine jumped to WE\_\_ARE\_\_DESTINATION, in which case it was asked to find a path from a node to itself, or
- (2) the routine jumped to NO\_\_PATH, in which case there is no path of any length to the desired destination.

Figura 10. Programa para transformar la matriz de conectividad en la matriz de distancia (parte superior) y calculo del siguiente nodo (parte inferior).

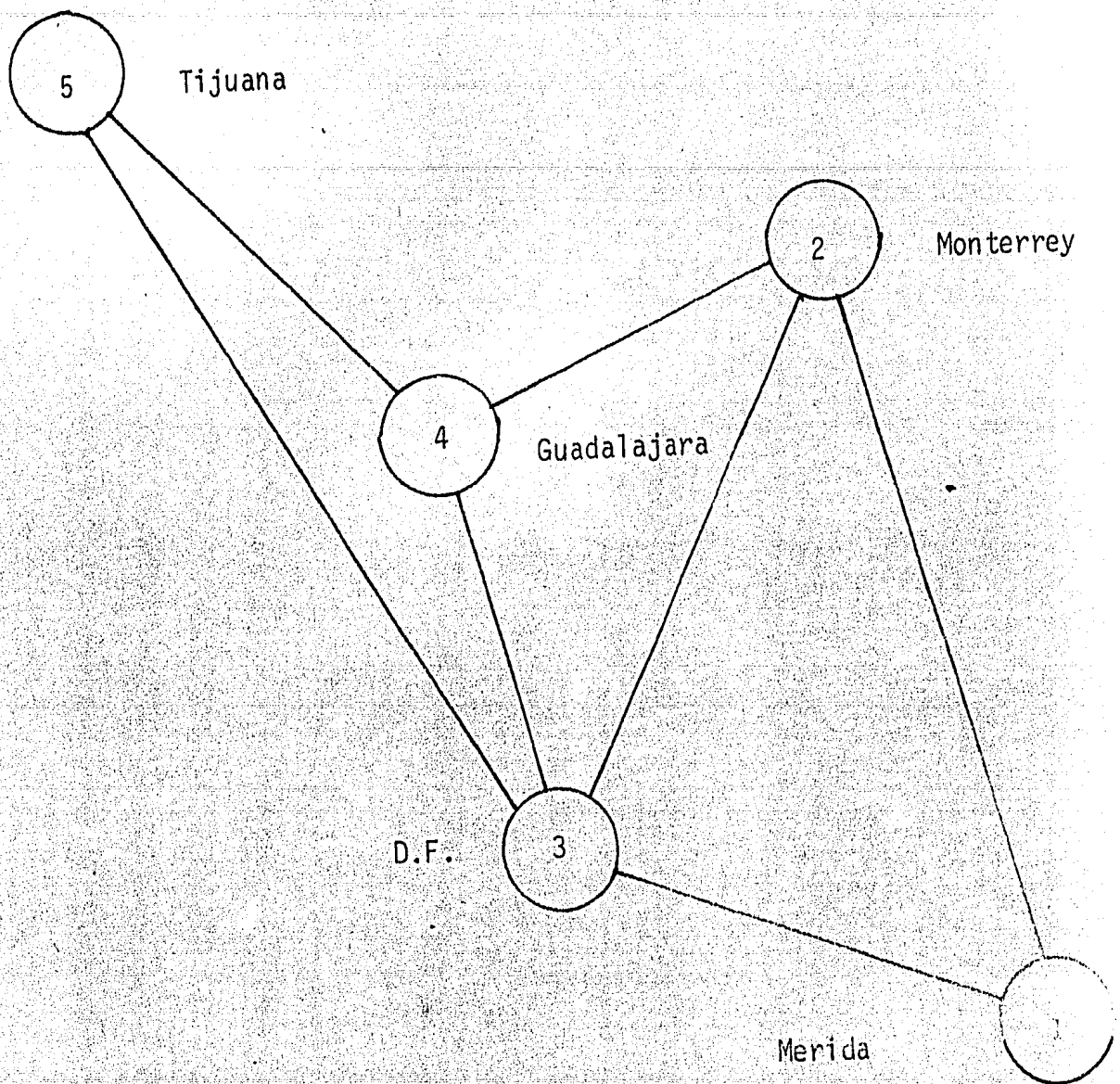


Figura 11. Configuración de la red propuesta como solución al ejemplo presentado.

## REFERENCIAS

1. Tanenbaum, Andrew S. *"Computer Networks"*. Prentice Hall Inc, 1981.
2. Rudin, Harry. *"Studies on the Integration of Circuit and Packet Switching"*. International Conference on Communications (ICC), 1978.
3. Kleinrock, Leonard. *"Communication Nets"*. Dover Publications, 1964.
4. Gitman, Israel; Hsieh, Wen-Ning & Occhiogrosso, Benedict J. *"Analysis and Design of Hybrid Switching Networks"*. IEEE Transactions on Communications, Sep 1981.
5. Schwartz, Mischa. *"Computer Communication Network Design and Analysis"*. Prentice Hall Inc, 1977.
6. McQuillan, John M. *"Routing Algorithms for Computer Networks - A Survey"*. National Telecommunications Conference (NTC), 1977.
7. Rudin, Harry. *"On Routing and Delta Routing: A Taxonomy and Performance Comparison of Techniques for Packet-Switched Networks"*. IEEE Transactions on Communications, Ene 1976.
8. Tobagi, Fouad; Gerla, Mario; Peebles, Richard & Manning, Eric G. *"Modeling and Measurement Techniques in Packet Communication Networks"*. Proceedings of the IEEE, Nov 1978.
9. Papoulis, Athanasios. *"Probability, Random Variables and Stochastic Processes"*. McGraw-Hill Inc, 1965.
10. Hernandez L., Onesimo. *"Procesos Estocásticos: Introducción a la Teoría de Colas"*. Segundo Coloquio del Departamento de Matemáticas del CIEA del IPN, 1981.
11. Jacoby, Samuel L.S. & Kowalik, Janusz S. *"Mathematical Modeling with Computers"*. Prentice Hall Inc, 1980.
12. Martin, James. *"Telecommunications and the Computer"*. Prentice Hall Inc, 1969.
13. Pazos R., Rodolfo A. y Samadi, Behrokh. *"Panorama sobre Redes de Comunicación Integradas para Computadoras"*. Teledato - Revista de la SCT, 1981.
14. Leon-Garcia, Alberto; Kwong, Raymond H. & Williams, Gilbert F. *"Performance Evaluation Methods for an Integrated Voice/Data Link"*. IEEE Transactions on Communications, Ago 1982.

15. Occhiogrosso, Gitman, Hsieh y Frank "*Performance Analysis of Integrated Switching Communications Systems*". Proceedings of the National Telecommunications Conference (NTC), 1977.
16. Brayer, Keneth & Lafleur, Valerie. "*A Testbed Approach to the Design of a Computer Communication Network*". IEEE Computer Magazine, Oct 1982.

## OTRAS REFERENCIAS CONSULTADAS

Fischer, M.S. & Harris, T.C. "A Model for Evaluating the Performance of an Integrated Circuit- and Packet-Switched Multiplex Structure". IEEE Transactions on Communications, Feb 1976.

Maglaris, Basil & Schwartz, Mischa. "Optimal Bandwidth Allocation In Integrated Line- and Packet-Switched Channels" . International Conference on Communications (ICC), Jun 1979.

Reiser, Martin. "Performance Evaluation of Data Communication Systems" . Proceedings of the IEEE, Feb 1982.

Aburdene, Maurice F. "Computer Communication Networks: a Case History" . IEEE Potentials Magazine, Fall 1982.