

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

***DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE REDES TELEFÓNICAS
(ANÁLISIS DE COSTOS)***

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARIO GUSTAVO LÓPEZ HERNÁNDEZ
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

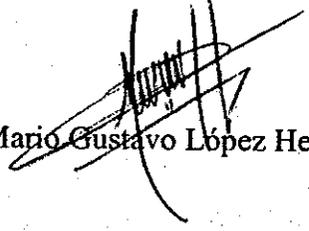
GUATEMALA, MARZO DE 1,999.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE REDES
TELEFÓNICAS
(ANÁLISIS DE COSTOS),**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica con fecha 13 de noviembre de 1,997 No. EIME.316.97.


Mario Gustavo López Hernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | | |
|------------|-------|--------------------------------------|
| DECANO | ING. | HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS |
| VOCAL 1º. | ING. | JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ RIVERA |
| VOCAL 2º. | ING. | CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ |
| VOCAL 3º. | ING. | JORGE BENJAMÍN GUTIÉRREZ QUINTANA |
| VOCAL 4º. | BR. | DIMAS ALFREDO CARRANZA BARRERA |
| VOCAL 5º. | BR. | JOSÉ ENRIQUE LÓPEZ BARRIOS |
| SECRETARIA | INGA. | GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

| | | |
|------------|-------|--------------------------------------|
| DECANO | ING. | HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS |
| EXAMINDOR | ING. | JULIO CÉSAR SOLARES PEÑATE |
| EXAMINDOR | ING. | EDWIN ALBERTO SOLARES MARTINEZ |
| EXAMINDOR | ING. | EDGAR LORENCIO MONTÚFAR URIZAR |
| SECRETARIA | INGA. | GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS |

Guatemala, 23 de diciembre de 1,998.

Ingeniero Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC
Su despacho.

Ingeniero Solares:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado totalmente el trabajo de tesis del señor Mario Gustavo López Hernández, titulado: *"Dimensionamiento y optimización económica de redes telefónicas. (Un análisis de costos)"*, y sugiero la aprobación del mismo, pues cumple los requerimientos deseados.

Así mismo, le manifiesto que tanto el autor de este trabajo de tesis como mi persona, compartimos la responsabilidad del contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,


Ing. Julio César González Saenz
Colegiado No. 2821
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 25 de enero de 1999

Señor Director
Ing. Roberto Urdiales
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

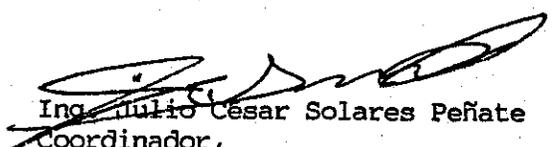
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado:
"DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACION ECONOMICA DE REDES TELEFONICAS (UN
ANALISIS DE COSTOS)", realizada por el estudiante Mario Gustavo
López Hernández, ya que cumple con los requisitos establecidos para
tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador,
Area de Electrónica

JCGP/fdema.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante Mario Gustavo López Hernández, titulado: Dimensionamiento y optimización económica de redes telefónicas (un análisis de costos), procede a la autorización del mismo.

Ing. Roberto Urdiales Contreras

Director

Guatemala, 18 de febrero de 1,999.

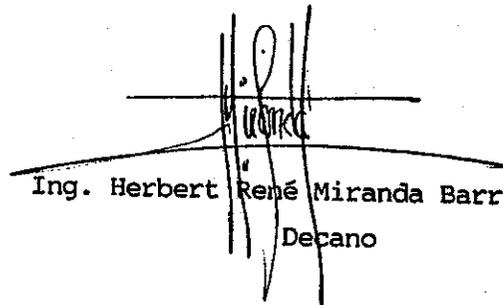




FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: Dimensionamiento y optimización económica de redes telefónicas (un análisis de costos), del estudiante Mario Gustavo López Hernández, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
Decano

Guatemala, 15 de marzo de 1,999.



AGRADECIMIENTO

A DIOS

Por ser la fuente de luz y sabiduría.

A LA VIRGEN MARÍA

Por su amor maternal y consuelo.

A MIS PADRES

Por la comprensión que tuvieron en el desarrollo de este trabajo.

A JULIO GONZÁLEZ

Por su amistad y guía constante.

A JUAN CARLOS SOTO

Por su apoyo desinteresado.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | IV |
| LISTA DE SÍMBOLOS | X |
| GLOSARIO | XIV |
| INTRODUCCIÓN | XV |
| | |
| 1. TEORÍA DE COSTOS | 1 |
| 1.1 Generalidades y definiciones | 1 |
| 1.1.1 Costos incrementales promedio a largo plazo | 4 |
| 1.1.2 Costos promedio | 7 |
| 1.1.3 Costos marginales | 7 |
| 1.1.4 Costos a largo plazo | 9 |
| 1.2 Características económicas de las redes de telecomunicaciones | 9 |
| 1.2.1 Aspectos globales | 9 |
| 1.2.2 Rasgos característicos de una red de telecomunicaciones | 10 |
| 1.2.2.1 Funciones de red | 10 |
| 1.2.2.2 Características económicas | 11 |
| 1.2.2.3 Demanda telefónica | 12 |
| 1.2.2.4 Cambios tecnológicos | 14 |
| 1.2.2.5 Costos promedio y costos promedio radiales | 15 |
| 1.2.2.6 Externalidades y la definición de precios | 16 |
| 1.2.3 Tipos de tarifas | 17 |
| 1.2.4 Marco de referencia | 19 |
| 1.2.4.1 Suposiciones generales | 19 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.2.5 | Tarifas en ambientes monopolísticos | 24 |
| 1.2.5.1 | Precios a costos marginales | 24 |
| 1.2.5.2 | Precios en base a carga pico | 26 |
| 1.2.5.3 | Incertidumbre y racionamiento | 28 |
| 1.2.5.4 | Racionamiento prioritario y precios en tiempo real | 29 |
| 1.2.5.5 | Precios Ramsey en mercados regulados monopolísticos | 30 |
| 1.2.5.6 | Precios Ramsey con externalidades | 32 |
| 1.2.5.7 | Precios dinámicos | 33 |
| 1.2.5.8 | Eficiencia | 35 |
| 1.3 | Costos en el desarrollo y explotación de redes de telecomunicaciones | 36 |
| 1.3.1 | Ingresos y economías de costo | 39 |
| 1.3.2 | Factores de costo | 39 |
| 2. | DIMENSIONAMIENTO | 44 |
| 2.1 | Dimensionamiento básico | 44 |
| 2.1.1 | Conceptos generales y consideraciones económicas según la teoría de tráfico | 44 |
| 2.1.2 | Proceso de dimensionamiento | 54 |
| 2.1.2.1 | Rutas directas | 54 |
| 2.1.2.2 | Rutas alternas | 57 |
| 2.1.3 | Ejemplo práctico de dimensionamiento | 59 |
| 2.2 | Optimización de las rutas de desborde | 80 |
| 2.2.1 | Algoritmo económico | 80 |
| 2.2.2 | Matriz de costos | 87 |
| 2.3 | Dimensionamiento de la red de señalización número 7 (SS7) | 89 |
| 2.3.1 | Proceso de dimensionamiento | 89 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3. | MODELO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES | 96 |
| 3.1 | Modelo de la red de conmutación | 96 |
| 3.2 | Modelo de la red de señalización No. 7 (SS7) | 100 |
| 3.3 | Modelo de la red de transmisión | 103 |
| 3.4 | Modelo de la estación terrena | 105 |
| 3.5 | Distribución porcentual de intereses | 105 |
| 3.6 | Sumario de costos | 106 |
| | | |
| 4. | ANÁLISIS ECONÓMICO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES | 108 |
| 4.1 | Interconexión a una red dominante sin capacidad | 108 |
| 4.1.1 | Consideraciones generales | 108 |
| 4.1.2 | Determinación de la capacidad exacta requerida por el interconectante | 109 |
| 4.1.3 | Determinación de la capacidad más próxima, a los requerimientos del interconectante, existente en el mercado | 112 |
| 4.2 | Interconexión a una red con capacidad de reserva | 116 |
| | | |
| | CONCLUSIONES | 121 |
| | RECOMENDACIONES | 123 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 125 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| No. | Título | Pág. |
|-----|--|------|
| 1 | Función de costos obtenida a través de la adición de las componentes fijas y variables | 3 |
| 2 | Problema de ineficiencia en los precios obtenidos en base a costos marginales | 25 |
| 3 | Movimiento monetario en el desarrollo de un proyecto de telecomunicaciones | 41 |
| 4 | Diagrama de rutas directas (o alto uso) y rutas tránsito (o rutas finales) en la conexión de dos conmutadores A y B, utilizando un conmutador tránsito T | 45 |
| 5 | Variación del costo total $[K]$ con respecto a los cambios en el número de circuitos directos $[N_{dir}]$ | 50 |
| 6 | Interconexión de los conmutadores usados en el ejemplo de dimensionamiento | 60 |
| 7 | Representación de una posición matricial y significado de los valores numéricos que la forman | 62 |
| 8 | Forma de obtener el tráfico saliente (fila) para un conmutador en el cual únicamente se conoce el tráfico entrante (columna) y la relación entrante/saliente $[R_{e/s}]$ | 70 |
| 9 | Interpretación gráfica de una posición matricial imagen | 74 |
| 10 | Reportes gráficos o diagramas de vías de los conmutadores dimensionados | 79 |

| No. | Título | Pág. |
|-----|---|------|
| 11 | Diagramas de vías en sistemas digitales de los conmutadores dimensionados en la sección 2.1.3 | 87 |
| 12 | Representación gráfica de una matriz de costos o de razones de costo | 88 |
| 13 | Topología, interconexión y distancias de la red de conmutación ficticia | 97 |
| 14 | Topología de la red superpuesta de señalización SS7 | 101 |
| 15 | Topología de la red de transmisión | 103 |
| 16 | Interconexión entre el operador dominante y el nuevo operador (Itx) | 109 |

TABLAS

| No. | Título | Pág. |
|------|--|------|
| I | Formas de clasificar las inversiones en el área de las telecomunicaciones | 37 |
| II | Proceso de valoración de las inversiones | 38 |
| III | Elementos constitutivos de los gastos de inversión y de los gastos de funcionamiento en los sistemas de telecomunicaciones | 40 |
| IV | Método de estimación de costos de instalación de diversos equipos partiendo de los costos elementales de las unidades de planta | 42 |
| V | Clasificación principal de teorías matemáticas utilizadas en el dimensionamiento (válidas para conmutadores de accesibilidad completa) | 46 |
| VI | Datos de los conmutadores hipotéticos utilizados para realizar el ejemplo práctico de dimensionamiento | 60 |
| VII | Distribución porcentual de los intereses de comunicación entre los distintos conmutadores hipotéticos utilizados en el ejemplo de dimensionamiento | 61 |
| VIII | Cálculo del tráfico ofrecido por los usuarios a los diferentes conmutadores hipotéticos tomando como referencia los datos expuestos en la tabla VI | 63 |

| No. | Título | Pág. |
|------------|---|-------------|
| IX | Matriz de tráfico ofrecido entre conmutadores. No se encuentra balanceada | 64 |
| X | Componentes locales de la matriz de tráfico original | 66 |
| XI | Sumatorias esperadas para obtener las relaciones entrante/saliente expuestas en la tabla VI | 66 |
| XII | Primera iteración (por columnas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos originales expuestos en la tabla X | 67 |
| XIII | Segunda iteración (por filas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos de la tabla XII | 68 |
| XIV | Tercera iteración (por columnas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos de la tabla XIII | 68 |
| XV | Cuarta iteración (por filas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos de la tabla XIV | 69 |
| XVI | Matriz final de tráfico ofrecido entre conmutadores | 71 |
| XVII | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador A | 72 |
| XVIII | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador B | 72 |
| XIX | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador C | 73 |
| XX | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador D | 73 |
| XXI | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador E | 73 |
| XXII | Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador F | 74 |

| No. | Título | Pág. |
|------------|--|-------------|
| XXIII | Resumen del dimensionamiento de los circuitos finales existentes entre los conmutadores A, B, C, D y F con el conmutador tránsito E | 77 |
| XXIV | Matriz de circuitos directos (ver tablas XVII a XXII) | 78 |
| XXV | Matriz de circuitos finales o tránsito (ver tabla XXIII) | 78 |
| XXVI | Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos directos a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3 | 84 |
| XXVII | Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos finales a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3, después de haber dimensionado nuevamente todas las rutas finales con los valores modificados de medias y varianzas expuestos en la tabla XXVI | 85 |
| XXVIII | Mensajes principales utilizados en una red de señalización SS7 que alcanza el bloque funcional ISUP | 91 |
| XXIX | Posibles estados que puede alcanzar una llamada telefónica, frecuencias típicas de ocurrencia en una red telefónica que funciona correctamente, cantidad de mensajes requeridos, longitud media y media de mensajes por estado | 91 |
| XXX | Información general y parámetros técnicos de los conmutadores de la red ficticia de conmutación | 98 |
| XXXI | Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de un conmutador y el CPU del mismo | 98 |
| XXXII | Costos unitarios de inversión inicial, procesamiento y enlaces en los conmutadores | 99 |
| XXXIII | Costos asociados a los conmutadores de la red ficticia de conmutación | 100 |
| XXXIV | Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de un STP | 102 |

| No. | Título | Pág. |
|------------|--|-------------|
| XXXV | Costos y parámetros técnicos de los STP's de la red de señalización SS7 | 102 |
| XXXVI | Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de una red de Transmisión | 103 |
| XXXVII | Características de la red de fibra óptica del modelo ficticio | 104 |
| XXXVIII | Costos de inversión inicial de los conmutadores y STP's del modelo ficticio | 105 |
| XXXIX | Características de la estación terrena | 105 |
| XL | Distribución porcentual de intereses de comunicación entre conmutadores de la red ficticia | 106 |
| XLI | Sumario de los costos asociados al desarrollo e implementación de la red de telecomunicaciones ficticia | 106 |
| XLII | Distribución porcentual de intereses de comunicación entre el operador dominante y el nuevo operador (Itx) | 110 |
| XLIII | Información general y parámetros técnicos exactos obtenidos del proceso de dimensionamiento de la red alterna que debe implementar el operador dominante para dar interconexión a un operador (Itx) que ofrece 9.36 millones de minutos de conversación al mes | 111 |
| XLIV | Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante (capacidades exactas) | 111 |
| XLV | Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante (capacidades reales) | 113 |
| XLVI | Información general y parámetros técnicos reales obtenidos del proceso de dimensionamiento de la red alterna que debe implementar el operador dominante para proveer una capacidad de 28.08 millones de minutos de conversación al mes | 114 |

| No. | Título | Pág. |
|------------|--|-------------|
| XLVII | Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante con capacidad de interconexión triplicada | 114 |
| XLVIII | Información general y parámetros técnicos de los conmutadores de la red original del operador dominante | 116 |
| XLIX | Nueva distribución porcentual de intereses de comunicación entre el operador dominante (que proyecta una ampliación por interconexión) y el nuevo operador de telecomunicaciones (Itx) | 117 |
| L | Información general y parámetros técnicos reales obtenidos del proceso de dimensionamiento (considerando un nuevo tráfico internacional entrante a la red de 676 Erl.) de la red dominante con ampliaciones para proveer interconexión al nuevo operador | 117 |
| LI | Costos de la red dominante con ampliaciones para proveer capacidad de interconexión de 9.36 millones de minutos | 118 |
| LII | Variaciones del costo de inversión anualizado del operador dominante, debido a cambios en las variables técnicas y económicas que lo definen | 119 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| A | Tráfico aleatorio equivalente. |
| a | Tráfico ofrecido. |
| A_{abo} | Tráfico por abonado medio generado hacia el conmutador. |
| Ac | Tráfico cursado. |
| A_{sat} | Tráfico saliente. |
| a_t | Tráfico ofrecido total, es decir, la sumatoria de los tráfico ofrecidos a todas aquellas rutas que poseen el mismo enlace tránsito. |
| α | Tráfico perdido total del sistema, es decir, hacia un mismo enlace tránsito. |
| B | Probabilidad de congestión o de bloqueo (en el presente análisis, $B=E(c,a)$). |
| b | Costo variable constante. |
| B_l | Probabilidad de bloqueo al tener un tráfico aleatorio equivalente A . |
| β | Tasa de renta constante por unidad de capacidad. |
| C | Número de circuitos necesarios para perder exactamente α Erlangs. |
| c | Cantidad de circuitos. |
| $C(y)$ | Costo total de un proyecto "y". Forma alternativa de la función de costos K. El argumento es variable. |
| C_{fijos} | Costo fijo. |
| C_{inc} | Costo incremental. |
| C_{mar} | Costo marginal. |
| C_{prom} | Costo promedio. |
| CS | Beneficio del Usuario (del inglés "Customer Surplus"). |
| C_{sis} | Número fijo de circuitos que constituyen un sistema. |
| C_{tot} | Costo total de producción. |

| | |
|-------------------------------|---|
| C_{var} | Costo variable. |
| Δ | Delta o cambio en alguna variable. |
| $E(c,a)$ | Probabilidad de congestión. |
| ε | Elasticidad. |
| F_{estado} | Frecuencia con que se dan las llamadas de un estado en particular. |
| γ | Número de Ramsey. |
| i | Volumen de información que debe cursar una ruta de señalización [bits/seg]. |
| K | Función de costos y capacidad máxima productiva. |
| $\langle l_{estado} \rangle$ | Longitud media de un estado en particular [bits]. |
| $\langle l_{mensaje} \rangle$ | Longitud media de un mensaje [bits]. |
| lc | Tráfico cursado por el c -ésimo circuito. |
| $l_{mensaje}$ | Longitud de cada uno de los mensajes involucrados en un estado en particular [bits]. |
| λ_g | Factor que afecta a los gastos de gobierno, reflejo de las distorsiones económicas que generan los subsidios de fuentes externas. |
| M | Longitud, en kilómetros, de una ruta directa. |
| m | Tráfico medio que desbordan las c troncales de una ruta directa. |
| m_{mpc} | Número medio de mensajes por llamada [mess/call]. |
| m_{mps} | Número medio de mensajes por estado. |
| MSU_{ps} | Unidades de señalización de mensaje por segundo [Msu/seg = mess/seg]. |
| m_{tn} | Pendiente o escala de aumento de los mensajes debido a los pasos tránsito. |
| μ_{ps} | Número de llamadas por segundo [Call/seg]. |
| N_{abo} | Número de abonados que posee el conmutador. |
| N_{dir} | Número de circuitos directos. |

| | |
|-------------------|--|
| n_{estado} | Número de mensajes por estado. |
| $N_{rf} = C_{rf}$ | Número de circuitos en la ruta final. |
| n_{sr} | Número de rutas de señalización que se desean crear. |
| ∇V | Gradiente de V. |
| P | Vector lineal de precios. |
| P_m | Proporción de tráfico cursado vía tránsito. |
| π | Ganancia de la empresa. |
| $(q_i)_N$ | Conjunto de servicios comprados por N clientes. |
| Q | Cantidad de producción. |
| q | Razón de costo. |
| q_i | Vector que representa el servicio de telecomunicaciones comprado por el i-ésimo cliente, suponiendo que es conocido el conjunto de servicios de telecomunicaciones ofrecido. |
| $q_i(p)$ | Demanda de servicio de telecomunicaciones del i-ésimo usuario. |
| q'_i | Cantidad de otros bienes consumidos por el usuario i. |
| r | Tamaño de una economía de escala. |
| $R(q_i)$ | Gasto por el servicio de telecomunicaciones del i-ésimo usuario. |
| $R_{e/h}$ | Relación entrante/saliente (interurbana o internacional) de un conmutador. |
| S | Beneficio Social (del inglés "Surplus"), abreviatura de sistemas y número hipotético de troncales de alto uso (en la teoría del teletráfico). |
| Sce_j | Sumatoria de columnas esperada. |
| $Sc_j(k-1)$ | Sumatoria de columnas de la iteración (k-1). |
| Sfe_i | Sumatoria de filas esperada. |
| $Sf_i(k-1)$ | Sumatoria de filas de la iteración (k-1). |
| Sl | Número de enlaces de señalización. |
| T | Periodos de tiempo. |

| | |
|---------------------|--|
| t | Tiempo. |
| t_m | Tiempo medio de duración de la llamada o retención del enlace [seg]. |
| u | Tráfico cursado por el aumento de una troncal en la ruta final. |
| U_i | Utilidad bruta del servicio de telecomunicaciones del i -ésimo usuario. |
| U'_i | Utilidad neto del servicio de telecomunicaciones del i -ésimo usuario. |
| $\langle v \rangle$ | Varianza. |
| v | Tráfico económicamente óptimo cursado por la última troncal en la ruta directa. |
| $V(y)$ | Volumen de tráfico generado por un proyecto "y". El argumento es variable. |
| $V_i(p)$ | Utilidad indirecta del i -ésimo usuario. |
| V_s | Velocidad de transmisión por canal de un sistema digital [Bits/seg]. |
| W | Función de precios de Ramsey. |
| x | Representación de la infraestructura original de una red de telecomunicaciones. |
| y | Representación de un nuevo proyecto de telecomunicaciones. |
| y_i | Ingreso del usuario i . |

GLOSARIO

| | |
|---------------------------------|---|
| Densidad telefónica | Porcentaje de la población de un país que tiene acceso a los servicios de telecomunicaciones. |
| Dimensionamiento | Proceso de cálculo que busca obtener la cantidad necesaria de determinado elemento que satisfaga las necesidades del usuario. |
| Enrutamiento | Rutas o caminos seguidos para comunicar dos elementos (conmutadores, STP's, etc.) distantes físicamente. |
| Estocástico | Relativo a cualquier proceso que se efectúa aleatoriamente, es decir, sin un orden específico. |
| Externalidades | Efectos positivos o negativos no esperados que se obtienen al realizar un proyecto. No pueden ser contabilizados. |
| Hora pico | También recibe el nombre de hora cargada. Es la hora en la cual se ofrece la máxima carga de tráfico telefónico a un grupo de circuitos. |
| Operador dominante | Empresa proveedora del servicio de telecomunicaciones que posee la mayor densidad telefónica en un país determinado. |
| Operador interconectante | Empresa proveedora del servicio de telecomunicaciones que proyecta enlazar su red telefónica con la de algún otro operador. |
| Teoría del teletráfico | Teoría probabilística-matemática que describe el comportamiento del tráfico telefónico. |
| Tráfico telefónico | Relación existente entre el tiempo de ocupación de un circuito (troncal) y el tiempo de observación del mismo. También se denomina teletráfico. |

INTRODUCCIÓN

Toda red de telecomunicaciones sufre continuamente variaciones en el volumen de tráfico que debe manejar, debido a la interconexión de nuevos operadores, crecimiento demográfico, incremento en la cantidad de información transmitida por la red (debido al surgimiento de nuevos servicios), etc. Esto hace que los diversos operadores se vean en la necesidad de efectuar inversiones para ampliar o bien desarrollar redes alternativas que suplan las necesidades de comunicación de los usuarios.

Para poder realizar, en forma óptima, dichas inversiones; es decir, que se conjugue la funcionalidad con la economía, es necesario utilizar la teoría del teletráfico y algunos algoritmos económicos que permitan determinar los requerimientos exactos de equipo.

Una vez obtenidas, en forma fiable, las inversiones totales, los operadores deben obtener valores representativos anuales de las mismas, a través de aplicar correcciones tales como el factor de retorno de la inversión, el costo por depreciación y el costo por impuestos, para que de esta forma se obtengan los costos promedio o los costos incrementales promedio a largo plazo en el caso de realizar un proyecto nuevo o una ampliación por interconexión, o algún factor semejante, respectivamente.

Con estos costos, a saber, los costos promedio y los costos incrementales, los operadores están en posición de establecer tarifas adecuadas que promuevan competencia en el mercado y el uso eficiente de los recursos escasos de las telecomunicaciones.

En el presente trabajo de tesis se busca definir la teoría de costos que fundamenta el análisis de las inversiones en el área de las telecomunicaciones, así como el análisis tarifario para usuarios en ambientes monopolísticos. Más adelante se desarrolla la teoría del teletráfico más importante en el dimensionamiento de redes de telecomunicaciones, así como un algoritmo económico que optimiza dicho proceso, esto debido a que la teoría de costos incrementales promedio a largo plazo exige que la configuración de red que se utilice para el cálculo sea la más eficiente y de más bajo costo existente. Por último, en la parte final del trabajo, se realiza un análisis técnico-económico de una red ficticia de telecomunicaciones frente a la necesidad de proveer capacidad de interconexión a un nuevo operador. Esto se hace con el fin de ejemplificar el uso de los costos promedio y los costos incrementales promedio a largo plazo en el establecimiento de puntos de referencia para los planes tarifarios en el área de telecomunicaciones.

Todos los precios de equipo utilizados en este trabajo de tesis son supuestos lógicos para ejemplificar la teoría y no precios obtenidos de algún proveedor. Por tanto, cualquier parecido a algún precio de equipo en particular es pura coincidencia, y esto no significa que representa a algún fabricante específico.



TEORÍA DE COSTOS

El objetivo de esta primera fase es presentar en una forma concreta la definición de costo y sus implicaciones en el medio económico, para así comprender su importancia en la ejecución de cualquier proyecto. En este punto, pese a los objetivos del trabajo, se presentan las definiciones de costos incrementales, costos promedio y costos marginales, para poder entender sus diferencias y por ende la aplicación de cada uno de ellos en la estimación de tarifas adecuadas para el servicio telefónico. Más adelante se exponen las características de las redes de telecomunicaciones desde un punto de vista económico, haciendo énfasis en algunas teorías tarifarias.

Por último, se presenta la forma en que se deben tomar en cuenta los costos al momento de desarrollar y explotar una red de telecomunicaciones.

1.1 Generalidades y definiciones

Costo, viene de la palabra *coste*, y en su significado más amplio representa la magnitud de recursos perdidos en un período dado en la búsqueda de ciertos fines. Debido a que los recursos son escasos, después de haber sido aplicados para la obtención de un fin, no pueden ser vueltos a utilizar para alcanzar otro.

Las diversas opciones en que pueden aplicarse los recursos permiten hablar de costos **alternativos** o de **oportunidad**, y el objetivo económico primordial es aplicarlos en la opción óptima. Sin embargo, no siempre es posible elegir esta, debido a la influencia de factores como los siguientes:

- a. Los precios de los recursos utilizados, por depender de un monopolio u oligopolio, no reflejan su costo real.
- b. Los costos mínimos para una empresa pueden no serlo para el resto de la sociedad.
- c. La dificultad de poder establecer con claridad y exactitud la magnitud de las diversas opciones.

Los *costos totales de producción* [C_{tot}] constituyen el valor de los recursos utilizados en la obtención de un producto y pueden ser representados por una función de costos que está integrada por costos fijos y costos variables, es decir, $C_{tot} = C_{fijos} + C_{var}$.

Los *costos fijos* [C_{fijos}] o constantes son aquellos que no varían al hacerlo la cantidad producida, es decir, no se ven afectados por la cantidad de trabajo que se realiza en un centro de responsabilidades (unidad de una organización cuyo administrador es el responsable de todas las actividades). Los costos fijos también son llamados "OVERHEAD". Son costos fijos, por ejemplo, el edificio de una empresa, la maquinaria, los pagos del seguro y los gastos de investigación, puesto que no varían mucho en un rango moderado de actividades. Las empresas deben incurrir, a corto plazo, en estos costos aunque no produzcan ninguna salida.

El hecho de que un costo sea fijo o variable depende del período de tiempo que se considere, puesto que a largo plazo todos los costos varían por depender del volumen de producción. En consecuencia, la distinción entre costos fijos y variables es válida únicamente a corto y mediano plazo.

De lo anterior, puede considerarse que *corto plazo* es un período de producción durante el cual algunas de las entradas no varían. En el corto plazo, la producción es limitada, puesto que la capacidad de planta disponible también lo es. En otras palabras, existe muy poco tiempo en el corto plazo para incrementar el tamaño de la planta.

Por otro lado, *largo plazo* es un período de producción suficientemente grande en el cual los productores tienen tiempo suficiente para variar todas las entradas utilizadas para la producción de un bien. En el Largo Plazo no existen entradas fijas.

Los *costos variables* [C_{var}] son aquellos que dependen de la variación de la producción, en otras palabras, son los egresos que cambian en forma **proporcional** al trabajo que se efectúa en una organización y representan el costo de todas las variables de entrada. Un ejemplo de estos costos, son los incurridos al obtener materia prima, la cual debe obtenerse en mayor cantidad cuando la producción aumenta. Si el cambio de los egresos **no es directamente proporcional** al trabajo efectuado, los costos reciben el nombre de *semivARIABLES*, los cuales pueden constituir gastos fundamentales de la empresa. La mano de obra a corto plazo suele ser un costo semivariable.

En la figura 1 se representa una función de costos típica, la cual se obtiene de la adición de los costos fijos y variables.



Figura 1

Función de costos obtenida a través de la adición de las componentes fijas y variables.

En la figura anterior se puede apreciar un crecimiento rápido al principio de la curva, luego se estabiliza hasta alcanzar un punto denominado "óptimo de producción" a partir del cual la pendiente de la curva vuelve a aumentar rápidamente.

1.1.1 Costos incrementales promedio a largo plazo

Para poder entender el uso y el porqué de los costos incrementales promedio a largo plazo es necesario analizar las tendencias o cambios que ha sufrido el mercado de las telecomunicaciones en las últimas décadas.

En el pasado, la mayor parte de operadores de telecomunicaciones eran monopolios, por lo que proveían servicios de interconexión cobrando el tiempo de utilización de los enlaces, es decir, cargas por minuto con independencia del origen y la dirección del tráfico generado.

Este sistema permitía que los operadores establecieran tarifas que limitarían el acceso a nuevos inversionistas y a la vez que garantizaran la cobertura de todos sus gastos. Estas tarifas (cargas por minuto) permanecían estables debido a que no había presión competitiva que exigiera mantener los precios en concordancia a los costos.

Los interconectantes tergiversaban sus decisiones tarifarias y de inversión debido a que las cargas por minuto eran constantes; es decir, el precio por minuto era el mismo para una llamada hecha a media noche que para una realizada en horas pico. Esto obligó a que se eliminarán tarifas reducidas en horas de la noche y además que los inversionistas prefirieran el tráfico comercial que el doméstico debido a su mayor rentabilidad. En otras palabras, el precio de interconexión utilizando cargas por minuto estaba orientando las decisiones de mercadeo y de inversión hacia una supuesta eficiencia totalmente tergiversada.

En la actualidad, dentro de un mercado de telecomunicaciones competitivo no es posible hablar de precios de interconexión utilizando cargas por minuto, es más, es deseable que los diferentes operadores se den cuenta de los grandes beneficios que tanto ellos como los usuarios obtienen en el proceso de interconexión de sus redes, de tal forma que si el tráfico que se origina hacia la otra red se equilibra con el tráfico terminado de la otra red, o bien, que los costos de manejar el tráfico terminado de la otra red son muy bajos, no se deba realizar ninguna carga por interconexión. Esta condición es denominada "Sender Keeps all" y es la que utilizan los proveedores de servicios de Internet en la actualidad.

Sin embargo, en las redes de telecomunicaciones ordinarias no siempre es posible tener esta condición de equilibrio entre el tráfico originado y el terminado de la otra red, por lo que es necesario que el operador que envía más tráfico pague cierta carga de interconexión al otro operador, pero, utilizando criterios tecnico-económicos, esta carga debe calcularse en base a los costos de la capacidad que se requiere implementar para manejar el tráfico terminado.

Los *costos incrementales promedio a largo plazo* permiten calcular en forma óptima las cargas de interconexión entre un operador de telecomunicaciones y un interconectante en base a la capacidad que requiere el primero para manejar el tráfico que el interconectante desea terminar en él, de tal forma que los precios obtenidos a partir de estos costos incrementales sean estables y permitan el desarrollo de un mercado de telecomunicaciones totalmente competitivo.

El costo incremental promedio se puede expresar como la relación existente entre la diferencia del costo de la red tomando en cuenta al nuevo operador (proyecto) y el costo de la infraestructura original de la red, con el volumen de tráfico que genera el nuevo operador (proyecto).

La ecuación [1.1] muestra la expresión matemática utilizada en el cálculo de costos incrementales.

$$C_{inc} = \frac{C(x+y) - C(x)}{V(y)} \quad [1.1]$$

Donde:

| | |
|-----------|---|
| C_{inc} | Costo incremental |
| x | Representación de la infraestructura original de la red |
| y | Representación del nuevo proyecto |
| $C(x+y)$ | Costo de la red tomando en cuenta el nuevo proyecto |
| $C(x)$ | Costo de la infraestructura original de la red |
| $V(y)$ | Volumen de tráfico generado por el nuevo proyecto |

La LEY GENERAL DE TELECOMUNICACIONES de Guatemala definía los costos incrementales promedio a largo plazo como “*el costo promedio de proveer el volumen base del elemento considerado de la red en una forma incremental, lo que equivale a dividir el Costo Total Incremental del Servicio de Largo Plazo (CTIS-LP) entre las unidades de volumen base.*”

El CTIS-LP es el costo de la red que incluye la provisión del volumen base del elemento considerado, menos el costo de la red sin la provisión de dicho volumen base”. Sin embargo, actualmente esta ley ya no contempla los costos incrementales promedio a largo plazo, pues los ha reemplazado por costos de inversión.

Los costos incrementales pueden expresarse en primera instancia como un rango de costos de capacidad, de cada unidad de tráfico, anualizados basados en la hora pico y luego, a través de la utilización de una distribución adecuada de tráfico, transformarlos en un costo incremental promedio por minuto para la mejor interpretación de los resultados.

Debido a que el costo incremental promedio se calcula utilizando como base la hora pico, el costo real de cada minuto durante esta hora es mayor, y es igual a cero en el tiempo en el cual el tráfico no es crítico (fuera de la hora pico).

1.1.2 Costos promedio

Los costos promedio por unidad proveída (minutos de conversación) representan el monto erogado por un operador de telecomunicaciones, en el momento de realizar un nuevo proyecto, por cada unidad de capacidad que provee. Estos se pueden definir como la relación existente entre el costo total del nuevo proyecto (tomando en cuenta las limitantes tecnológicas del mercado) y el volumen de tráfico generado por el mismo.

La ecuación [1.2] muestra la expresión matemática que define a los costos promedio.

$$C_{prom} = \frac{C(y)}{V(y)} \quad [1.2]$$

Donde:

| | |
|------------|---|
| C_{prom} | Costo promedio |
| y | Representación del nuevo proyecto |
| $C(y)$ | Costo total del nuevo proyecto |
| $V(y)$ | Volumen de tráfico generado por el nuevo proyecto |

Los costos promedio siempre serán mayores o iguales a los costos incrementales promedio a largo plazo:

$$C_{prom} \geq C_{inc}$$

1.1.3 Costos marginales

Cuando se analizan los costos de producción de "n" elementos, el objetivo real de la economía es lograr el uso óptimo de los recursos; es decir, alcanzar la máxima producción de dichos elementos. Para alcanzar este objetivo es necesario contestar la pregunta ¿Es posible producir un elemento más? ¿Sí o no? Entonces se podrá aumentar la producción de elementos hasta que la respuesta a esta pregunta sea "No".

De lo anterior, se puede notar que el costo total de producir "n" elementos **no** es relevante, pero el costo de producir uno más sí lo es.

Entonces, se pueden definir los **costos marginales** como el costo necesario para producir uno o varios elementos más. Así mismo estos constituyen el concepto más importante para la adecuada distribución de recursos.

Los costos marginales, consecuentemente, pueden aproximarse a través de relacionar el cambio en el costo generado por un determinado cambio en la producción de elementos. La ecuación [1.3] representa la expresión matemática que permite el cálculo de los costos marginales y refleja la independencia que tienen estos últimos de los costos fijos.

$$C_{mar} = \frac{\Delta C}{\Delta P} \quad [1.3]$$

Donde:

| | |
|------------|--|
| C_{mar} | Costo marginal |
| ΔC | Cambio en el costo total ($C_2 - C_1$) debido a un cambio en la producción |
| ΔP | Cambio en la producción ($P_2 - P_1$) |

Los costos marginales decrecientan al inicio y luego incrementan. El eventual aumento en los costos marginales refleja la **ley de la disminución del retorno marginal**, la cual expresa que mientras más cantidad de una o más variables de entrada se utilice, eventualmente las salidas se harán más y más pequeñas. Entonces, en este límite, se utiliza cada vez más de las variables de entrada para producir cada unidad extra de salida, ocasionando de esta forma un incremento en los costos marginales.

Los costos marginales son utilizados en los análisis econométricos para aproximar el rango en el cual se encuentran los costos incrementales de un nuevo proyecto de telecomunicaciones (interconexión, ampliación, etc.), con el inconveniente de que por lo general se obtiene una sobre estimación de los mismos.

1.1.4 Costos a largo plazo

Son los costos mínimos de producir cualquier salida cuando todas las entradas son variables. La diferencia básica entre el largo plazo y el corto plazo es la flexibilidad. En el largo plazo, los productores tienen opciones que no se dan en el corto plazo. En el largo plazo se pueden controlar las salidas y los costos, no sólo variando la intensidad de la operación sino también variando el tamaño de la planta.

Ahora bien, para fijar los precios se debe tomar en cuenta que el precio máximo que un comprador pagaría por otra unidad de un bien es el BENEFICIO MARGINAL del bien, y el mínimo precio que un vendedor aceptaría para hacer otra unidad de un bien es el COSTO MARGINAL. La eficiencia requiere que el **beneficio marginal** sea igual al **costo marginal**.

Para poder entender más claramente las implicaciones que tienen los costos en el área de telecomunicaciones, en la siguiente sección se desarrollan las características económicas principales de estas redes y se exponen algunas teorías tarifarias para fijar precios a los usuarios. Sin embargo, las relaciones existentes entre los precios de los usuarios y las inversiones que realizan los operadores de telecomunicaciones no se exponen, debido a que el objetivo de este trabajo es definir costos de inversión y no fijar tarifas para los usuarios.

1.2 Características económicas de las redes de telecomunicaciones

1.2.1 Aspectos globales

Las telecomunicaciones se pueden considerar como un intercambio bidireccional de información (voz o datos) entre usuarios, el cual puede realizarse utilizando enlaces directos (punto a punto) entre las terminales de dichos usuarios.

Sin embargo, con esta tecnología, el costo marginal de cada enlace incrementa proporcionalmente con el tamaño de la red y para un poco más de unos cuantos usuarios, es necesario encontrar una forma más económica.

Para ello se introducen las centrales de conmutación (o simplemente **conmutadores**), las cuales aprovechan la economía de escala y concentran todas las llamadas que se dirigen a un mismo punto, agrupándolas para transportarlas sobre enlaces de capacidad limitada. Actualmente, las redes telefónicas utilizan la técnica de “conmutación de circuitos” la cual reserva una trayectoria (circuito) para cada llamada y la dedica exclusivamente a esta llamada liberándola cuando cesa la comunicación entre los terminales.

1.2.2 Rasgos característicos de una red de telecomunicaciones

1.2.2.1 Funciones de red

Desde un punto de vista funcional muy amplio, una red de telecomunicaciones se puede dividir en tres partes:

Facilidades de acceso, que son los medios que utilizan los usuarios para conectarse a la red. El medio más común para el acceso es el par trenzado de cobre desde el usuario (terminal) hasta el conmutador. Este “loop de abonado” tiene suficiente capacidad para llevar una llamada telefónica de voz o un limitado volumen de datos, utilizando, la mayoría de las veces, medios analógicos de transmisión.

Funciones de conmutación, que se llevan a cabo en el conmutador por medio de equipo electrónico automático controlado por computadora. Este equipo establece la trayectoria de la comunicación entre los usuarios y reserva la capacidad necesaria en facilidades compartidas de conmutación y transporte durante la duración de la comunicación.

Funciones de transporte, son las que permiten que las llamadas originadas en un conmutador puedan enlazarse con uno o más conmutadores hasta alcanzar su destino. Esta función no es necesaria en las llamadas intra-oficinas (manejadas por el mismo conmutador). Las facilidades de transporte de muy alta capacidad normalmente se proveen a través de cables de fibra óptica. Existen métodos alternativos (microondas, comunicaciones vía satélite, cables de cobre) para proveer las facilidades.

La tecnología digital, utilizando la microelectrónica, ha producido el costo más bajo para proveer las funciones de conmutación y de transporte, mientras que la tecnología analógica es la preferida para proveer las facilidades de acceso a los usuarios. Sin embargo, para proveer el producto final **"la llamada telefónica"**, se requiere de una gran variedad de servicios asociados para supervisar, mantener y contabilizar la producción.

1.2.2.2 Características económicas

Al igual que en algunos otros servicios proveídos por redes, las redes de telecomunicaciones poseen los componentes y las facilidades geográficamente ubicados en relación a los usuarios finales. La producción requiere de mucho capital y no se puede almacenar el producto en inventarios para compensar las diferencias según el tiempo de la producción y la demanda.

Sin embargo, las telecomunicaciones se diferencian de otros tipos de redes en que las facilidades de producción tienen capacidades bien definidas y el costo de operación es "casi" independiente del flujo de servicios que circulan a través de aquellas facilidades. Debido al uso extensivo de componentes electrónicos, los costos de mantenimiento y energía son, la mayoría de las veces, el resultado de operar una facilidad y son casi independientes del uso. Por tal razón, (exceptuando los servicios de operadora) los costos variables son muy pequeños.

Componentes individuales, aunque limitados en sus capacidades, se utilizan varias veces en el proceso de producción de varias salidas (llamadas telefónicas). Los servicios de telecomunicaciones se producen típicamente en una red que agrupa más de una tecnología. Por ejemplo, una red para transportar llamadas telefónicas entre diferentes conmutadores puede utilizar enlaces de fibra óptica a diferentes velocidades, microondas, facilidades de par de cobre trenzado, etc. Esta diversidad de sistemas permite a la red explotar economías de escala a diferentes volúmenes de transporte.

Con diferencias muy amplias en los volúmenes de información, es eficiente utilizar enlaces de alta capacidad con fibra óptica y enlaces de microondas para poblaciones dispersas geográficamente.

Las múltiples tecnologías ocurren cuando se sustituyen los equipos antiguos por modernos. Sin embargo, la modernización es económica cuando los costos de reparación y mantenimiento de una pieza en particular finalmente exceden el costo incremental de inversión en la nueva generación. Una vez alguna facilidad ha sido instalada en una red en operación, la mayoría de los costos específicos desaparecen.

1.2.2.3 Demanda telefónica

La demanda en telecomunicaciones, es en gran parte, demanda para el intercambio de información y conversación en forma bidireccional. Como resultado, los servicios de telecomunicaciones deben ser producidos en tiempo real y en gran medida deben ser no almacenables. La excepción es el tráfico de mensajes en un sentido, tal el caso de datos o transmisiones de facsímil, que no requieren reconocimiento inmediato.

Aunque la demanda de telecomunicaciones de un usuario individual pareciera estocástica para un observador, la demanda del mercado tiene fuertes patrones diarios y semanales.

En la mayoría de los mercados urbanos por ejemplo, las llamadas locales alcanzan su máximo, alrededor de la mitad de la mañana o a mediados de la tarde.

El hecho de que los servicios de telecomunicaciones no se puedan almacenar en un inventario y que sus costos variables sean muy pequeños, hacen que el problema clásico de la carga a la hora pico, se presente en su forma más compleja y extrema.

Mientras la capacidad disponible no se exceda, pueden producirse salidas (minutos de conversación), a costos adicionales realmente despreciables.

Lo anterior hace que en los servicios de telecomunicaciones (a diferencia de las redes de energía y transporte) los costos marginales de producir una unidad fuera de la hora pico (hora no pico) se aproximen a cero. Por el contrario, cuando la demanda excede a la capacidad, las salidas deben ser racionadas, rechazando o en último caso poniendo en cola las llamadas no completadas. En este caso, la congestión y el racionamiento de la capacidad por mecanismos diferentes al precio, resultan en una externalidad negativa.

Lo anterior es cierto hasta cierto límite, debido a la "Ley de la disminución del retorno marginal" (expuesta en la sección 1.1.3), pues en algún momento y eventualmente una variable que afecte al costo podría convertirse en una constante.

La naturaleza bidireccional de la demanda de servicios de telecomunicaciones origina una "externalidad de red" positiva. Esto es, el valor de una red, a un usuario en particular, incrementa con el número de otros usuarios que tienen acceso a ella.

Como en las redes de transporte, la demanda se distribuye a través de un gran número de mercados distintos.

Por lo general la demanda por acceso a las redes es muy inelástica al precio, más aún, las llamadas locales son relativamente insensible al precio, mientras que los servicios más especializados y más caros (ej. Servicios de larga distancia), son más sensitivos al precio (esto no es del todo cierto en los mercados regulados y monopolísticos).

Por otro lado, la demanda residencial es más elástica que la de los usuarios comerciales. Sin embargo, la demanda para un proveedor de servicios, puede ser muy sensitiva al precio, especialmente para clientes de negocios que tienen varias opciones de comunicaciones.

1.2.2.4 Cambios tecnológicos

Los costos en los sistemas de transmisión se han reducido gracias a que los cables de fibra óptica y las técnicas de multiplexación han incrementado la capacidad de transmisión enormemente.

En los sistemas de conmutación, los equipos digitales computarizados han reducido grandemente los costos de operación y mantenimiento, y las innovaciones de software han expandido el rango de servicios prestados por ellos.

Por otro lado, la tecnología de acceso no ha avanzado tan rápido. Para nodos de bajo volumen de tráfico, la tecnología más barata sigue siendo el cable de cobre, pero la distribución por medio de cables de fibra óptica y enlaces de microondas son ampliamente utilizados para el movimiento de grandes volúmenes de información principalmente entre centrales de conmutación. La tecnología celular está ampliándose grandemente, primeramente como una extensión de acceso hacia nuevos nodos de telefonía móvil.

1.2.2.5 Costos promedio y costos promedio radiales

Las características económicas esenciales en la tecnología de las telecomunicaciones, se representan por "*funciones de costo*", las cuales permiten el cálculo de los costos totales de la producción. Al relacionar los costos totales con la cantidad de servicio producido, se obtienen los "*costos promedio*", que resumen el conocimiento ingenieril, de las empresas, sobre el método de costos de producción y los niveles de servicio dado. Algunas propiedades de las funciones de costo en telecomunicaciones tienen una gran influencia sobre el precio.

La economía de escala existe cuando una función de producción, manifiesta incrementos en el retorno dependiente de la escala. Por ejemplo, para que una empresa de un solo producto o servicio disfrute de las economías de escala a un nivel de producción Q , deberá tener costos promedios decrecientes, tal como lo presenta la ecuación [1.4].

$$\frac{K(rQ)}{rQ} > \frac{K(Q)}{Q} \quad \forall \quad 0 < r < 1 \quad [1.4]$$

Donde:

- K Función de costos
- Q Cantidad de producción
- r Tamaño de la economía de escala

Para aquellas empresas con multiproductos, las cuales producen $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ productos, los costos promedio no están claramente definidos, por lo que el concepto de economías de escala generalmente no pueden representarse como un costo promedio decreciente, dependiente de la escala. Sin embargo, las economías de escala pueden representarse por un concepto mucho más general de decrecimiento del "*costo promedio radial*", el cual está definido por:

$$K(rQ) > rK(Q) \quad \forall \quad 0 < r < 1 \quad [1.5]$$

Donde:

- K** Función de costos
- Q** Cantidad de producción
- r** Tamaño de la economía de escala

Una empresa que puede decrecer los costos promedio radiales, puede expandir todas las salidas (productos) más rápidamente que los incrementos proporcionales en sus costos totales.

En telecomunicaciones, grandes incrementos en el volumen demandado en un solo mercado, pueden permitir la utilización de tecnología de alta capacidad y así lograr economías de escala.

Debido a que la capacidad no se puede dividir (y por lo tanto tampoco se puede almacenar), cuando los rangos de salida son pequeños se tendrán costos marginales promedio a corto plazo muy cercanos a cero, siempre y cuando exista suficiente capacidad para servir la demanda.

1.2.2.6 Externalidades y la definición de precios

Externalidad es una consecuencia no intencionada de un curso de acciones que accidentalmente tienen efectos beneficiosos o en detrimento de un tercero, de quién el generador de la externalidad no puede coleccionar una compensación adecuada si la externalidad es positiva o a quién el generador de la externalidad no podrá pagar una compensación por daño de ser esta en detrimento. Como ejemplo, la generación de humo por una estación generadora de electricidad donde los afectados (terceros) pueden ser personas de la misma compañía proveedora o los clientes a quienes sirven. Tal externalidad es una fuente de ineficiencia ya que el generador de la externalidad (el humo) no paga los costos sociales generados por las acciones y por lo tanto no existe un incentivo de mercado para reducir las emisiones dañinas.

En telecomunicaciones se generan dos externalidades positivas muy importantes: la de red y la de llamada.

La *externalidad de red* (que se da en la mayoría de redes industriales -gas, electricidad, telecomunicaciones, etc.-) resulta por la agregación de un nuevo usuario en la red, de tal forma que todos los usuarios antiguos obtienen el beneficio de recibir o establecer llamadas con el nuevo usuario. Esta externalidad suele medirse a través del valor de las comunicaciones que el nuevo usuario puede realizar, pero en ningún momento es igual al beneficio social que se obtiene por su ingreso a la red, el cual incluye el beneficio de otros usuarios de comunicarse con él. En telecomunicaciones esta importante externalidad es el fundamento económico de buscar la interconexión de todas las redes existentes, pues de esta forma el servicio será más eficiente.

La *externalidad de llamada* es el beneficio que recibe el usuario que no debe pagar la comunicación y sin embargo participa de ella.

Ahora bien, la externalidad positiva de red, es la mayor característica que diferencia la teoría de tarifas telefónicas de otras áreas tales como tarifas eléctricas. Sin embargo, la importancia de ésta para los Servicios Básicos de Telefonía (POTS) se ha reducido al ritmo que la penetración ha alcanzado a casi el 100 % de los hogares en los países industrializados. Sin embargo, ha permanecido con un gran interés para algunos grupos de consumidores y para los nuevos servicios, tales como el facsímil.

1.2.3 Tipos de tarifas

En las últimas dos décadas se han realizado impresionantes progresos en el diseño e implementación de tarifas. A finales de la década de los 70, palabras como "precios a la carga pico", "subsidio cruzado" y "precios Ramsey" se convirtieron en palabras comunes entre los economistas.

La teoría sobre tarifas óptimas para los usuarios ha sido completada y se han generado nuevos trabajos sobre la “sostenibilidad de precios contra nuevos entrantes”, “precio según costo axiomático” y “precios no lineales”, lo que ha motivado que la literatura teórica sobre tarifas se haya movido en varias direcciones.

a. La primera dirección, sugiere una posible interacción entre **tarifas y competencia**.

Aunque esta dirección tiene importancia en el sector de las telecomunicaciones, las condiciones para la competencia, raramente se dan en este sector. En particular, los precios sostenibles únicamente cubren los costos mínimos para las salidas demandadas a estos precios. Aquellos precios que son sostenidos contra precios potenciales existentes, son libres de todo subsidio, y por tanto honestos, en el sentido que ningún subconjunto de salidas genera más ingresos que su propio costo. En tal caso, la competencia potencial y consideraciones de honestidad, pueden inducir a tarifas, lo más próximo, basadas en los costos.

b. Una segunda dirección, íntimamente relacionada con la primera es el **precio según el costo axiomático**.

Aunque los precios libres de subsidio pudieran no existir, han sido postulados algunos axiomas, plausibles para la relación precio-costo. Un conjunto de estos axiomas, da origen a un tipo particular de precio promedio, como por ejemplo los precios Aumann-Shapley. Tales precios están garantizados existir bajo condiciones muy generales sobre demanda y costo, sin embargo, la utilidad de estos costos ha sido debilitada con ejemplos clásicos.

c. Una tercera dirección es la de **precios no lineales**, sin embargo, los requerimientos de información para la implementación de algunos esquemas de precio no lineales han sido muy estrictos y difíciles. Por tal razón, es importante resaltar que pueden utilizarse algunos esquemas opcionales para generar la información que se requiere. Por ejemplo, puede dársele al cliente la opción entre dos combinaciones:

Una tarifa alta de acceso y una baja por consumo o viceversa, el operador de telecomunicaciones puede lograr que los clientes seleccionen por sí mismos el tamaño de la clase de consumo, sin necesidad de saber sus demandas específicas. Este esquema de precios no lineales está siendo cada vez más importante en telecomunicaciones.

En este caso, la función de costo presenta propiedad de monopolio natural cuando este es *subaditivo*; es decir, que $f(\sum_i X_i) \leq \sum_i f(X_i)$ para todo $X_i \geq 0$, así una empresa puede producir cualquier nivel de salidas más eficientemente que dos o más empresas:

$$K(q_1) + K(q_2) \geq K(q_1 + q_2)$$

- d. Una cuarta dirección que continua siendo de interés teórico y de suma importancia para definir tarifas telefónicas, es el **precio según la carga pico**. La incertidumbre y el racionamiento del servicio no orientados al precio, han sido puntos con mayor interés en esta dirección; sin embargo, el precio de los servicios también tiene interés en vista de las inversiones con capacidad ociosa en un sector en expansión.

1.2.4 Marco de referencia

1.2.4.1 Suposiciones generales

Aunque el mercado de las telecomunicaciones es amplio y abarca muchas áreas de la economía, para enfatizar sobre tarifas en el sector de las telecomunicaciones, es necesario prescindir de los efectos que estas tienen sobre todas las actividades económicas y sus costos, para así no utilizar un equilibrio económico general sino uno parcial, el cual será válido si estos efectos son mínimos. Ya que las telecomunicaciones tratan con interacción entre personas la suposición de equilibrio parcial es bastante fuerte.

Por ejemplo, si las tarifas telefónicas afectaran la introducción de nuevas tecnologías en telecomunicaciones, éstas a su vez también afectarían otras actividades; es decir, éstos efectos serían cubiertos por cambios de consumo y efectos sociales que se difundirían en otras actividades. Por tanto el enfoque de equilibrio parcial, implica que se deben considerar solo como agentes económicos los proveedores, los reguladores y el consumo de servicios de telecomunicaciones.

Suposiciones sobre las empresas

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones son empresas portadoras reguladas o empresas independientes. Las empresas independientes, contrariamente a las empresas reguladas que siguen únicamente las políticas del regulador, tratan de maximizar sus ganancias, expresadas por la ecuación [1.6].

$$\pi = \sum_{i=1}^N R(q_i) - K((q_i)_N) \quad [1.6]$$

Donde:

π Ganancia de la empresa
 N Número de clientes
 q_i Vector que representa el servicio de telecomunicaciones comprado por el i-ésimo cliente, suponiendo que es conocido el conjunto de servicios de telecomunicaciones ofrecido. Normalmente diferentes servicios corresponden a diferentes mercados. Existe el siguiente criterio para decidir si los productos pertenecen al mismo mercado, "Dos productos pertenecen al mismo mercado si ellos son sustitutos cercanos el uno del otro en la demanda o en la provisión, esto es, si sus elasticidades cruzadas de demanda o provisión son positivas y suficientemente grandes".

$(q_i)_N$ $(q_1, \dots, q_i, \dots, q_N)$ Conjunto de servicios comprados por los N clientes. Ahora bien, el hecho de no incluir todo en una suma, refleja la naturaleza multiproducto de las telecomunicaciones y la posibilidad que existe de costos específicos de usuario. Si N es muy grande se puede asumir un "continuum" de usuarios. En este caso, estos costos pueden ser vistos como salidas adicionales, o "accesos" que pueden ser atados a la compra de uno o de todos los bienes. Entonces se puede escribir:

$$K((q_i)_N) = K\left(\sum_{i=1}^N q_i\right)$$

$R(q_i)$ Gasto del i-ésimo cliente para el vector cantidad $[q]$. $R(q_i) = (p)(q_i)$ en el caso de un vector lineal de precios $[p]$. Sin embargo, tarifas lineales son insuficientes para caracterizar la teoría y la práctica de tarifas telefónicas y por lo tanto, la teoría como la práctica, están dominadas por tarifas no lineales con la propiedad: $R(q_i) \neq (p)(q_i)$.

En este caso, $R(q)$ es una función que establece la relación entre el gasto y la cantidad comprada. Entonces $R(q)$ se denomina función de compra. Debido a la falta de linealidad de la tarifa, se hace referencia a p como el "precio marginal", $p = \partial R/\partial q$.

K Función de costos

Simbología abreviada

Como todo servicio, los servicios de telecomunicaciones generan una función de Utilidad U . Se supone que el i -ésimo usuario deriva una utilidad U_i por el consumo de servicios de telecomunicaciones:

$$U_i = f(q_i, q'_i, y_i) \quad [1.7]$$

Donde:

- q_i Cantidad de servicio de telecomunicaciones consumido por el i -ésimo usuario
- q'_i Cantidad de otros bienes consumidos por el usuario i
- y_i Ingreso del usuario i

Si se asume que la compra de servicios de telecomunicaciones no tiene efecto sobre la utilidad marginal de los ingresos y sobre la utilidad marginal de los otros bienes, es posible eliminar a q'_i y a y_i como argumentos de la función U_i .

Se debe aclarar que esta suposición requiere ya sea que se desprecien los efectos en el presupuesto de los usuarios o si eso no es posible, se debe hacer que los servicios de telecomunicaciones utilicen una pequeña fracción del presupuesto del usuario i de tal forma que sus efectos sean muy pequeños.

La anterior suposición permite ver la utilidad neta del servicio de telecomunicaciones de un usuario [U'_i] de la siguiente forma:

$$U'_i = U_i(q_i) - R_i(q_i) \quad [1.8]$$

Donde:

- U'_i Utilidad neta del servicio de telecomunicaciones del i -ésimo usuario

| | |
|------------|--|
| $U_i(q_i)$ | Utilidad bruta del servicio de telecomunicaciones del i-ésimo usuario |
| $R_i(q_i)$ | Gasto por el servicio de telecomunicaciones del i-ésimo usuario |
| q_i | Cantidad de servicio de telecomunicaciones consumido por el i-ésimo usuario |

El usuario por su parte resuelve el problema de maximización de la siguiente forma:

$$q_i = \arg \max [U_i]$$

La solución al problema produce una función de utilidad indirecta $V_i(p)$ y la función de demanda del usuario es:

$$q_i(p) = -\frac{\partial V_i}{\partial p} \quad [1.9]$$

Donde:

| | |
|----------|---|
| $q_i(p)$ | Demanda de servicio de telecomunicaciones del i-ésimo usuario |
| $V_i(p)$ | Utilidad indirecta del i-ésimo usuario |
| p | Vector lineal de precios |

Por el momento se asume que R es una función lineal del precio, es decir que $R(q) = pq$.

La función de demanda $q(p)$ y su inversa $p(q)$ se asumen que tienen pendiente negativa y son dos veces diferenciables. Además, en la ausencia de efectos en el ingreso, la racionalidad de los consumidores o usuarios del servicio de telecomunicaciones requiere que la curva de la utilidad indirecta $V(p)$ sea convexa.

Una tarifa R_k se dice que es PARETO SUPERIOR a otra tarifa R_l si por lo menos un agente (usuario u operador) está en mejores condiciones utilizando R_k y ninguno está en peores condiciones. En este caso, se dice que R_l es *Pareto dominada*. Una tarifa R_k es PARETO OPTIMA (o PARETO EFICIENTE) si no existe una tarifa R_l , pareto superior, que la domine.

Suposiciones sobre la competencia

En las telecomunicaciones el primer caso analizado es el de los monopolios, sin embargo, el desarrollo de la regulación y el mercado en los mercados de telecomunicaciones ha requerido la incorporación de competencia entre operadores y por tanto la literatura existente ha tenido que ser modificada. Tres tipos de competencia son de interés:

- a. **Competencia potencial** (o nuevas competencias). Esta ha sido analizada en situaciones de monopolio natural. Aquí, el énfasis es sobre la existencia y propiedades de las tarifas que excluyan entrantes ineficientes.
- b. **Competencia actual**. Es considerada en un oligopolio o en el modelo de empresas dominantes en la cual una empresa es regulada y otras empresas no. Aquí, el énfasis es sobre la interferencia entre los objetivos perseguidos por las otras empresas y por el regulador.
- c. **Competencia actual no regulada**. Es considerada en un oligopolio de empresas no reguladas buscando la máxima ganancia.

En este tipo de competencia el énfasis se da en el grado en que la competencia existente pueda reemplazar totalmente todas las regulaciones pero alcanzando los objetivos del regulador.

Al modelar este comportamiento, se definen parámetros importantes tales como "monopolios con elasticidades ajustadas", distribución del mercado de telecomunicaciones y respuestas competitivas. Así, una empresa de telecomunicaciones en un mercado competitivo feroz puede ser vista como monopolio en un mercado altamente elástico. En tal sentido, se puede observar que los monopolios son un caso especial de los oligopolios cuando se hacen algunos ajustes en los modelos.

En los últimos diez años, se ha incrementado la utilización de modelos basados en teoría de juegos para estudiar la teoría de los oligopolios.

1.2.5 Tarifas en ambientes monopolísticos

1.2.5.1 Precios a costos marginales

El punto de partida en los servicios públicos ha sido el de "*precios a costos marginales*"; es decir, $p=MC$ (Marginal Cost). Bajo algunas condiciones apropiadas, fijar los precios a los usuarios en base a costos marginales, maximiza el bienestar social, ya que éstos están basados estrictamente en costos. Sin embargo, la aparente simplicidad de los costos marginales, esconde problemas reales de medición, de ineficiencias potenciales y dificultades mayores de carácter conceptual.

Los *problemas de medición* se dan debido a que las empresas no observan los cambios en los costos que se atribuyen a cambios marginales de los productos de salida. En su lugar, las empresas observan cambios en los costos durante un período de tiempo y por ello, los libros de contabilidad no están diseñados para observar cambios en los costos cuando hay cambios en los productos de salida.

Para observar estos cambios, se han establecido técnicas econométricas, pero ellas son inexactas e imprecisas y carecen de todo sentido en cambios tecnológicos y económicos.

Los *problemas de ineficiencia* se deben a que los precios a costos marginales, raramente cubren el total del costo del servicio, debido al exceso de capacidad en el largo plazo o debido a las economías de escala. La falta para cubrir el total de costos se ilustra en la figura 2.

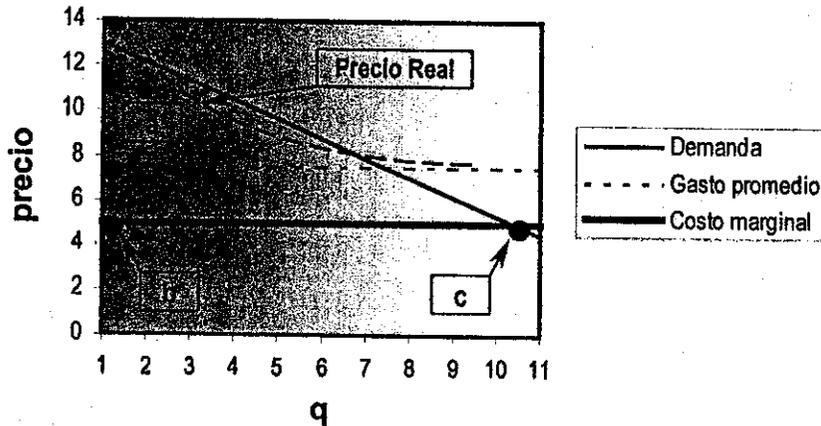


Figura 2

Problema de ineficiencia en los precios obtenidos en base a costos marginales.
 q = servicio de telecomunicaciones comprado.
 Puntos: a = Precio promedio, b = Precio marginal, c = Demanda a costos marginales.

Las pérdidas que se dan al definir precios en base a costos marginales, deben cubrirse con otras fuentes. Si esto se hace internamente por la empresa, ésta requiere otras fuentes de financiamiento, presumiblemente por medio de una desviación del costo marginal para algún otro servicio. Por el contrario, si la empresa es subsidiada externamente, entonces el gobierno debe aumentar los impuestos o bien otras dependencias gubernamentales deben restringirse para obtener estos gastos. Cabe mencionar que los subsidios de fuentes externas generan distorsiones o redistribuciones de la economía, que a su vez se refleja en un factor λ_g sobre el gasto del gobierno.

Ahora bien, si tales distorsiones de los subsidios son razonablemente aceptados fuera de la empresa, entonces estas debieran ser aceptables para las políticas de precio de la empresa y por tanto las conduce a desviaciones de precio en base a costos marginales. De hecho, para minimizar las distorsiones, la distorsión marginal debiera ser ajustada a través de todas las actividades económicas dentro y fuera de la empresa.

Los *problemas conceptuales* surgen al analizar que los precios basados en costos marginales se deben definir con respecto al marco del tiempo en el cual se realizan expansiones en la producción. ¿Los costos marginales se deberían ver con referencia a una expansión inmediata de la producción utilizando la capacidad existente (costos marginales a corto plazo)? ¿O con respecto a una expansión planificada permanente (costos marginales a largo plazo)? ¿O con respecto a un caso intermedio? El primer caso está bien definido y sus causas se pueden establecer claramente. El problema reside y específicamente para el caso de telecomunicaciones, que los costos marginales a corto plazo cuando el sistema está a menos de su capacidad de utilización, son cercanos a cero. Pero a medida que se acerca a su capacidad final, el costo se mueve rápidamente al infinito. Por supuesto, que un precio infinito no es aceptable y por lo tanto, en el tiempo que falta capacidad en el sistema el precio no puede exceder aquel que raciona la demanda a la capacidad límite. Así, fijar precios en base a los costos marginales a corto plazo puede conducir a precios altamente fluctuantes. Además, cuando se excede la capacidad, es muy probable que tales precios no cubran ni los costos de capacidad.

1.2.5.2 Precios en base a carga pico

Cuando la demanda se anticipa correctamente, los precios en base a costos marginales pueden cubrir los costos totales. En la formulación clásica de precios a la carga pico, se supone que la demanda es uniforme en cada uno de los T períodos analizados y la cantidad de la demanda depende de los precios en cada período:

$$Q_t = D_t(p_1, \dots, p_T) \quad \text{para } t = 1, 2, \dots, T \quad [1.10]$$

Se asume que los T períodos forman un ciclo que se repite indefinidamente, que existe un costo variable constante $[b]$ y una tasa de renta constante $[\beta]$ por unidad de capacidad. El costo total $[C]$ de producir Q_t unidades en todos los períodos es:

$$C = b \left[\sum_{t=1}^T Q_t \right] + \beta [Q_{t(max)}] \quad [1.11]$$

La proporción constante de la producción se restringe por la cantidad de recursos variables $[v_t]$ y por la capacidad máxima productiva $[K]$:

$$Q_t = \min_t(v_t, K) \quad \text{para } t = 1, 2, \dots, K \quad [1.12]$$

Los precios que maximizan el bienestar se deben basar en los costos marginales. En los períodos fuera de la hora pico, cuando la demanda es menor que la capacidad, el precio es igual al costo marginal a corto plazo:

$$p_t = b \quad \text{para } t \text{ tal que } Q_t < K \quad [1.13]$$

En los períodos de hora pico, la demanda es igual a la capacidad y el precio es igual al costo marginal a largo plazo, es decir, el costo variable más el costo por unidad de expandir la capacidad:

$$p_t = b + \beta \quad \text{para } t \text{ tal que } Q_t = K \quad [1.14]$$

Es importante hacer notar que la capacidad está construida para satisfacer la demanda, de tal forma que $K = D_{t(max)}$.

Cuando los costos asociados a la capacidad $[\beta]$ son mayores que los costos variables $[b]$, como sucede en telecomunicaciones, el período de máxima demanda con tarifas de la hora no-pico, puede cambiar del período en el cual ese máximo ocurre con precios uniformes. En tal caso, el “desplazamiento de pico” hace que la regla anterior sea inconsistente. La solución es colocar los precios igual a los costos variables cuando la demanda es menor que la capacidad, y en los períodos de hora pico, se deben colocar precios más elevados de tal forma que en cada período pico la demanda sea igual a la capacidad y así, los ingresos combinados cubran los costos marginales a largo plazo:

$$\sum_t p_t = nb + \beta \quad \text{para } t \text{ tal que } Q_t = K \quad [1.15]$$

Donde:

n Número de períodos en que $Q_t = K$

1.2.5.3 Incertidumbre y racionamiento

Cuando la demanda (o la fiabilidad de suplirla) es incierta, existe la probabilidad que la demanda exceda a la producción, en cuyo caso es necesario racionar el servicio. Esta característica es importante al definir precios en función de la carga pico.

Las distribuciones de demanda de tráfico telefónico tienen muchos picos aún cuando existen diferentes precios durante el día, la noche, días festivos y fines de semana. Para servir a la demanda pico absoluta que ocurre en algunos minutos, tal vez algunas pocas veces al año se requiere de la adición de capacidad que estaría ociosa casi todo el tiempo. Para ello, existen reglas de ingeniería que especifican parámetros típicos de diseño, como por ejemplo, la probabilidad de congestión durante “la hora pico diseñada” (0.01 se utiliza comúnmente para líneas troncales). Cuando el exceso de demanda amenaza la capacidad, el sistema telefónico utiliza varias formas para racionar la producción de nuevo tráfico con el objeto de reducir la demanda efectiva a la capacidad disponible. El usuario detecta este racionamiento de intentos de llamada a través de tonos de ocupado, de congestión o anuncios grabados.

Si las llamadas se generan aleatoriamente, entonces el rechazo de las llamadas que se generan cuando la capacidad está saturada produce un racionamiento aleatorio.

Cuando un usuario realiza una llamada, éste no tiene indicaciones en tiempo real de la condición de la red (congestionada o libre), y por lo tanto, se puede suponer que la generación de llamadas aleatorias produce un racionamiento aleatorio sobre el primer intento de llamada que el usuario realiza. De allí en adelante, el comportamiento de reintento de llamada puede afectar la distribución de la voluntad de pago del usuario para las llamadas racionadas subsecuentes. Los reintentos de llamada persistentes incrementa la probabilidad de que una llamada se complete, pero requiere que el usuario invierta más tiempo para conseguirla.

Cabe mencionar que las llamadas que siguen un proceso de reintentos de llamada son comúnmente de más valor para los usuarios que la llamada promedio racionada. Por tal razón, aquellos abonados que realizan llamadas de alta valuación, adquieren dispositivos automáticos de rellamada puesto que de otra forma serían menos propensos para realizar rellamadas.

Contrario a la teoría, en la práctica, la demanda no es uniforme dentro de un período específico de precios. Las tarifas factibles deben limitarse solo a cortos períodos del día, con regularidades de días de trabajo y fines de semana, de tal forma que un período con un solo precio pueda incluir varios niveles de demanda. Por tanto, aún cuando la demanda sea igual a la capacidad del sistema durante algunas horas del período de precios, habrá exceso de capacidad en otras horas. Como resultado, algunas de las eficiencias de los precios basados en costos marginales, no aplican cuando los precios se basan en la carga a la hora pico ya que éstos deben satisfacer restricciones de factibilidad y precios positivos que impiden la generación de nuevas llamadas cuando el sistema excede su capacidad.

1.2.5.4 Racionamiento prioritario y precios en tiempo real

Dos mejoramientos se han dado sobre el problema de racionamiento aleatorio no monetario. El primero, es asumir que el racionamiento ocurre de acuerdo con los deseos de los usuarios a pagar.

Lo anterior se puede llevar a cabo relacionando las tarifas con el orden en el cual los usuarios son atendidos en el caso de congestión. Este enfoque diferencia el producto a través del costo de la calidad de servicio (la probabilidad de obtener un servicio o teniéndolo no ser interrumpido). El inconveniente de este mejoramiento depende de la tecnología a aplicar, ya que ésta debe ser capaz de atender las cargas de los usuarios en un orden predeterminado.

El segundo mejoramiento consiste en evitar totalmente, un racionamiento no monetario incrementando o disminuyendo los precios instantáneamente al ritmo en que ocurre la congestión o la disminución del tráfico en la red, respectivamente. Este mejoramiento requiere que el usuario sea informado sobre los precios y la calidad de servicio que está recibiendo en tiempo real.

Estos dos mejoramientos no aplican en ambientes regulados, ya que en estos las tarifas deben ser estables y por lo tanto, basadas en patrones de demanda anticipados a largo plazo.

1.2.5.5 Precios Ramsey en mercados regulados monopolísticos

Las tarifas lineales son aquellas en las cuales el total de gastos de los usuarios es *proporcional* a la cantidad de producto que compran. Las tarifas óptimas lineales pueden exhibir algunos tipos de discriminación de precios a través de los servicios y/o usuarios. La discriminación de precios por las empresas con fuerza en el mercado se ve a menudo como deslealtad; sin embargo, desde el punto de vista de beneficio social, el juicio sobre discriminación de precios puede ser un poco diferente. En el caso de discriminación de precios perfecta y horizontal de acuerdo al ingreso maximizado de las empresas, el beneficio social incrementa en forma no ambigua. (Discriminación horizontal aplica cuando se costea separadamente las diferentes unidades compradas por el mismo usuario o precios no lineales).

En el caso de una discriminación de tercer orden (cuando la discriminación ocurre segmentando el mercado en diferentes sub-mercados o precios según la clase de usuario) el juicio está mezclado cuando se trata de monopolios que maximizan sus beneficios. Dicho de otra manera, el beneficio aumenta (disminuye) si el total de la producción aumenta (disminuye). Con el objetivo de analizar el concepto de los precios Ramsey, se centrará el análisis sobre los monopolios en ambientes regulados. El objetivo del regulador es maximizar la función W (para un monopolio multiproducto):

$$W = \pi + (1 - \gamma)CS = \gamma\pi + (1 - \gamma)S \quad [1.16]$$

Donde:

| | |
|----------|--|
| W | Función de precios de Ramsey |
| CS | Beneficio del Usuario (Customer Surplus) |
| S | Beneficio Social (Surplus) |
| π | Ganancia de la Empresa (Profit) |
| γ | Número de Ramsey |

El número de Ramsey [γ] puede ser visto como el peso asociado a la ganancia [π] y $(1 - \gamma)$ como el peso asociado con el beneficio social [S]. De otra forma, la ganancia recibe el peso de 1 mientras que el beneficio al usuario recibe un peso de $(1 - \gamma)$. Ahora bien, γ esta definida por el regulador o el planificador. En base a lo anterior:

$$p = \arg \max \left\{ \left[\sum_{i=1} p_i q_i - K \left(\sum_{i=1} q_i \right) \right] + (1 - \gamma) \int q(p) dp \right\} \quad [1.17]$$

El término de beneficio del usuario es una integral de línea, por lo que su gradiente con respecto a p es $\nabla V(p) = -q$, donde q es el vector de salida.

La condición de primer orden de este problema es la siguiente:

$$\left[p - \frac{\partial K}{\partial q} \right] \frac{\partial q}{\partial p} = -\gamma q \quad [1.18]$$

Donde:

| | |
|---------------------------|---|
| $\partial K / \partial q$ | Vector de costos marginales |
| $\partial q / \partial p$ | matriz de derivadas parciales de la demanda |

Esta ecuación establece que el precio debería ser colocado de tal forma que el incremento marginal en el beneficio social por las reducciones posteriores de precios sea proporcional a las cantidades demandadas a esos precios. Si suponemos que las derivada cruzadas son cero, la ecuación se puede reducir a:

$$\left[p_i - \frac{\partial K}{\partial q_i} \right] \frac{\partial q_i}{\partial p_i} = -\gamma q_i$$

$$\left[\frac{p_i - \frac{\partial K}{\partial q_i}}{p_i} \right] = -\frac{\gamma}{\varepsilon_i} \quad \text{para todo } i \quad [1.19]$$

Donde:

$$\varepsilon_i = \frac{\partial q_i}{\partial p_i} \frac{p_i}{q_i} \quad \text{Elasticidad de la demanda de } q_i$$

Esta ecuación establece la regla de la elasticidad inversa:

Toda desviación relativa de precios del costo marginal debiera ser inversamente proporcional a la elasticidad correspondiente de la demanda.

El número de Ramsey [γ] determina el nivel general de precios (mientras la elasticidad de la demanda determina la estructura de precios) que una empresa necesita para hacer frente a las restricciones de presupuesto.

1.2.5.6 Precios Ramsey con externalidades

El análisis económico entre operadores de redes de servicios es mucho más complicado por la presencia de externalidades y de exceso de capacidad.

Se dice que los precios definidos en mercados competitivos no son económicamente eficientes cuando se presentan externalidades, debido a que se han maximizado el consumo de los usuarios y los beneficios del productor.

Por otro lado, debido a que las redes pequeñas carecen de externalidades positivas, se a caído en la necesidad de construir grandes redes, que implican inversiones millonarias en facilidades de alta durabilidad (pues los costos de construcción se estiman entre US\$ 13,000 y US\$ 18,000 por milla para sistemas por cable).

Por ejemplo, el mayor costo de construcción de enlaces de fibra óptica es el tendido y el costo del trabajo de la instalación. El costo de la fibra es relativamente pequeño en comparación al costo total de la construcción e instalación. Existe en las empresas de telecomunicaciones la práctica común de instalar "excesos de fibra". De acuerdo a un estudio de la Comisión Federal de Comunicaciones, en Estados Unidos, entre un 40 y un 50% de la fibra óptica instalada por los operadores de larga distancia esta "apagada"; es decir, los láser y la electrónica asociada no están instalados. Por tanto la presencia de exceso de capacidad en una entrada importante es un factor complicado adicional que afecta el equilibrio de los precios y la estructura de la industria.

1.2.5.7 Precios dinámicos

Precios con externalidades dinámicas

Al hablar de *precios estáticos* se asume que la red está en equilibrio en todo momento, que los usuarios responden inmediatamente a cambios en los precios (conectándose o desconectándose a la red) y que cuando un usuario decide suscribirse a la red, conoce el precio de la suscripción y cuantos usuarios existen en la misma. Sin embargo, en la realidad, no existe un mecanismo instantáneo de coordinación que permita que las suscripciones de los abonados emerjan instantáneamente.

Por el contrario, en el concepto de *precios dinámicos*, los usuarios basan sus decisiones de suscripción a la red, en base a sus expectativas sobre el futuro en cuanto al número de usuarios se refiere, lo cual equivale a depender de los niveles actuales y tendencias pasadas en las suscripciones, así como del precio esperado por suscripción.

También, la suscripción a la red, implica costos asociados de entrada y salida, además de las tarifas de renta. Por lo tanto, la decisión de suscribirse a una red no puede verse libre de costos.

Nuevos productos y externalidades de red

El precio de un nuevo servicio, tiene dos problemas:

- ✓ Los nuevos servicios normalmente se acompañan de grandes externalidades de red.
- ✓ Pueden existir economías de escala acumulativas (aprendiendo haciendo).

Para tratar el segundo problema, se plantea la necesidad de definir precios de introducción para los nuevos servicios, que son más bajos que los precios subsecuentes (en ambientes monopolísticos y regulados, este tratamiento no aplica).

Se consideran dos períodos (período 1 y 2) con la modalidad de “aprendiendo haciendo” en un mercado monopolístico de un sólo producto en el que no existen descuentos. La producción en el período 1 está acompañada por el aprendizaje de la empresa o de los usuarios. Este aprendizaje conduce ya sea a bajos costos de producción o a un incremento en la demanda de los usuarios durante el período 2.

Se denota $K(q, q_{-1})$ como la función de costos para la salida en el período q que depende de un periodo anterior q_{-1} y $p(q, q_{-1})$ como la función inversa de la demanda. Los efectos del aprendizaje implican que $\partial K / \partial q_{-1} \leq 0$ y que $\partial p / \partial q_{-1} \geq 0$.

Las ecuaciones [1.20] y [1.21] expresan la ganancia [π] en ausencia de descuentos, con la diferencia que la primera posee relaciones intertemporales y la segunda no.

$$\pi = p(q_1, 0)q_1 + p(q_2, q_1)q_2 - K(q_1, 0) - K(q_2, q_1) \quad [1.20]$$

$$\pi = p(q_1)q_1 + p(q_2)q_2 - K(q_1) - K(q_2) \quad [1.21]$$

La condición de primer orden para la ecuación [1.21] es la siguiente:

$$\left[\frac{p_i - \frac{\partial K}{\partial q_i}}{p_i} \right] = -\frac{1}{\varepsilon_i} \quad \text{para todo } i=1 \text{ y } 2 \quad [1.22]$$

La condición de primer orden para la ecuación [1.20] es la siguiente:

$$\left[\frac{p(q_1,0) - \left(\frac{\partial K(q_1,0)}{\partial q_1} + \frac{\partial K(q_2,q_1)}{\partial q_1} \right)}{p(q_1,0)} \right] = -\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_{12}}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \frac{p(q_2,q_1)q_2}{p(q_1,0)q_1} \quad [1.23]$$

Donde:

$$\varepsilon_{12} = \frac{\partial q_2}{\partial p_1} \frac{p_1}{q_2} \quad \text{Elasticidad de demostración que mide la demanda en el período 2 en respuesta a un incremento en el precio en el período 1}$$

$$\frac{\partial K(q_1,0)}{\partial q_1} \quad \text{Costo marginal regular en el período 1}$$

$$\frac{\partial K(q_2,q_1)}{\partial q_1} \quad \text{Reducción de los costos en el período 2}$$

$$\left(\frac{\partial K(q_1,0)}{\partial q_1} + \frac{\partial K(q_2,q_1)}{\partial q_1} \right) \quad \text{Costo dinámico marginal de la producción en el período 1}$$

1.2.5.8 Eficiencia

La eficiencia es un fenómeno muy complejo. Los economistas reconocen tres tipos de eficiencias:

- Eficiencia técnica** (o productiva), que se consigue donde las empresas individuales producen bienes y servicios al mínimo costo.
- Eficiencia de ubicación**, que se consigue donde los recursos se ubican a su máxima utilización.

c. *Eficiencia dinámica*, que se consigue donde los proveedores tienen incentivos de inversión apropiada así como incentivos para desarrollar nueva tecnología y nuevos productos.

Para finalizar el estudio teórico de los principales factores económicos en el área de las telecomunicaciones, en la sección 1.3 se exponen los principales costos involucrados en la implementación de redes de telecomunicaciones.

1.3 Costos en el desarrollo y explotación de redes de telecomunicaciones

El desarrollo y explotación de un proyecto de telecomunicaciones demanda una gran inversión a largo plazo, por lo que la decisión del sistema que ha de utilizarse en el mismo, debe hacerse muy cuidadosamente. Deben tomarse en cuenta diversos factores que caracterizan al sistema; tales como aspectos técnicos, mantenimiento, fiabilidad, servicio ofrecido, costos, etc.; entre los cuales el aspecto económico juega un papel de gran relevancia.

Por lo anterior, es necesario hacer un estudio económico completo del proyecto, pero sin que este afecte los otros aspectos, puesto que, por ejemplo, un mal diseño inicial podría ocasionar un sin número de proyectos de ampliación, los cuales afectarían considerablemente a la administración desde el punto de vista económico.

Las inversiones en el sector de las telecomunicaciones pueden clasificarse según su finalidad operacional, su motivo, el grado de libertad de decisión, o bien por su función en la red. La tabla I muestra esta clasificación resaltando algunos puntos importantes.

| Aspecto sobre el cual se clasifica | Tipo de inversión | Detalle general para el análisis de la clasificación |
|------------------------------------|---|---|
| Finalidad operacional | Inicial | Toda inversión inicial va seguida de algunas ampliaciones, las cuales dificultan la comparación entre inversiones. |
| | Para sustitución de instalaciones | |
| | Para ampliación de instalaciones | |
| Grado de libertad de decisión | Imprescindibles | Las inversiones imprescindibles constituyen el valor actualizado mínimo, mientras que las prescindibles requieren de máxima rentabilidad en el sistema. |
| | Prescindibles | |
| Motivo | Para establecer o mantener calidad de servicio | Los nuevos servicios permiten mantener una buena posición relativa en el mercado. |
| | Para mantener una posición relativa en el mercado respecto a competidores | |
| | Por sustitución | La reducción de gastos requiere de una adecuada supervisión, así como sistemas de mediciones y alarmas. |
| | Para reducir gastos | |
| | Para aumentar los ingresos | |
| | Para establecer nuevos servicios y productos | |
| Función en la red | Red de abonados | El grado de detalle de esta clasificación depende del criterio de la administración. |
| | Sistema de transmisión | |
| | Equipo de conmutación | |
| | Equipo de alimentación y energía | |
| | Edificios, etc. | |

Tabla I

Formas de clasificar las inversiones en el área de las telecomunicaciones.

Poder establecer promedios de inversión en el área de telecomunicaciones en el ámbito internacional es muy difícil, pero según información obtenida por la UIT-T (antes la CCITT), las inversiones anuales oscilan entre 0.4% y 1.0% del producto interno bruto (PIB) de cada país. El factor que determina la mayor o menor escala de inversión, es el grado de penetración telefónica, y el objetivo primordial es que esta área se desarrolle en armonía con otros sectores de la infraestructura de los países.

Es necesario realizar la valoración de una inversión, para poder determinar la rentabilidad de un proyecto, elegir la solución óptima entre las opciones posibles (estimando cual es más económica y factible a largo plazo) o bien programar proyectos de ampliación y sustitución en un período prolongado.

La planificación de una red presenta problemas como el dimensionamiento de la misma, la elaboración de un plan óptimo para la provisión del servicio o establecer criterios para la sustitución de instalaciones. Estos deben tomarse en cuenta para elegir el método de estudio económico más adecuado para valorar las inversiones.

Si bien es cierto que hay diversos métodos de estudio económico, cuya aplicación depende de cada caso en particular, el proceso general para valorar una inversión es único y se detalla en la tabla II.

| No. | Paso a seguir en la valoración de una inversión | Descripción |
|-----|---|--|
| 1 | Análisis del problema | Se busca definir el problema de una manera clara, para lo cual se deben contestar las siguientes preguntas: <ul style="list-style-type: none"> ✓ ¿Qué objetivos tiene la valoración? ✓ ¿Qué restricciones debe tener el estudio? ✓ ¿Cuáles son los planes posibles? ✓ ¿Qué ventajas y desventajas deben incluirse? ✓ ¿Qué limitaciones existen (financieras, jurídicas, técnicas, etc.)? |
| 2 | Cuantificación de ventajas y desventajas de los planes posibles | La cuantificación se realiza con el fin de facilitar el proceso de comparación. Esta es muy sencilla si las ventajas o desventajas pueden expresarse en términos monetarios, pero en muchos casos se trabaja con factores intangibles (calidad de servicio, fiabilidad, etc.). |
| 3 | Evaluación | Se evalúan los planes en función de sus ventajas y desventajas cuantificadas utilizando algunos métodos de estudio económico. Los factores intangibles se evalúan según el juicio subjetivo del responsable del proyecto. |
| 4 | Decisión | La decisión se toma después de la obtención de resultados claros y concretos de la evaluación. Estos resultados deben involucrar todos los factores considerados en el proyecto. |

Tabla II
Proceso de valoración de las inversiones.

Las técnicas de estudio económico son utilizadas específicamente en el proceso de evaluación de los planes existentes para el desarrollo de cualquier proyecto de telecomunicaciones, pero es importante destacar que cualquier cálculo económico debe incluir aspectos tales como los ingresos y economías de costos, factores de costo, valor residual y vida útil del servicio, período de cálculo, tipo de descuento e influencias inflacionarias.

Debido a los alcances del presente estudio, únicamente se analizarán los primeros dos aspectos que constituyen dichos estudios económicos.

1.3.1 Ingresos y economías de costo

Cuando se busca determinar la rentabilidad de un proyecto es necesario incluir en los cálculos los ingresos y las economías de costo (erogaciones para la provisión o mantenimiento del servicio) que este producirá. Si se debe elegir entre varias opciones, los ingresos pueden omitirse cuando estos son iguales en dichas opciones.

En algunos proyectos es necesario realizar inversiones con el fin de mantener la calidad de servicio de la red (como las inversiones en zonas rurales), en dichos casos no es preciso determinar la rentabilidad del proyecto.

1.3.2 Factores de costo

Todo nuevo proyecto requiere de un estudio económico para poder tomar una decisión entre las diversas opciones que existen; sin embargo, este estudio no se ve afectado en forma directa por los gastos asociados a la planta existente, pues estos solo sirven como orientación para determinar los costos futuros, especialmente en lo que respecta a la tasa de depreciación.

De lo anterior se establecen dos tipos de gastos (costos):

Gastos de funcionamiento, son aquellos que se tienen por concepto de utilización y mantenimiento de la planta ya existente. Estos son recurrentes mientras la planta este funcionando y dependen de la cantidad de equipos, su estructuración, ubicación, utilización y mantenimiento.

Gastos de inversión, son aquellos que tienen lugar una sola vez para adquirir bienes físicos de alto costo y larga vida útil. Pueden haber gastos de inversión inicial, para sustitución de equipo y para ampliación de la red.

Es importante resaltar que estos dos tipos de gastos guardan una íntima relación inversa a la hora de realizar un nuevo proyecto, puesto que al tratar de disminuir los gastos de funcionamiento, los gastos de inversión se incrementarán debido a la necesidad de adquirir una alta calidad en los equipos, por el contrario, si la finalidad es reducir los gastos de inversión, no se podrá tener acceso a la mejor tecnología, por lo que los gastos de funcionamiento serán los que se incrementen.

La tabla III presenta en forma comparativa y detallada los elementos que constituyen estos dos tipos de gastos.

| Gastos de Inversión | Gastos de funcionamiento |
|---|---|
| ✓ Material y equipo (se incluye el transporte, manipulación, almacenamiento e impuestos de los mismos). | ❖ Materiales asociados con la conservación y mantenimiento de la planta. ❖ Adquisición, manipulación y almacenamiento de materiales y piezas de repuesto. ❖ Impuestos. |
| ✓ Instalación (se debe tomar en cuenta la mano de obra, la supervisión y los servicios contratados). | ❖ Mano de obra asociada a la explotación diaria de la planta (ej. Operadores) y a la conservación y mantenimiento de la misma (aquí se considera la prueba de equipos). ❖ Costos de supervisión. |
| ✓ Prestaciones sociales y gastos indirectos relacionados con la mano de obra. | ❖ Prestaciones sociales y gastos indirectos relacionados con la mano de obra. |
| ✓ Ingeniería. | |
| ✓ Capacitación inicial del personal. | ❖ Capacitación continua del personal. |
| ✓ Compra de solares y servidumbres de paso. | ❖ Alquileres. |
| ✓ Gastos varios (ej. Servicios jurídicos, consultivos o de negociaciones) | ❖ Gastos varios (ej. Reparaciones en taller, herramientas, vigilancia y servicios públicos). |

Tabla III

Elementos constitutivos de los gastos de inversión y de los gastos de funcionamiento en los sistemas de telecomunicaciones.

Para poder entender claramente la relación entre gastos de funcionamiento y de inversión, en la figura 3 se presenta un diagrama que expone las variaciones de estos gastos en función del tiempo.

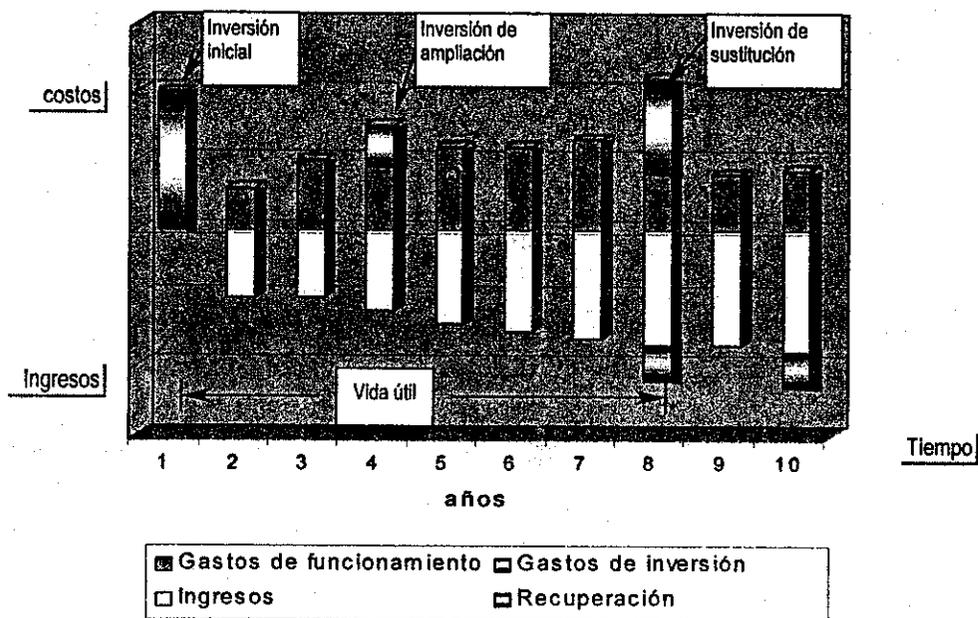


Figura 3
Movimiento monetario en el desarrollo de un proyecto de telecomunicaciones.
(Gráfica sobre un período de cálculo de 10 años)

Para poder facilitar los cálculos de costos y los estudios de selección, el equipo se puede dividir en unidades denominadas *unidades de planta*, las cuales representan el costo de instalación de los mismos (involucrando todos los elementos adicionales que sean necesarios) por unidad (independientemente de las dimensionales utilizadas). Un ejemplo típico es el costo por kilómetro de cable enterrado de 100 pares, el cual involucra el propio cable, los ladrillos de protección, los materiales necesarios para los empalmes entre otros.

El gasto de inversión en unidades de planta puede incluir el gasto de inversión de material y equipo, instalación, transporte, almacenamiento, ingeniería, gastos indirectos y gastos generales.

El costo puede dividirse en costos variables, que cambian con el número de unidades de planta, y en costos fijos, que son independientes de la cantidad de unidades de planta.

De lo anterior se puede deducir que con la ayuda de los costos de las unidades de planta es posible realizar lo siguiente:

- ✓ Dividir los costos de diferentes tipos de instalaciones en ciertos costos elementales que facilitarán la elaboración de numerosos cálculos.
- ✓ Programar la inversión al estimar los gastos de inversión y las necesidades financieras para el futuro.
- ✓ Describir el costo de cualquier equipo.

En la tabla IV se presentan algunos ejemplos de cómo obtener los costos globales, para instalar algunos equipos, utilizando las unidades de planta.

| Costo de | Ecuación | Explicación | | | | | | | | | | |
|---------------|--|-------------|--------------------|----------|---------------------------|----------|---|----------|---|----------|--------------------|--|
| Ruta de cable | <p style="text-align: center;">$C = al + n(bl + c)$</p> <p>Donde</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><i>l</i></td> <td>Longitud del cable</td> </tr> <tr> <td><i>n</i></td> <td>Número de pares del cable</td> </tr> <tr> <td><i>a</i></td> <td>Costo básico de los cables por unidad de longitud</td> </tr> <tr> <td><i>b</i></td> <td>Costo por unidad de longitud por circuito</td> </tr> <tr> <td><i>c</i></td> <td>Costo por terminal</td> </tr> </table> | <i>l</i> | Longitud del cable | <i>n</i> | Número de pares del cable | <i>a</i> | Costo básico de los cables por unidad de longitud | <i>b</i> | Costo por unidad de longitud por circuito | <i>c</i> | Costo por terminal | <p>El costo por terminal incluye aquellos necesarios en el repartidor principal, los puntos de sub-repartición, amplificadores y los equipos de conmutación.</p> |
| <i>l</i> | Longitud del cable | | | | | | | | | | | |
| <i>n</i> | Número de pares del cable | | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | Costo básico de los cables por unidad de longitud | | | | | | | | | | | |
| <i>b</i> | Costo por unidad de longitud por circuito | | | | | | | | | | | |
| <i>c</i> | Costo por terminal | | | | | | | | | | | |

Tabla IV
Método de estimación de costos de instalación de diversos equipos partiendo de los costos elementales de las unidades de planta.
(Continúa en la siguiente página)

| Costo de | Ecuación | Explicación | | | | | | | | | | |
|---|--|----------------------|-------------------------------------|----------|---------------------|----------|---|----------|---|---|--|--|
| <p>Ruta de canalización</p> | <p style="text-align: center;">$C = l(a + bn)$</p> <p>Donde</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><i>l</i></td> <td>Longitud de la ruta de canalización</td> </tr> <tr> <td><i>n</i></td> <td>Número de conductos</td> </tr> <tr> <td><i>a</i></td> <td>Costo básico por conducto (excavación) por unidad de longitud</td> </tr> <tr> <td><i>b</i></td> <td>Costo por unidad de longitud de conducto</td> </tr> </table> | <i>l</i> | Longitud de la ruta de canalización | <i>n</i> | Número de conductos | <i>a</i> | Costo básico por conducto (excavación) por unidad de longitud | <i>b</i> | Costo por unidad de longitud de conducto | <p>El número de conductos "<i>n</i>" es adimensional, por lo que el producto "<i>bn</i>" posee las mismas dimensionales que "<i>a</i>".</p> | | |
| <i>l</i> | Longitud de la ruta de canalización | | | | | | | | | | | |
| <i>n</i> | Número de conductos | | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | Costo básico por conducto (excavación) por unidad de longitud | | | | | | | | | | | |
| <i>b</i> | Costo por unidad de longitud de conducto | | | | | | | | | | | |
| <p>Cable equipado con un sistema de portadoras de un tipo determinado</p> | <p style="text-align: center;">$C = C_o + al + cn$</p> <p>Donde</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><i>C_o</i></td> <td>Costo de los terminales del sistema</td> </tr> <tr> <td><i>l</i></td> <td>Longitud del cable</td> </tr> <tr> <td><i>n</i></td> <td>Número de terminales</td> </tr> <tr> <td><i>a</i></td> <td>Costo del cable y los amplificadores por unidad de longitud</td> </tr> <tr> <td><i>c</i></td> <td>Costo por equipo terminal de portadoras y de conmutación</td> </tr> </table> | <i>C_o</i> | Costo de los terminales del sistema | <i>l</i> | Longitud del cable | <i>n</i> | Número de terminales | <i>a</i> | Costo del cable y los amplificadores por unidad de longitud | <i>c</i> | Costo por equipo terminal de portadoras y de conmutación | <p>Los coeficientes "<i>a</i>" y "<i>c</i>" representan costos compuestos, pues "<i>a</i>" resume los costos del cable y de los amplificadores, mientras que "<i>c</i>" toma en cuenta los costos del equipo terminal de las portadoras y del equipo de conmutación.</p> |
| <i>C_o</i> | Costo de los terminales del sistema | | | | | | | | | | | |
| <i>l</i> | Longitud del cable | | | | | | | | | | | |
| <i>n</i> | Número de terminales | | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | Costo del cable y los amplificadores por unidad de longitud | | | | | | | | | | | |
| <i>c</i> | Costo por equipo terminal de portadoras y de conmutación | | | | | | | | | | | |

Tabla IV
Método de estimación de costos de instalación de diversos equipos partiendo de los costos elementales de las unidades de planta.
(Inicia en la página anterior)

DIMENSIONAMIENTO

En las secciones subsiguientes se da una introducción a los fundamentos de la teoría de tráfico que se utiliza en el análisis de redes telefónicas. Asimismo se describe en forma detallada el proceso matemático utilizado en el dimensionamiento de rutas directas y rutas alternas (también denominadas *rutas finales* o *de desborde*), el cual se amplía con un ejemplo práctico. Posteriormente, se desarrolla el algoritmo económico que permite optimizar las rutas de desborde, así como la matriz utilizada para la independización de costos en los enlaces punto a punto. Por último, se estudia el proceso de dimensionamiento de la red superpuesta de señalización número 7 (SS7).

2.1 Dimensionamiento básico

2.1.1 Conceptos generales y consideraciones económicas según la teoría de tráfico

La forma de dimensionar la cantidad de circuitos necesarios en las redes telefónicas depende del tipo de *enrutamiento* que se tenga en las mismas así como del *volumen de tráfico* que se les ofrezca. El **enrutamiento** se refiere a los diversos caminos que se le dan a un determinado tráfico para que pueda ir de un punto a otro en la red. El tráfico puede ir a través de *rutas directas*; es decir, por enlaces que comunican a los dos puntos deseados, o bien por *rutas alternas o de desborde*, en las cuales el tráfico deberá ser transferido (transitado) por uno o varios conmutadores antes de llegar a su destino.

En la figura 4 se puede apreciar en forma gráfica la diferencia entre las rutas directas y las rutas tránsito. En esta representación en particular se puede observar que la mayor cantidad de tráfico se cursará a través de la ruta directa, **AB**, por lo que también se le llama *ruta de alto uso*. Mientras que la ruta de desborde, **ATB**, no se utilizará hasta que la ruta directa ya no pueda cursar más tráfico, por esta razón recibe el nombre de *ruta final*.

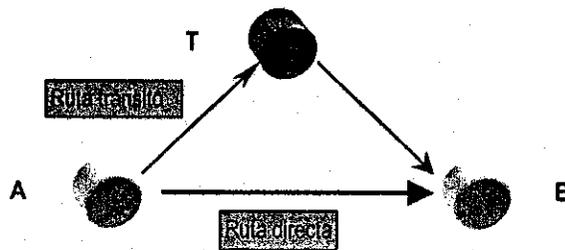


Figura 4

Diagrama de rutas directas (o alto uso) y rutas tránsito (o rutas finales) en la conexión de dos conmutadores A y B, utilizando un conmutador tránsito T.

Es importante hacer notar que ambos tipos de enlaces pueden existir en forma independiente uno del otro; es decir, pueden haber solo rutas directas sin necesidad que existan las rutas tránsito o viceversa.

El segundo factor determinante en el dimensionamiento de redes telefónicas es el **volumen de tráfico** que se le ofrece a las mismas. Este volumen de tráfico ofrecido se conoce, más comúnmente, como tráfico ofrecido [a] y es aquel que los usuarios entregan a la red. Puesto que la naturaleza del tráfico telefónico y la forma de operar de los conmutadores determinan la teoría matemática a utilizar en los cálculos de dimensionamiento, es necesario considerar que las rutas directas (o de alto uso) están constituidas por un grupo *limitado* de circuitos que poseen *accesibilidad completa* y que se seleccionan en forma *secuencial* iniciando siempre con el primer circuito.

Entonces, teniendo en cuenta que las llamadas ofrecidas responden a una *distribución de Poisson* con un número *infinito* de fuentes (tráfico aleatorio) y todas aquellas que se pierden son *eliminadas* con un tiempo medio de duración igual a cero, es posible utilizar la fórmula de **Erlang B** para calcular el tráfico cursado por cada circuito (también llamados troncales). Si las condiciones expuestas anteriormente no se cumplen, se debe utilizar la fórmula que describa el caso requerido. Por ejemplo, si los circuitos son un grupo *limitado* de *accesibilidad completa* y de elección *secuencial*, la distribución de llamadas ofrecidas es *binomial* con un número *finito* de fuentes (tráfico regular) y todas las llamadas perdidas son *eliminadas* con un tiempo medio de duración igual a cero, la fórmula que se debe utilizar es la de **Erlang-Engset**.

La tabla V resume las condiciones, de tráfico y de operación de los conmutadores, más importantes que deben cumplir diversas fórmulas matemáticas para su correcta aplicación en cálculos de dimensionamiento.

| Grupo | Fórmula | Distribución de tráfico | Operación de tráfico | Estado de llamada |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| Fórmulas de pérdida | Erlang B | Poisson | Aleatorio | LCC* |
| | Erlang-Engset | Binomial o de Bernoulli | Regular | LCC |
| | Binomial negativa truncada | Binomial negativa | Irregular | LCC |
| Fórmulas aditivas | Molina | Poisson | Aleatorio | LCH** |
| | Bernoulli | Binomial o de Bernoulli | Regular | LCH |
| | Binomial negativa | Binomial negativa | Irregular | LCH |
| Fórmulas de espera | Erlang C | Poisson | Aleatorio | LCD*** |
| | Erlang D | Binomial o de Bernoulli | Regular | LCD |
| | Riordan | Poisson | Aleatorio | LCD |
| | Crommelin-Pollaczek | Poisson | Aleatorio | LCD |

Tabla V

Clasificación principal de teorías matemáticas utilizadas en el dimensionamiento (válidas para conmutadores de accesibilidad completa).

*Las llamadas perdidas son eliminadas (del inglés "Lost calls cleared")

**Las llamadas perdidas son retenidas (del inglés "Lost calls held")

***Las llamadas perdidas adquieren estado de espera (del inglés "Lost calls delayed")

Si los conmutadores no seleccionan los circuitos (representados por la letra "c") en forma secuencial, el tráfico perdido por el c -ésimo circuito no tendrá una conducta de decrecimiento exponencial y no se podrá hablar del mínimo tráfico cursado por la última troncal. En otras palabras, la teoría matemática de Erlang B no se puede aplicar en aquellos conmutadores que realicen selección aleatoria de circuitos, pues el tráfico perdido en el c -ésimo circuito también será aleatorio (la selección de circuitos en los conmutadores solo se puede realizar en forma secuencial o en forma aleatoria).

El tráfico cursado [Ac], por un grupo de circuitos [c], se obtiene a través de la diferencia del tráfico ofrecido [a] y el tráfico perdido (que expresado en forma porcentual recibe el nombre de probabilidad de congestión [$E(c,a)$]). De lo anterior el tráfico cursado puede expresarse de la siguiente manera:

$$Ac = a[1 - E(c,a)] = a - aE(c,a) \quad [2.1]$$

Donde:

| | |
|-----------|----------------------------|
| Ac | Tráfico cursado |
| a | Tráfico ofrecido |
| $E(c,a)$ | Probabilidad de congestión |
| c | Cantidad de circuitos |
| $aE(c,a)$ | Tráfico perdido |

La probabilidad de congestión constituye la fórmula de pérdida de Erlang B que se expresa de la siguiente forma:

$$E(c,a) = \frac{\frac{a^c}{c!}}{1 + a + \frac{a^2}{2!} + \dots + \frac{a^c}{c!}} \quad [2.2]$$

Sin embargo, la ecuación [2.2] no se puede utilizar directamente en un ordenador para permitir el cálculo automático de los circuitos [c] en función del tráfico ofrecido [a] y la probabilidad de congestión [$E(c,a)$]. Para esto es necesario obtener la ecuación recursiva de Erlang, como se muestra a continuación:

Utilizando como base la ecuación [2.2] se tiene que

$$E(0,a) = 1$$

Pues la congestión es total cuando no hay circuitos por donde cursar el tráfico ofrecido.

Al evaluar la ecuación [2.2] con $c = 1$ se obtiene la siguiente expresión

$$E(1,a) = \frac{a}{1+a} \quad (A)$$

Para $c = 2$ se tiene

$$E(2,a) = \frac{\frac{a^2}{2!}}{1+a+\frac{a^2}{2!}} = \frac{\frac{a^2}{2}}{1+a+\frac{a^2}{2}}$$

Multiplicando por $1/a$ el numerador y denominador

$$E(2,a) = \frac{\frac{a}{2}}{\frac{1+a}{a} + \frac{a}{2}} = \frac{\frac{a}{2}}{\frac{1}{E(1,a)} + \frac{a}{2}}$$

Operando y simplificando se tiene

$$E(2,a) = \frac{1}{\frac{2}{aE(1,a)} + 1} = \frac{1}{2 + aE(1,a)} = \frac{aE(1,a)}{2 + aE(1,a)} \quad (B)$$

Ahora evaluando [2.2] para $c = 3$ y realizando un proceso semejante al hecho en el caso anterior se tiene

$$E(3,a) = \frac{\frac{a^3}{3!}}{1+a+\frac{a^2}{2!}+\frac{a^3}{3!}} = \frac{\frac{a}{3}}{\left(1+a+\frac{a^2}{2}\right) + \frac{a}{3}}$$

$$E(3, a) = \frac{1}{\left(\frac{1}{E(2, a)}\right) + \frac{a}{3}} = \frac{1}{\frac{3}{aE(2, a)} + 1} = \frac{1}{\frac{3 + aE(2, a)}{aE(2, a)}}$$

Entonces se obtiene que para $c = 3$

$$E(3, a) = \frac{aE(2, a)}{3 + aE(2, a)} \quad (C)$$

Al analizar los resultados de las ecuaciones (A), (B) y (C), se puede obtener la ecuación recursiva de Erlang, que tiene la siguiente forma:

$$E(c, a) = \frac{aE(c-1, a)}{c + aE(c-1, a)} \quad [2.3]$$

La ecuación [2.3] además de utilizarse para obtener circuitos en función del tráfico ofrecido y la probabilidad de pérdida, permite evaluar en forma muy conveniente el tráfico cursado por cada circuito. Entonces si se requiere conocer el tráfico cursado por el c -ésimo circuito [1c] se tiene:

$$lc = a[E(c-1, a) - E(c, a)] \quad [2.4]$$

Al analizar cuidadosamente la forma de la ecuación [2.3], se puede apreciar que la probabilidad de pérdida va disminuyendo conforme aumenta el número de circuitos. Este comportamiento hace que la diferencia $E(c-1, a) - E(c, a)$ de la ecuación [2.4] sea menor (pero siempre mayor o igual a cero) conforme c se hace mayor, teniendo como consecuencia una reducción paulatina del tráfico cursado por cada troncal adicional.

El costo total de una red telefónica con rutas alternas incluye el costo de los enlaces directos, los enlaces tránsito y el costo de conmutación para poder cursar tráfico entre dos puntos. Para una configuración como la que se mostró en la figura 4 la función de costos se puede expresar como sigue:

$$K = C_0 + C_1 N_{dir} + C_2 N_{rf} \quad [2.5]$$

Donde:

- K Costo total
- C_0 Constante
- C_1 Costo marginal (incluye costo de la línea de transmisión y terminaciones) en el enlace directo que une a las centrales A y B
- C_2 Costo marginal en la ruta final ATB (tiene como agregado el costo de conmutación de la central tránsito)
- N_{dir} Número de circuitos directos
- N_{rf} Número de circuitos en la ruta final

Si se plotéan las variaciones del costo total $[K]$ con respecto a los cambios en el número de circuitos directos $[N_{dir}]$, se obtiene una gráfica como la que se muestra en la figura 5.

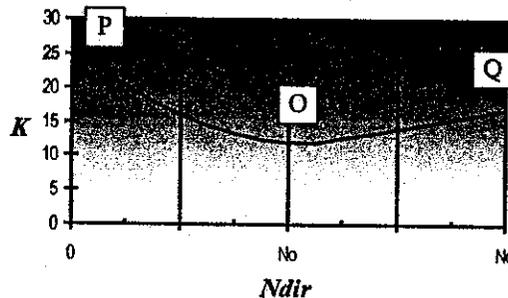


Figura 5
Variación del costo total $[K]$ con respecto a los cambios en el número de circuitos directos $[N_{dir}]$

En la gráfica anterior se puede apreciar que el punto P representa el costo en el cual todo el tráfico se envía por la ruta tránsito, es decir, $N_{dir} = 0$. Luego el costo decrece hasta llegar a un mínimo en el punto O, donde $N_{dir} = N_o$. Por último, el costo vuelve a aumentar hasta el punto Q, donde todo el tráfico es cursado por la ruta directa. Entonces el problema consiste en encontrar el número de circuitos para los cuales el costo total en la ruta directa sea el mínimo.

Para encontrar este mínimo, se debe derivar parcialmente el costo total $[K]$ con respecto a los enlaces directos $[N_{dir}]$, para valores fijos de tráfico ofrecido, e igualar este resultado a cero ($\partial K / \partial N_{dir} = 0$) como se desarrolla a continuación:

Derivando parcialmente la ecuación [2.5] con respecto a N_{dir} se tiene

$$\frac{\partial K}{\partial N_{dir}} = C_1 + C_2 \frac{\partial N_{rf}}{\partial N_{dir}}$$

Igualando a cero para obtener la condición del mínimo costo y despejando el término diferencial, se obtiene la siguiente expresión:

$$\left| \frac{\partial N_{rf}}{\partial N_{dir}} \right| = \left| -\frac{C_1}{C_2} \right| \quad (D)$$

Las barras de valor absoluto se utilizan para trabajar únicamente con la magnitud de ambos términos.

En este momento es necesario considerar que la magnitud de tráfico que se pierde en la ruta directa, debe ser igual a la que cursa la ruta final. Definiendo u como el tráfico cursado por troncal en la ruta final, se puede escribir la siguiente expresión:

$$aE(N_{dir}, a) = uN_{rf}$$

Siguiendo un razonamiento similar al anterior y considerando un aumento en los circuitos directos igual a uno ($\Delta N_{dir} = 1$) se tiene:

$$aE(N_{dir} + 1, a) = u'N_{rf}'$$

Obteniendo la diferencia de estas dos últimas expresiones y haciendo $u \cong u'$ se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
aE(N_{dir} + 1, a) - aE(N_{dir}, a) &= u'N_{rf}' - uN_{rf} \\
a[E(N_{dir} + 1, a) - E(N_{dir}, a)] &= u[N_{rf}' - N_{rf}] \\
l_{c(\Delta K=0)} &= u\Delta N_{rf} \quad (E)
\end{aligned}$$

Expresando a $l_{c(\Delta K=0)}$, que es el tráfico económicamente óptimo que cursa la última troncal en la ruta directa, con la letra v y teniendo en cuenta que la expresión anterior fue obtenida para $\Delta N_{dir} = 1$, (E) se puede expresar en forma general como sigue:

$$\frac{v}{u} = \frac{\Delta N_{rf}}{\Delta N_{dir}} \quad (F)$$

Haciendo que ΔN_{rf} y ΔN_{dir} representen cambios infinitesimales, es posible igualar las ecuaciones (D) y (F)

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{v}{u} \quad (G)$$

Como puede observarse, el término al lado izquierdo de la igualdad de la ecuación (G) es la relación entre los costos marginales de la ruta directa y los de la ruta final. Representando esta relación como $1/q$, donde q se denomina razón de costo, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{q} = \frac{v}{u} \quad (H)$$

La condición de mínimo costo se expresa entonces de la siguiente forma:

$$q = \frac{u}{v} \quad [2.6]$$

Donde:

- q Razón de costo
- u Tráfico cursado por el aumento de una troncal en la ruta final
- v Tráfico económicamente óptimo cursado por la última troncal en la ruta directa

La *razón de costo* no es más que la variación de costo que hay entre incrementar un circuito en la ruta final y uno en la ruta directa. Esta *razón de costo* siempre es mayor que la unidad ($q > 1$) lo cual implica que las rutas directas tienen menor costo que las rutas finales. En lo que respecta a los enrutamientos, si existen varias rutas alternas, se debe elegir la de menor razón de costo.

Realizar el cálculo exacto de la razón de costo para cada enlace en particular requiere de la inversión de mucho tiempo y esfuerzo, por lo que la American Telephone & Telegraph Co. * recomienda la siguiente relación aproximada:

$$q = \frac{3.6(u)}{\left(\frac{M}{1.6094}\right)^{0.11}} \quad [2.7]$$

Donde:

- q Razón de costo
- u Valor nominal del tráfico cursado por el aumento de una troncal en la ruta final expresado en Erlangs
- M Longitud, en kilómetros, de la ruta directa

Es importante hacer notar que esta aproximación es válida pues las variaciones en la razón de costo provocan pequeños cambios en el número de circuitos de las rutas directas. Además, si la razón de costo aproximada está por arriba del valor real, se introducen menos errores que al estar por debajo.

El *tráfico económicamente óptimo cursado por la última troncal en la ruta directa* [v] es llamado ECCS (del inglés "Economic CCS") y se obtiene una vez conocida la razón de costo de la ruta y el tráfico cursado por un aumento de troncal en la ruta final del enlace que se analiza.

* USITA Traffic Committee Bulletin. Septiembre de 1970.

Otra recomendación de AT&T*, para permitir mayor simplificación en el dimensionamiento de redes telefónicas con rutas alternas, es utilizar *el tráfico cursado por un aumento de troncal en la ruta final* [u] como 28 CCS** (0.778 Erlangs) para enlaces locales y como 30 CCS (0.833 Erlangs) para enlaces interurbanos.

2.1.2 Proceso de dimensionamiento

Para dimensionar los diversos enlaces de las redes telefónicas, es necesario conocer el tráfico ofrecido a cada uno de ellos [a], la probabilidad de congestión [$E(c,a)$] que se desea en el sistema (también llamada, en forma incorrecta, como *grado de servicio*), la razón de costo individual o general de los enlaces [q] y el tráfico cursado por un aumento de troncal en la ruta final [u] de cada uno de ellos (es decir, 28 CCS o 30 CCS para enlaces locales e interurbanos respectivamente -siguiendo las recomendaciones de AT&T-).

2.1.2.1 Rutas directas

El dimensionamiento de rutas directas se desglosa en dos casos, los cuales responden al tipo de enrutamiento que realiza la administración de telecomunicaciones. Estos son los siguientes:

- ✓ Cuando sólo se permite la existencia de un enlace punto a punto para la comunicación entre conmutadores ó
- ✓ Cuando además de un enlace punto a punto, existe uno por el cual se puede desbordar cierta porción del tráfico.

* AT&T. Notes on Distance Dialing. 1968, sección 3, apéndice A.

** Unidad de tráfico telefónico utilizada frecuentemente en Estados Unidos, viene del termino en inglés "hundred-call-second" y representa la ocupación total de un circuito en un tiempo de observación igual a 100 segundos. Los CCS también son llamados "unit call" cuya abreviatura es UC. La relación que existe entre esta unidad y el Erlang es la siguiente:

1 Erlang = 36 CCS

En el primero de los casos, el cálculo es muy simple e intuitivo, pues teniendo el tráfico ofrecido [a] y la probabilidad de congestión del sistema [$E(c,a)$], se utiliza la ecuación [2.3] para obtener el número de circuitos o troncales necesarias para cursar el tráfico deseado. Esto es una aplicación directa de la ecuación de *Erlang B* en forma recursiva.

Algunas administraciones de telecomunicaciones aplican la fórmula de pérdida de Erlang B a enlaces punto a punto que han sido cargados con tráfico no aleatorio; es decir, con tráfico que desbordan otros conmutadores (esto suele ocurrir en rutas de desborde con dos o más conmutadores tránsito). Sin embargo, esto no es correcto debido a que el número de circuitos que tendrán estas rutas será inferior a la cantidad real necesaria (obtenida al aplicar el *método de Wilkinson* para rutas finales -ver sección 2.1.2.2-) para cursar tráfico no aleatorio.

En el segundo caso, el cálculo indicado anteriormente no se puede aplicar, pues es necesario encontrar el número mínimo de circuitos directos que permitirán que el costo total del enlace sea óptimo. Esto hace que se utilice un método diferente, conocido con el nombre de *método de Wilkinson*, el cual se describe a continuación:

- a. Conociendo los valores de la razón de costo [q] y del tráfico cursado por un aumento de troncal en la ruta final [u] (28 CCS para enlaces locales y 30 CCS para enlaces interurbanos), se encuentra el tráfico económicamente óptimo cursado por la última troncal en la ruta directa [v] a partir de la ecuación [2.6].

$$v = \frac{u}{q}$$

- b. Se debe transformar el valor de v , de CCS a Erlangs.

$$v(ert) = \frac{v(CCS)}{36}$$

- c. A través de la utilización de la ecuación [2.4], se busca en que troncal se cumple la condición siguiente:

$$lc \geq v(eri)$$

$$lc = a[E(c-1, a) - E(c, a)]$$

Sin embargo, este cálculo requiere de la utilización de la ecuación [2.3], es decir, la fórmula recursiva de Erlang B, que por comodidad se reescribe aquí.

$$E(c, a) = \frac{aE(c-1, a)}{c + aE(c-1, a)}$$

El valor de c es el número de troncales que debe tener la ruta directa.

- d. Se suma el tráfico cursado por cada troncal [lc] hasta la troncal c , para poder obtener el tráfico cursado [Ac] por el enlace (ver ecuación [2.1]). La diferencia entre el tráfico ofrecido [a] y el tráfico cursado [Ac], es la porción de tráfico que se debe enviar vía tránsito. A esta diferencia, se le conoce con el nombre de *tráfico medio de desborde* [m], y no es más que el tráfico que perderían los circuitos directos de no existir una ruta alterna.

$$Ac = \sum_{i=1}^{i=c} li = a[1 - E(c, a)]$$

$$m = aE(c, a) = a - Ac \quad [2.8]$$

Donde:

| | |
|-----------|--|
| m | Tráfico medio que desbordan las c troncales de la ruta directa |
| a | Tráfico ofrecido |
| $E(c, a)$ | Probabilidad de congestión |
| Ac | Tráfico cursado |
| c | Número de circuitos |

- e. Por último, se calcula la varianza [$\langle v \rangle$] del tráfico de desborde [m] como se expresa a continuación:

$$\langle v \rangle = m[1 - m + a(c + 1 + m - a)^{-1}] \quad [2.9]$$

Los valores de tráfico medio de desborde y de varianza, obtenidos en los incisos **d** y **e**, se utilizan en la parte final del método de Wilkinson; es decir, para dimensionar las rutas tránsito (ver sección siguiente).

2.1.2.2 Rutas alternas

Debido a que el tráfico de las rutas alternas *no es aleatorio*, es necesario utilizar la **teoría aleatoria equivalente (ERT, del inglés "Equivalent Random Theory")**, la cual asume que la combinación de tráficos de desborde de un grupo de rutas directas, es equivalente al tráfico que desbordan **S** circuitos directos, al ofrecerles un tráfico aleatorio de **A** Erlangs. La aplicación de esta teoría constituye la parte final *del método de Wilkinson*.

A continuación se describe en forma detallada el proceso de cálculo de las rutas alternas utilizando la teoría aleatoria equivalente.

- a. Para cada central que se dimensione, se deben calcular los circuitos directos de todas las rutas que realizan desborde por la misma central tránsito, como se indicó en la sección precedente.

Lo anterior se realiza con el objetivo de tener todos los tráficos medios de desborde [**m**] (y consecuentemente las varianzas [$\langle v \rangle$]) que afectan al mismo enlace tránsito.

- b. Utilizando las medias y las varianzas, calculadas con las ecuaciones [2.8] y [2.9] respectivamente, se encuentra el tráfico aleatorio equivalente [**A**], a través de la siguiente expresión:

$$A = \left\{ \sum \langle v \rangle \right\} + 3z(z-1) \quad [2.10]$$

Donde:

$$z = \frac{\sum \langle v \rangle}{\sum m}$$

| | |
|--------------------------|--|
| A | Tráfico aleatorio equivalente |
| $\sum \langle v \rangle$ | Sumatoria de varianzas de los tráficos de desborde |
| $\sum m$ | Sumatoria de los tráficos medios de desborde de las rutas directas |

- c. Se calcula el número hipotético de troncales de alto uso $[S]$; es decir, el número de troncales de una ruta directa equivalente.

$$S = A \left(\frac{\{\sum m\} + z}{\{\sum m\} + z - 1} \right) - \{\sum m\} - 1 \quad [2.11]$$

- d. Se calcula el tráfico perdido total del sistema $[\alpha]$, al tener una probabilidad de congestión (o bloqueo) igual a B (en el presente análisis, $B = E(c, a)$, es decir, la congestión de tiempo es igual a la congestión de llamada) y un tráfico ofrecido total a_t (este tráfico es la sumatoria de los tráficos ofrecidos a todas aquellas rutas que poseen el mismo enlace tránsito).

$$\alpha = a_t B \quad [2.12]$$

Donde:

| | |
|----------|-----------------------------------|
| α | Tráfico perdido total del sistema |
| a_t | Tráfico ofrecido total |
| B | Probabilidad de congestión |

- e. Con el tráfico perdido total del sistema $[\alpha]$, se calcula la nueva probabilidad de bloqueo $[B_1]$, al tener un tráfico aleatorio equivalente A .

$$B_1 = \frac{\alpha}{A} \quad [2.13]$$

- f. Con la nueva probabilidad de bloque $[B_I]$, y el tráfico aleatorio equivalente $[A]$, y utilizando la fórmula recursiva de Erlang B, se calcula el número de circuitos $[C]$, necesarios para perder exactamente α Erlangs; es decir, el total de circuitos que debe haber en la ruta final y la de alto uso.
- g. Por ultimo, al resultado total de circuitos $[C]$, se le debe restar el número hipotético de circuitos de la ruta directa $[S]$, encontrados con la ecuación [2.11], para así obtener los circuitos exclusivos de la ruta final $[C_{rf}]$.

$$C_{rf} = C - S \quad [2.14]$$

Donde:

| | |
|----------|------------------------------|
| C_{rf} | Circuitos de la ruta final |
| C | Número total de circuitos |
| S | Circuitos de la ruta directa |

C_{rf} es el número de troncales que debe tener la ruta final de un conmutador hacia la central tránsito que se analiza.

2.1.3 Ejemplo práctico de dimensionamiento

Para poder comprender mejor el proceso de dimensionamiento, en esta sección se presenta un ejemplo del cálculo de rutas directas y rutas finales en una pequeña red de telecomunicaciones.

Esta red está constituida por seis conmutadores hipotéticos, entre los cuales, uno realiza el tránsito local e interurbano y otro el tránsito internacional. Los datos de cada conmutador se detallan en la tabla VI.

| Rede | Commutador | Número de abonado | Tráfico por abonado (E) | Servicio | Tipo | Relaciones entrante/saliente | | |
|------|------------|-------------------|-------------------------|----------|-------------------|------------------------------|-------------|---------------|
| | | | | | | Local | Interurbano | Internacional |
| E1 | A | 40,000 | 0.180 | SS7 | Local | 1.30 | 0.90 | 1.20 |
| | B | 25,000 | 0.150 | SS7 | Local | 0.85 | 1.25 | 0.93 |
| | C | 5,000 | 0.120 | R2 | Local | 1.10 | 1.20 | 0.90 |
| E2 | D | 15,000 | 0.147 | SS7 | Local | 1.15 | 0.98 | 1.20 |
| | E | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (L*, iu) | 0.90 | 1.50 | 1.30 |
| E3 | F | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (int) | 1.10 | 1.30 | 1.50 |

Tabla VI

Datos de los conmutadores hipotéticos utilizados para realizar el ejemplo práctico de dimensionamiento.
 *L= Local, iu = Interurbano, int = Internacional

En la figura 6 se puede apreciar la forma en que están interconectados los seis conmutadores(o centrales), teniendo así, los enrutamientos de cada uno de ellos.

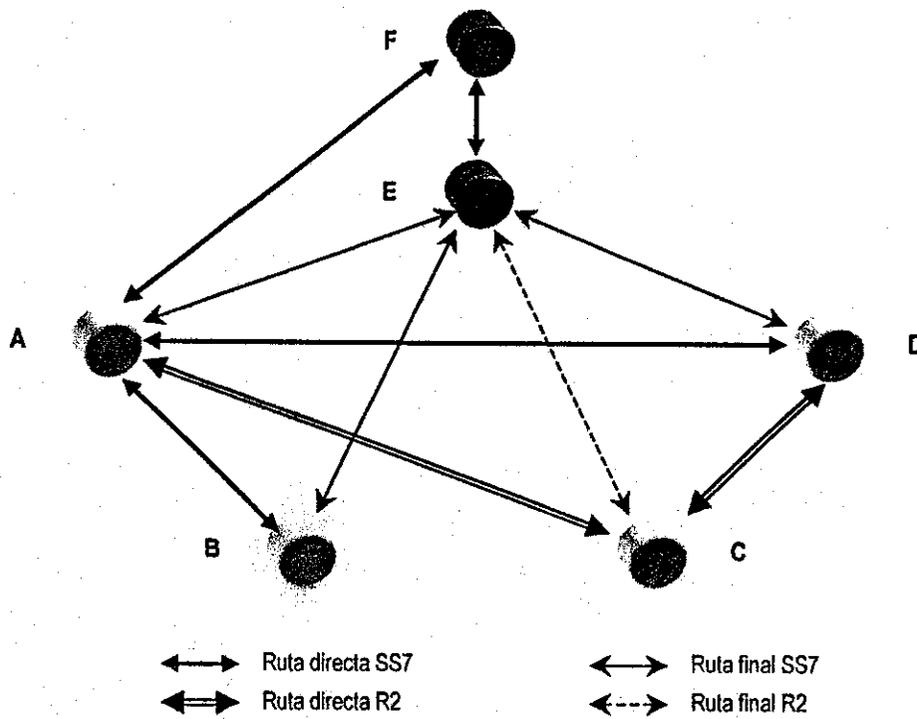


Figura 6

Interconexión de los conmutadores usados en el ejemplo de dimensionamiento

La interpretación de los enrutamientos mostrados en la figura 6 se hace de la siguiente forma: El conmutador A, establece rutas directas hacia B, C, D y F, permitiendo que cualquiera de estos enlaces desborde tráfico a través del conmutador E (cuya única función es transitar tráfico). El conmutador B, posee solo una ruta directa con A y una ruta final con E, es decir, que el enlace BA puede desbordar tráfico por E y que la única vía, que tiene B, para comunicarse con las centrales C, D y F, es a través de la ruta tránsito establecida con E. El conmutador C posee enlaces directos con A y D, y un enlace tránsito con E. El conmutador D, por su parte, establece enlaces directos con A y C, y un enlace tránsito con E. Esto permitirá que los enlaces DA y DC desborden tráfico por el enlace DE, el cual a su vez, es la única vía de comunicación entre el conmutador D y los conmutadores B y F. Por último, el conmutador F posee una ruta directa con A y otra con el conmutador tránsito E.

Por las variantes que se observan en las flechas de estos tres últimos enlaces, se puede apreciar que C posee señalización R2, lo cual lo diferencia de los otros cinco conmutadores, que tienen señalización SS7. El conmutador D, por su parte, establece enlaces directos con A y C, y un enlace tránsito con E. Esto permitirá que los enlaces DA y DC desborden tráfico por el enlace DE, el cual a su vez, es la única vía de comunicación entre el conmutador D y los conmutadores B y F. Por último, el conmutador F posee una ruta directa con A y otra con el conmutador tránsito E.

Antes de poder iniciar el dimensionamiento, es necesario calcular una matriz de tráfico ofrecido entre los diversos conmutadores, la cual surge de una distribución porcentual de intereses de comunicación entre ellos. Esta distribución porcentual se muestra en la tabla VII.

| | A | | | B | | | C | | | D | | | E | | | | |
|---|-----|---|---|-----|---|---|-----|---|---|----|---|---|---|----|---|---|---|
| A | 5.6 | 0 | 0 | 5.7 | 0 | 0 | 5.7 | 0 | 0 | 46 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 3 |
| B | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 5.6 | 0 | 0 | 5.7 | 0 | 0 | 5.7 | 0 | 0 | 46 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 3 |
| D | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E | 5.6 | 0 | 0 | 6.7 | 0 | 0 | 6.7 | 0 | 0 | 43 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 3 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla VII

Distribución porcentual de los intereses de comunicación entre los distintos conmutadores hipotéticos utilizados en el ejemplo de dimensionamiento.

Cada posición matricial (AA, AB, AC, AD, etc.) posee cuatro valores numéricos, los cuales representan el interés local, larga distancia, internacional y de servicios de asistencia al público, distinguiéndose por el lugar que ocupan en dicha posición matricial. Es importante hacer notar que la sumatoria de las posiciones matriciales en cada fila, debe ser igual al cien por ciento.

La figura 7 permite entender claramente la interpretación de cada valor numérico según su ubicación.

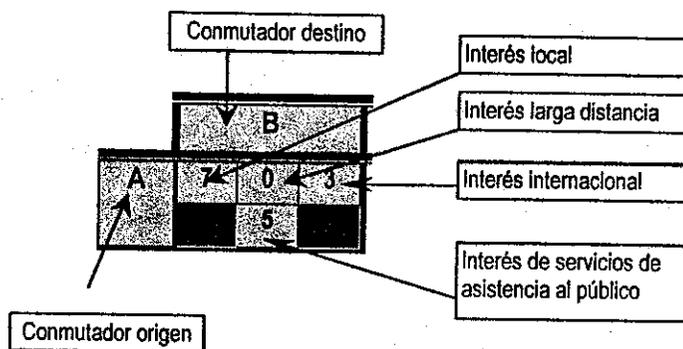


Figura 7
 Representación de una posición matricial
 y significado de los valores numéricos que la forman.
 (Ver tabla VII)

Los valores representados en una posición matricial, siempre se interpretan de la misma forma, aunque la matriz que se analice sea de tráfico ofrecido.

Para convertir la distribución porcentual de intereses de comunicación (tabla VII) en una *matriz de tráfico ofrecido*, es necesario multiplicar todas las posiciones matriciales, que constituyen los intereses salientes de cada conmutador (filas), por el tráfico $[a]$ que los usuarios ofrecen a cada uno de ellos (ver ecuación [2.15]). Dicho tráfico ofrecido $[a]$ es una cantidad teórica que debe ser superior al tráfico cursado $[Ac]$ (el cual se obtiene a través de mediciones) en una proporción no mayor que la probabilidad de congestión $[E(c,a)]$.

La expresión matemática que permite obtener el tráfico ofrecido de cualquier conmutador es la siguiente:

$$a = N_{abo} * A_{abo} \quad [2.15]$$

Donde:

- a Tráfico ofrecido al conmutador
- N_{abo} Número de abonados que posee el conmutador
- A_{abo} Tráfico por abonado medio generado hacia el conmutador

Para el conmutador A, se puede observar en la tabla VI que $N_{abo} = 40,000$ y que $A_{abo} = 0.18$ Erlangs, con lo cual se obtiene el siguiente tráfico ofrecido:

$$a = 40,000 * 0.18$$

$$a = 7,200 \text{ Erlangs}$$

En la tabla VIII se puede apreciar la forma de obtener el tráfico ofrecido a cada conmutador a través de la utilización de la ecuación [2.15].

| Conmutador | Número de abonados | | Tráfico por abonado (Erl) | Tráfico ofrecido (Erl) |
|------------|--------------------|---|---------------------------|------------------------|
| A | 40,000 | * | 0.180 | 7,200 |
| B | 25,000 | * | 0.150 | 3,750 |
| C | 5,000 | * | 0.120 | 600 |
| D | 15,000 | * | 0.147 | 2,205 |
| E | 0 | * | 0.000 | 0 |
| F | 0 | * | 0.000 | 0 |

Tabla VIII

Cálculo del tráfico ofrecido por los usuarios a los diferentes conmutadores hipotéticos tomando como referencia los datos expuestos en la tabla VI.

Es importante hacer notar que el número de abonados [N_{abo}] es una cantidad adimensional, por lo que el tráfico ofrecido [a] tendrá las mismas dimensionales que el tráfico por abonado [A_{abo}].

En la tabla IX se presenta la matriz de tráfico ofrecido, obtenida luego de realizar la siguiente operación matricial:

Para columnas

$$P_{i,j}(k) = P_{i,j}(k-1) * \left[\frac{Sce_j}{Sc_j(k-1)} \right] \quad [2.17]$$

Donde:

| | |
|----------------|---|
| $P_{i,j}(k)$ | Posición matricial de la k-esima iteración |
| $P_{i,j}(k-1)$ | Posición matricial de la iteración (k-1) |
| Sce_j | Sumatoria de columnas esperada |
| $Sc_j(k-1)$ | Sumatoria de columnas de la iteración (k-1) |

Para filas

$$P_{i,j}(k) = P_{i,j}(k-1) * \left[\frac{Sfe_i}{Sf_i(k-1)} \right] \quad [2.18]$$

Donde:

| | |
|----------------|--|
| $P_{i,j}(k)$ | Posición matricial de la k-esima iteración |
| $P_{i,j}(k-1)$ | Posición matricial de la iteración (k-1) |
| Sfe_i | Sumatoria de filas esperada |
| $Sf_i(k-1)$ | Sumatoria de filas de la iteración (k-1) |

Para las ecuaciones [2.17] y [2.18] los subíndices i y j , representan las posiciones de filas y columnas, respectivamente, en los diferentes elementos matriciales.

Este algoritmo se utiliza también para proyecciones de tráfico, sin embargo, la aplicación que se presenta en esta sección es para lograr obtener una mejor aproximación en las relaciones entrante/saliente de los conmutadores que forman la matriz de tráfico.

Las componentes locales de la matriz de tráfico original, se presentan en la tabla X, y en la tabla XI se muestran las sumatorias que se desean obtener luego de la aplicación del algoritmo de Kruihof.

Este algoritmo se aplica en cuatro iteraciones alternas, luego de las cuales se obtiene que las variaciones entre iteraciones son mínimas, por lo que no es necesario continuar las mismas.

| | A | B | C | D | $Sf(0)$ |
|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| A | 403.2 | 410.4 | 410.4 | 3312 | |
| B | 210 | 213.75 | 213.75 | 1725 | |
| C | 33.6 | 34.2 | 34.2 | 276 | |
| D | 145.53 | 147.735 | 147.735 | 948.15 | |
| $Sc(0)$ | | | | | |

Tabla X
Componentes locales de la matriz de tráfico original.

| | A | B | C | D | Sfe |
|------|---|---|---|---|-------|
| A | | | | | |
| B | | | | | |
| C | | | | | |
| D | | | | | |
| Sc | | | | | |

Tabla XI
Sumatorias esperadas para obtener las relaciones entrante/saliente expuestas en la tabla VI.

A continuación se muestran las cuatro iteraciones que constituyen el proceso de aproximar la tabla X hacia los resultados de la tabla XI a través de la aplicación del algoritmo de Kruithof.

a. Primera iteración (por columnas)

Es necesario iniciar con las columnas, pues las sumatorias de filas coinciden inicialmente.

Al analizar la ecuación [2.17], se observa que el factor entre corchetes es común para cada columna, por lo que se realiza el cálculo de estos factores para cada una de ellas. Éstos son:

$$P_{i,j}(k) = P_{i,j}(k-1) * \left[\frac{Sce_j}{Sc_j(k-1)} \right]$$

| Columna | A | B | C | D |
|--|----------|----------|----------|----------|
| $\left[\frac{Sce_j}{Sc_j(0)} \right]$ | 7.4424 | 2.4912 | 0.5158 | 0.2551 |

En la tabla XII se muestran los resultados parciales de esta primera iteración. Y se puede observar que los resultados correspondientes a las sumatorias de las columnas $[Sc(1)]$ coinciden perfectamente con los expuestos en la tabla X, mientras que las sumatorias de las filas $[Sf(1)]$ han cambiado.

| | A | B | C | D | Sf(1) |
|--------------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| A | 3000.776 | 1022.392 | 211.695 | 845.052 | |
| B | 1562.904 | 532.496 | 110.258 | 440.131 | |
| C | 250.065 | 85.199 | 17.641 | 70.421 | |
| D | 1083.093 | 368.039 | 76.206 | 241.919 | |
| Sc(1) | | | | | |

Tabla XII

Primera iteración (por columnas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos originales expuestos en la tabla X.

b. Segunda iteración (por filas)

La forma de realizar la iteración de las filas es igual a la expuesta en el caso de las columnas. Sin embargo, la ecuación que se debe utilizar es la [2.18] en vez de la [2.17]. Para la primera de estas ecuaciones, se aprecia que el factor entre corchetes es común para las filas, por lo que se calcula el mismo para cada una de ellas. Estos coeficientes son los siguientes:

$$P_{i,j}(k) = P_{i,j}(k-1) * \left[\frac{Sfe_i}{Sf_i(k-1)} \right]$$

| Fila | A | B | C | D |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\left[\frac{Sfe_i}{Sf_i(1)} \right]$ | 0.8929285 | 0.8929285 | 0.8929286 | 0.7851607 |

Los resultados de esta iteración, se muestran en la tabla XIII, y se observa que la sumatoria de filas [$S_f(2)$] es la que coincide con los datos de la tabla X.

| | A | B | C | D | $S_f(2)$ |
|---------|----------|---------|---------|---------|----------|
| A | 2679.478 | 912.923 | 189.029 | 754.571 | |
| B | 1395.562 | 475.481 | 98.452 | 393.006 | |
| C | 223.290 | 76.077 | 15.752 | 62.881 | |
| D | 850.402 | 288.969 | 59.834 | 189.945 | |
| $Sc(2)$ | | | | | |

Tabla XIII

Segunda iteración (por filas) del algoritmo de Kruthof, obtenida a partir de los datos de la tabla XII.

c. Tercera iteración (por columnas)

Se repite el proceso expuesto en el inciso "a" con los siguientes factores:

| Columna | A | B | C | D |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\left[\frac{S_{c_j}}{S_{c_j}(2)} \right]$ | 1.1452919 | 1.1452427 | 1.1452427 | 1.1407597 |

Los resultados de la tercera iteración, se muestran en la tabla XIV.

| | A | B | C | D | $S_f(3)$ |
|---------|----------|----------|---------|---------|----------|
| A | 3068.785 | 1045.518 | 216.484 | 860.784 | |
| B | 1598.325 | 544.541 | 112.752 | 448.325 | |
| C | 255.732 | 87.126 | 18.040 | 71.732 | |
| D | 973.958 | 330.940 | 68.524 | 216.682 | |
| $Sc(3)$ | | | | | |

Tabla XIV

Tercera iteración (por columnas) del algoritmo de Kruthof, obtenida a partir de los datos de la tabla XIII.

d. **Cuarta iteración (por filas)**

Se sigue la secuencia descrita en el inciso "b", utilizando los factores:

| Fila | A | B | C | D |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
| $\begin{bmatrix} S_{fe} \\ S_{f(1)} \end{bmatrix}$ | 0.8737242 | 0.8737242 | 0.8737242 | 0.873622 |

El algoritmo se finaliza en una iteración por fila, debido a que no se puede alterar el tráfico saliente de los conmutadores $[S_{f(4)}]$, pero el tráfico entrante $[S_{c(4)}]$ sí puede variar un poco. Los resultados de esta última iteración, se muestran en la tabla XV.

| | A | B | C | D | $S_{f(4)}$ |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|
| A | 2681.271 | 913.494 | 189.147 | 752.088 | |
| B | 1396.495 | 475.778 | 98.514 | 391.712 | |
| C | 223.439 | 76.125 | 15.762 | 62.674 | |
| D | 850.871 | 289.117 | 59.864 | 189.298 | |
| $S_{c(4)}$ | | | | | |

Tabla XV

Cuarta iteración (por filas) del algoritmo de Kruithof, obtenida a partir de los datos de la tabla XIV.

Después de finalizar el algoritmo de Kruithof para las componentes de tráfico local, se deben generar las filas (tráfico saliente) que corresponden a los conmutadores E y F. Esto se hace a través de la multiplicación de las posiciones matriciales que forman la columna (tráfico entrante) del conmutador que se analiza, por la relación entrante/saliente interurbana o internacional, según el tipo de componentes de tráfico que posea dicho conmutador.

El diagrama de la figura 8 muestra claramente la forma de utilizar estas relaciones para obtener los valores desconocidos de las filas, a partir de las posiciones matriciales de las columnas.

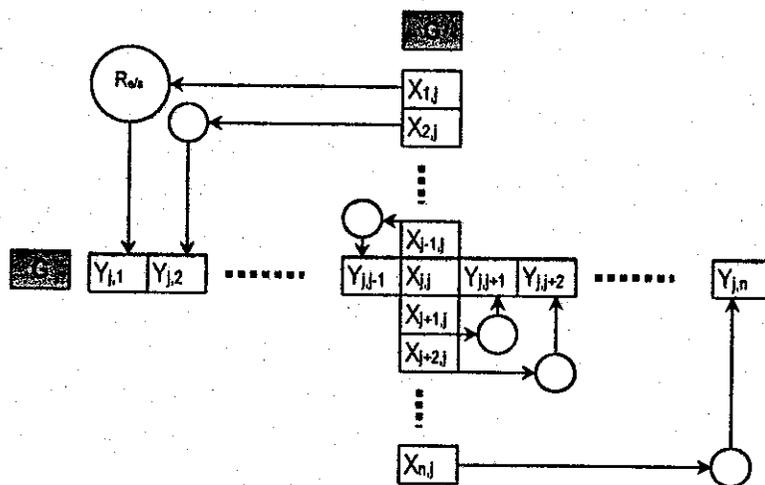


Figura 8

Forma de obtener el tráfico saliente (fila) para un conmutador en el cual únicamente se conoce el tráfico entrante (columna) y la relación entrante/saliente [$R_{e/s}$].
 $Y_{j,k} = R_{e/s} * X_{k,j}$ donde $k = 1, 2, \dots, n$

La expresión matemática que describe la transposición gráfica de la figura 8 es la siguiente:

$$Y_{j,k} = R_{e/s} * X_{k,j} \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, n \quad [2.19]$$

Donde:

- $Y_{j,k}$ Posiciones matriciales que representan el tráfico saliente del conmutador
- $X_{k,j}$ Posiciones matriciales que representan el tráfico entrante al conmutador
- $R_{e/s}$ Relación entrante/saliente (Interurbana o internacional) del conmutador
- n Número de conmutadores existentes en la matriz
- j Fila y columna en que se localiza el conmutador analizado, es decir, el tráfico entrante al conmutador G (de la figura 8) esta ubicado en la j -ésima columna y será transpuesto a la j -ésima fila como su tráfico saliente (después de aplicar la ecuación 2.19).

Entonces, la matriz de tráfico final que se utiliza para dimensionar la red telefónica expuesta en esta sección, se puede apreciar en la tabla XVI, la cual se obtiene aplicando la ecuación [2.19] a las columnas E y F de la tabla IX y reemplazando las componentes locales de esta misma tabla por las expuestas en la tabla XV.

| | | | | | | | | | | | |
|--|---------|-------|--------|-------|--------|------|--------|------|--------|--|-------|
| | 2681.27 | | 916.49 | | 189.16 | | 752.00 | | 208.00 | | 216.0 |
| | | | 216.0 | | | | | | | | 11.0 |
| | 1396.49 | | 475.76 | | 98.81 | | 391.74 | | 106.75 | | 112.5 |
| | | | 112.5 | | | | | | | | 7.0 |
| | 223.44 | | 76.13 | | 15.76 | | 62.67 | | 17.40 | | 18.0 |
| | | | 18.0 | | | | | | | | 1.0 |
| | 650.87 | | 289.12 | | 59.86 | | 189.30 | | 53.45 | | 66.15 |
| | | | 66.15 | | | | | | | | 10.25 |
| | 1870.2 | | 659.2 | | 20.0 | | 326.7 | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | 259.2 | | 104.6 | | 16.2 | | 79.3 | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Tabla XVI

Matriz final de tráfico ofrecido entre conmutadores.

Con las cargas de tráfico de cada uno de los conmutadores, se puede iniciar el proceso de dimensionamiento descrito en la sección 2.1.2.

En este punto es importante hacer notar que la probabilidad de congestión $[E(c,a)]$ que se utiliza en este ejemplo es de 0.01 (1%), pues este valor es comúnmente utilizado por las administraciones de telecomunicaciones y permite que la calidad de servicio que se presta sea adecuada (otras administraciones más exigentes suelen utilizar una probabilidad de congestión de 0.005 (0.5%)). Además, se ha supuesto que la implementación de esta red es en una sola región, por lo que el tráfico cursado por un aumento de troncal en la ruta final $[u]$ puede tomarse igual a 28 CCS debido a que los conmutadores tendrán que manejar tráfico local y no interurbano. El valor de $u = 28$ CCS (0.778 Erlangs), tomando una razón de costo de 1.5, implica que el tráfico económicamente óptimo que debe cursar la última troncal directa $[v]$ es de 18.667 CCS (0.519 Erlangs). Este valor es adecuado para permitir cursar cerca del 80% del tráfico ofrecido con una cantidad óptima de circuitos directos, pues por debajo de este límite, los circuitos se duplicarán consiguiendo únicamente cursar alrededor de un 18% más del tráfico ofrecido, en otras palabras, estas últimas troncales ya no son eficientes.

La razón de costo se asume de 1.5 para todos los conmutadores debido a que existe un único conmutador de tránsito local, además, este valor es mayor que la unidad (requisito indispensable para la razón de costo) y es muy común en redes reales.

En las tablas XVII a XXII se aprecia el cálculo de los circuitos en las rutas directas existentes entre los conmutadores, siguiendo los pasos descritos en la sección 2.1.2.1.

| Enlaces | | | De A Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|------|---------|---------------------|
| D | Tn | Slg | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | B | 2525.98 | 1.5 | 0.518 | 0.5218 | 2549 | 26.3974 | 652.1192 |
| ✓ | ✓ | R2 | C | 189.15 | 1.5 | 0.518 | 0.5220 | 195 | 7.2496 | 51.9484 |
| ✓ | ✓ | SS7 | D | 1602.96 | 1.5 | 0.518 | 0.5230 | 1621 | 21.1251 | 417.9424 |
| ✓ | ■ | SS7 | E | 3967.20** | 1.5 | 0.518 | ----- | 3984 | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | F | 619.20 | 1.5 | 0.518 | 0.5249 | 630 | 13.2353 | 165.4116 |
| ΣTn | | | | 4748.14 | | | | | 60.7578 | 1235.4732 |

Tabla XVII

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador A.

*El sombreado en los valores del enlace AC, indica que estos no afectan las sumatorias, pues este se debe trabajar en forma independiente por ser de tipo unidireccional (R2).

**Este valor, en cursiva, no se considera en las sumatoria, pues no desborda tráfico.

| Enlaces | | | De B Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|-------|--------|---------------------|
| D | Tn | Slg | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | A | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ■ | ✓ | R2 | C | 98.51 | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | 98.51 | 98.51 |
| ■ | ✓ | SS7 | D | 680.83 | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | 680.83 | 680.83 |
| ✓ | ■ | SS7 | E | 2446.9 | 1.5 | 0.518 | ----- | 2473 | ----- | ----- |
| ■ | ✓ | SS7 | F | 292.1 | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ΣTn | | | | 972.93 | | | | | 972.93 | 972.93 |

Tabla XVIII

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador B.

| Enlaces | | | De C Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|-----|----------|---------------------|
| D | Tn | Sig | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | A | 223.44 | 1.5 | 0.518 | 0.5184 | 230 | 7.8003 | 60.4227 |
| ✓ | ✓ | SS7 | B | 94.13 | 1.5 | 0.518 | --- | --- | 94.13 | 94.13 |
| ✓ | ✓ | SS7 | D | 162.67 | 1.5 | 0.518 | 0.5469 | 65 | 6902 | 10.3469 |
| ✓ | ✓ | SS7 | E | 174 | 1.5 | 0.518 | --- | 194 | --- | --- |
| ✓ | ✓ | SS7 | F | 30 | 1.5 | 0.518 | --- | --- | 30 | 30 |
| ΣTn | | | | 410.24 | | | | | 136.5205 | 204.3936 |

Tabla XIX

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador C.

Esta tabla está totalmente sombreada pues el conmutador C posee señalización R2, en consecuencia todos sus enlaces son unidireccionales, y las sumatorias involucran todos los valores de la tabla, exceptuando aquellos en cursiva.

| Enlaces | | | De D Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|-------|--------|---------------------|
| D | Tn | Sig | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | A | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | B | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | R2 | C | 59.86 | 1.5 | 0.518 | 0.5508 | 62 | 4.5523 | 19.2539 |
| ✓ | ✓ | SS7 | E | 1266.15 | 1.5 | 0.518 | ----- | 1295 | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | F | 255.78 | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | 255.78 | 255.78 |
| ΣTn | | | | 255.78 | | | | | 255.78 | 255.78 |

Tabla XX

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador D.

| Enlaces | | | De E Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|-------|-------|---------------------|
| D | Tn | Sig | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | A | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | B | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | R2 | C | 208.8 | 1.5 | 0.518 | ----- | 230 | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | D | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | ✓ | SS7 | F | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ΣTn | | | | ----- | | | | | ----- | ----- |

Tabla XXI

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador E.

| Enlaces | | | De F Hacia | a [Erl] | q | $v = \frac{28}{36q}$ [Erl] | lc [Erl] | c | m | $\langle v \rangle$ |
|-------------|----|-----|-------------------------|--------------|-----|-------------------------------|---------------|-------|-------|---------------------|
| D | Tn | Sig | | | | | | | | |
| ✓ | ✓ | SS7 | A | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | ✓ | SS7 | B | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | ✓ | R2 | C | 16.2 | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | 16.2 | 16.2 |
| | ✓ | SS7 | D | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ✓ | | SS7 | E | ----- | 1.5 | 0.518 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ΣTn | | | | ----- | | | | | ----- | ----- |

Tabla XXII

Cálculo de los circuitos requeridos en los enlaces directos del conmutador F.

Al analizar las tablas anteriores, se puede apreciar que todos los enlaces *bidireccionales* (debido a poseer señalización por canal común número 7 -SS7- en las centrales origen y destino) solamente aparecen una vez en las mismas, pero con el tráfico aumentado en la proporción que indica la posición matricial imagen.

Una *posición matricial imagen* es aquella que se localiza en la fila y la columna que corresponden exactamente a la columna y a la fila de la posición matricial analizada respectivamente. La figura 9 muestra claramente esta definición.

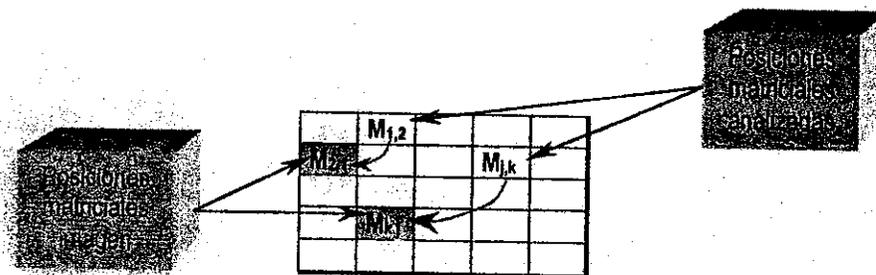


Figura 9

Interpretación gráfica de una posición matricial imagen.
En matrices cuadradas cualquier posición matricial analizada puede tener su respectiva posición matricial imagen, exceptuando aquellas que estén en la diagonal principal de la matriz.

Los conmutadores A y B poseen señalización SS7, por lo que en el enlace de la fila que corresponde "de A hacia B" (tabla XVII) aparece un tráfico ofrecido de 2525.98 Erlangs, que no es más que la suma del tráfico ofrecido entre A y B (913.49+216) y entre B y A (1396.49). Esta última posición, a saber BA, es conocida como la posición imagen de AB. Es por esta razón que en la tabla XVIII en la fila que corresponde "de B hacia A" no aparece ninguna información.

Las sumatorias de tráfico ofrecido [a], medias [m] y varianzas [$\langle v \rangle$] existentes en las tablas XVII a XXII así como estos mismos valores de las filas sombreadas, se utilizan para calcular el número de circuitos necesarios en las rutas finales de todos los conmutadores. La separación descrita anteriormente, se debe a que las sumatorias no incluyen los valores de las filas sombreadas, pues estas representan enlaces unidireccionales y requieren de un manejo independiente.

El cálculo de las rutas finales se hace a través de la utilización del algoritmo descrito en la sección 2.1.2.2.

A continuación se presenta el desarrollo de este algoritmo, en forma detallada, únicamente para el enlace bidireccional (SS7) del conmutador A.

Como en la red de telecomunicaciones utilizada en este ejemplo existe únicamente un conmutador tránsito, las sumatorias expuestas en la tabla XVII reflejan los valores necesarios para dimensionar el enlace final bidireccional existente entre el conmutador A y el conmutador E. En consecuencia, se utiliza la ecuación [2.10] para calcular el tráfico aleatorio [A].

$$z = \frac{1235.4732}{60.7578} = 20.3344$$

$$A = 1235.4732 + [3 * 20.3344 * (20.3344 - 1)]$$

$$A = 2414.9331 \text{ Erl}$$

Ahora se debe aplicar la ecuación [2.11] para obtener el número hipotético de troncales de alto uso [S].

$$S = 2414.9331 \left(\frac{60.7578 + 20.3344}{60.7578 + 20.3344 - 1} \right) - 60.7578 - 1$$
$$S = 2383.3272$$

Es importante hacer notar que S es un número no entero, por lo que se debe elegir el entero inmediato inferior. En este caso 2383 circuitos.

El tráfico que se desea perder después de que el tráfico utilice la ruta directa y la ruta final es (ver ecuación [2.12]):

$$\alpha = 0.01 * (4748.15) = 47.4815 \text{ Erl}$$

Sabiendo que α es el tráfico total que se desea perder en el enlace, se obtiene la nueva probabilidad de bloqueo [B_1] utilizando la ecuación [2.13].

$$B_1 = \frac{47.4815}{2414.9331}$$

$$B_1 = 0.0197$$

Se utilizan los valores de A y B_1 para evaluar la ecuación recursiva de Erlang B [2.3] y así obtener el total de circuitos [C] necesarios para perder α Erlangs. El resultado es el siguiente:

$$C = 2402 \text{ circuitos}$$

Para concluir, el cálculo de los circuitos en la ruta final [C_{rf}], es necesario obtener la diferencia entre los circuitos totales [C] y los hipotéticos [S].

$$C_{rf} = 2402 - 2383$$

$$C_{rf} = 19 \text{ circuitos}$$

Los circuitos en la ruta final $[C_r]$ no pueden ser negativos debido a que S representa un número hipotético de circuitos directos, que al ofrecerles A Erlangs de tráfico aleatorio, desbordan un tráfico equivalente a la combinación de tráficos de desborde $[\sum m]$ de una serie de rutas directas, y C es la cantidad total de circuitos, obtenidos a través de la utilización de la fórmula de pérdida de Erlang B, capaces de cursar $A-B_j$ Erlangs.

De los razonamientos anteriores se tiene la siguiente relación:

$$C \geq S \quad \text{ssi} \quad \sum m \geq B_1$$

Esta relación implica que la única forma de tener una diferencia negativa entre C y S es hacer que el tráfico de desborde $[\sum m]$ tienda a cero, en cuyo caso, la probabilidad de congestión $[B_j]$ también lo hará. Manteniendo la relación anterior siempre válida.

Continuando con un proceso semejante, al expuesto anteriormente para el enlace bidireccional AE, en todos los enlaces finales bidireccionales y unidireccionales de los conmutadores A, B, C, D y F con el conmutador tránsito E, se obtienen los resultados expuestos en la tabla XXIII.

| Enlace Tránsito | Circuitos finales | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Bidireccionales (SS7) | Unidireccionales (R2) |
| A-E | 19 | 16 |
| B-E | 1002 | 115 |
| C-E | 0 | 151 |
| D-E | 278 | 13 |
| F-E | 0 | 25 |

Tabla XXIII

Resumen del dimensionamiento de los circuitos finales existentes entre los conmutadores A, B, C, D y F con el conmutador tránsito E.
(Referencia: tablas XVII a XXII)

Para poder analizar global y cómodamente los resultados obtenidos del dimensionamiento de esta pequeña red de telecomunicaciones, en las tablas XXIV y XXV se estructuran las matrices de circuitos directos y circuitos finales respectivamente.

| | A | B | C | D | E | F |
|---|------------|--------------|------------|-------------|-------------|------------|
| A | | <u>2549*</u> | <u>195</u> | <u>1621</u> | <u>3984</u> | <u>630</u> |
| B | | | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>2473</u> | <u>0</u> |
| C | <u>230</u> | <u>0</u> | | <u>65</u> | <u>94</u> | <u>0</u> |
| D | | | <u>62</u> | | <u>1295</u> | <u>0</u> |
| E | | | <u>230</u> | | | <u>0</u> |
| F | | | <u>0</u> | | | |

Tabla XXIV

Matriz de circuitos directos (ver tablas XVII a XXII).

*Los valores subrayados poseen enlaces en la matriz de circuitos finales (tabla XXV).

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|------------|------------|------------|----------|------------|
| A | | <u>8*</u> | <u>16</u> | <u>7</u> | <u>0</u> | <u>4</u> |
| B | | | <u>115</u> | <u>701</u> | <u>0</u> | <u>301</u> |
| C | | <u>104</u> | | <u>5</u> | <u>0</u> | <u>33</u> |
| D | | | <u>19</u> | | <u>0</u> | <u>278</u> |
| E | | | <u>0</u> | | | <u>0</u> |
| F | | | <u>25</u> | | | |

Tabla XXV

Matriz de circuitos finales o tránsito (ver tabla XXIII).

*Los valores subrayados poseen enlaces en la matriz de circuitos directos (tabla XXIV).

Es importante hacer notar que la distribución de circuitos finales bidireccionales, expuesta en la tabla XXV, responde a las proporciones de tráfico ofrecido que desborda cada uno de los conmutadores sin alterar los resultados totales expuestos en la tabla XXIII. Por ejemplo, el enlace final bidireccional AE posee 19 circuitos (ver tabla XXIII) que quedan divididos en 8, 7 y 4 en las rutas EB, ED y EF respectivamente en la matriz de circuitos finales (ver fila 1 de la tabla XXV).

Las matrices de circuitos directos y circuitos finales son utilizadas para obtener los reportes o diagramas de vías individuales de cada conmutador. Éstos permiten que los operadores de telecomunicaciones conozcan la capacidad de conmutación y procesamiento que deben tener sus diversos conmutadores (centrales) en forma gráfica.

La figura 10 muestra los reportes de los seis conmutadores dimensionados en este ejemplo práctico.

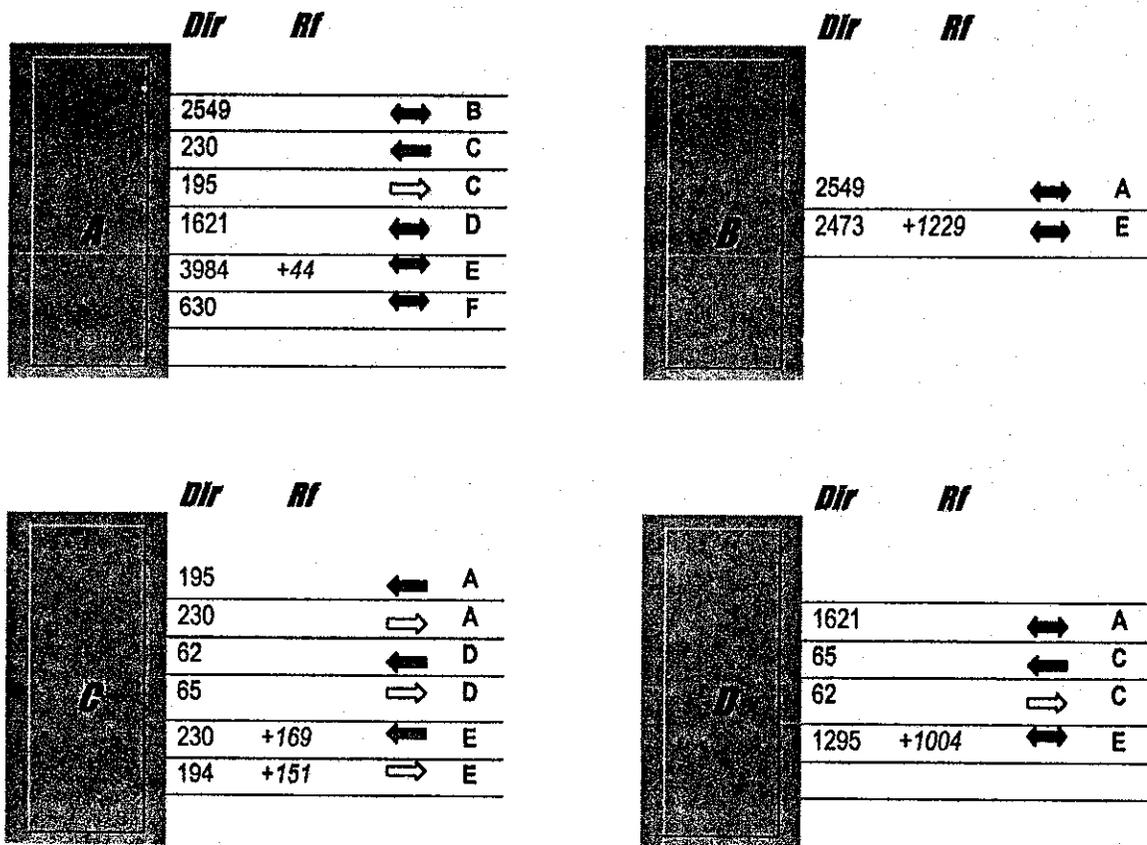


Figura 10

Reportes gráficos o diagramas de vías de los conmutadores dimensionados. Las flechas en un solo sentido indican enlaces unidireccionales (R2), y su dirección determina si el mismo es entrante o saliente.

(Continúa en la siguiente página)

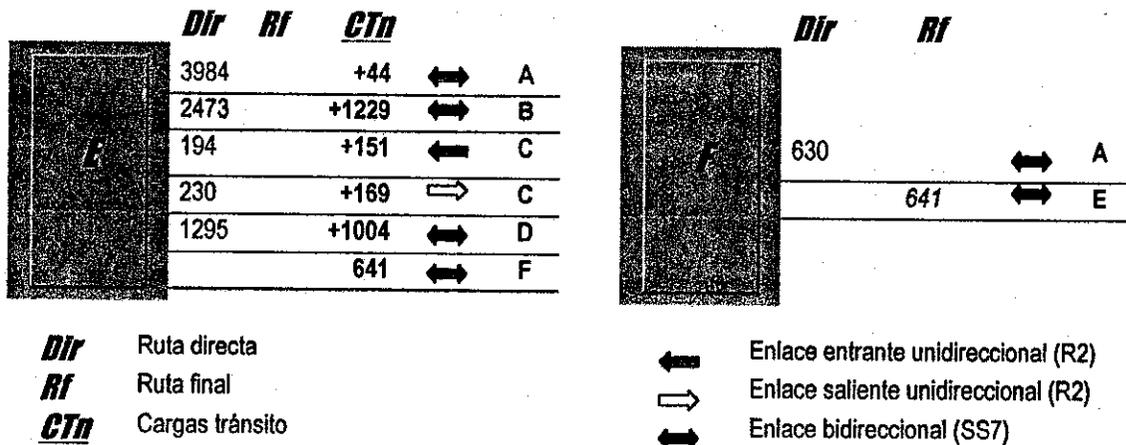


Figura 10
Reportes gráficos o diagramas de vías de los conmutadores dimensionados.
(Inicia en la página anterior)

Cuando las redes de telecomunicaciones poseen varios niveles tránsito, se deben realizar algunas variantes en la forma de calcular la carga de tráfico de los enlaces que involucran a los conmutadores tránsito. Esto con el objeto de obtener resultados óptimos y confiables. Sin embargo, estos cambios complican los cálculos y por consiguiente la comprensión del proceso de dimensionamiento, por lo tanto, no se considera la necesidad del desarrollo de los mismos.

2.2 Optimización de las rutas de desborde

2.2.1 Algoritmo económico

Desde el surgimiento de la conmutación digital, en el área de las telecomunicaciones, ha sido necesario modular las troncales que constituyen un enlace, esto se debe a que la manufactura de los conmutadores digitales, se basa en tarjetas electrónicas que poseen un número fijo de canales (equivalentes a troncales) denominado *sistema*.

El hecho expuesto anteriormente, presenta el problema de tener que aproximar los circuitos (troncales), calculados a través de la teoría de tráfico, a números múltiples

de los canales que constituyen un sistema del conmutador digital. Al realizar esta aproximación, en forma simple a todos los enlaces (directos y tránsito), el costo de una red de telecomunicaciones se incrementará, cada vez más significativamente, según el tamaño de la misma.

Para poder lograr que la red no aumente de costo en forma innecesaria y así mismo evitar que la probabilidad de congestión con que fue diseñada inicialmente no se incremente, es necesario aplicar un algoritmo matemático que permita mantener la fiabilidad de la red con el mínimo aumento de costo posible considerando la optimización de los sistemas.

Este algoritmo matemático de optimización económica se describe a continuación:

Conversión a sistemas, de los circuitos de las rutas directas que poseen rutas tránsito

Para una posición en particular en la matriz de circuitos directos, es necesario determinar si alguno de los conmutadores (origen o destino) tiene tecnología digital. Pues si los dos poseen tecnología analógica, esta conversión no es necesaria.

Después de determinar la necesidad de conversión, se debe calcular el número de "sistemas base" a través de dividir los circuitos totales de la posición entre el número fijo de circuitos que posee un sistema. Este puede cambiar según el tipo de señalización que utilice el conmutador.

Los "sistemas base" estarán constituidos por el cociente entero de la división anteriormente expuesta.

En función a los "sistemas base" y al número fijo de circuitos que constituyen un sistema [*Csis*], se obtiene la cantidad de "circuitos

base" (*sistemas base * Csis*) y de "*circuitos restantes*" (*circuitos totales - circuitos base*).

También es necesario saber el tráfico ofrecido a la posición matricial analizada $[a_{ij}]$. Teniendo en cuenta, que si ambos conmutadores poseen señalización SS7, el tráfico de la posición imagen $[a_{ji}]$ deberá ser incrementado.

A través de la utilización de las ecuaciones [2.3], [2.4], [2.8] y [2.9], se obtiene el tráfico cursado por los "*circuitos base*" así como su respectiva media y varianza.

En este punto, se debe dimensionar la ruta final que involucra a la central origen y al conmutador que le brinda la función tránsito a la posición matricial analizada, utilizando para ello la media y la varianza correspondientes al tráfico cursado por los "*circuitos base*", y el tráfico ofrecido original $[a_{ij}]$.

Con el cálculo anterior, se obtiene la cantidad de "*nuevos circuitos tránsito*", a los cuales se les debe restar el número de "*antiguos circuitos tránsito*", para obtener de esta forma el "*total de circuitos tránsito agregados*".

Por último, con el "*total de circuitos tránsito agregados*", se debe calcular el costo que implica este aumento de circuitos en la ruta final a través del uso de una matriz de costos.

Si el costo de agregar los circuitos tránsito es mayor que el costo de un sistema en la ruta directa, el número de "*sistemas base*",

correspondiente a la posición matricial analizada, deberá ser incrementado en una unidad y así mismo deberá calcularse el cambio en la media y varianza debido a este incremento de circuitos en la ruta directa.

Por el contrario, si el costo de agregar los circuitos tránsito es menor que el costo de un sistema en la ruta directa, la cantidad de "*sistemas base*" no se modifica, pero su media y varianza reemplazan a las originales, para que de esta forma el tráfico que deberían haber cursado los "*circuitos restantes*" pase a ser manejado por la ruta tránsito.

Se debe registrar el aumento de circuitos tránsito que fue propiciado por la posición matricial analizada.

El proceso anterior debe aplicarse a todas las posiciones matriciales, de la matriz de circuitos directos, que poseen rutas tránsito, pues en todas aquellas que no las tienen, la aproximación se hará al sistema inmediato superior.

Dimensionamiento de rutas finales o alternas

Debido a que en la primera fase de este algoritmo hubo una serie de aumentos y disminuciones en las cargas de tráfico que deben manejar las rutas finales de cada uno de los conmutadores, es necesario volver a aplicar el proceso descrito en la sección 2.1.2.2 para así poder dimensionar en forma correcta dichas rutas finales.

Sin embargo, a pesar de estar bien dimensionadas, las rutas tránsito aún están expresadas en circuitos analógicos, por lo que la última fase de este algoritmo es su transformación a sistemas.

Conversión a sistemas, de los circuitos de las rutas tránsito

Para realizar esta conversión, es necesario analizar todas y cada una de las rutas tránsito para determinar cuantos sistemas requieren exactamente, y para los circuitos restantes en cada ruta, se busca si en el registro de "aumento de circuitos tránsito" por parte de las rutas directas, existe algún valor que supere o al menos iguale a la cantidad de circuitos restantes de la ruta tránsito analizada. Si existe algún valor con las características anteriormente mencionadas, es necesario **aumentar un sistema en la ruta directa** que ocasionó dicho aumento, permitiendo de esta forma reducir el costo del enlace, pues el sistema requerido por los circuitos restantes en la ruta tránsito, es reemplazado por un solo sistema directo.

Si la búsqueda en el registro de "aumento de circuitos tránsito" por parte de las rutas directas es infructuosa, es necesario **incrementar un sistema en la ruta tránsito** analizada.

Para que la interpretación del algoritmo anteriormente descrito se realice en forma clara, las tablas XXVI y XXVII muestran la aplicación del mismo a la red dimensionada en la sección anterior.

| de | Hacia | d | t | bidir | C* totales | S base | C base | C resto | a | Ac base | m base | <v> base | Ctn nue | Ctn ant | Ctn agre | N costo | S aprox |
|----------|----------|---|---|-------|---------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| A | B | | | ✓ | 2549 | 82 | 2542 | 7 | 2525.98 | 2495.82 | 30.16 | 735.27 | 24 | 19 | +5 | 7.5 | 82 |
| A | C | | | x | 195 | 6 | 180 | 15 | 189.15 | 172.34 | 16.81 | 101.52 | 31 | 16 | +15 | 22.5 | 6 |
| A | D | | | ✓ | 1621 | 52 | 1612 | 9 | 1602.96 | 1576.89 | 26.06 | 503.89 | 25 | 19 | +6 | 9.0 | 52 |
| A | E | | | ✓ | 3984 | | | | | | | | | | | | 129 |
| A | F | | | ✓ | 630 | 20 | 620 | 10 | 619.2 | 600.26 | 18.94 | 225.72 | 26 | 19 | +7 | 10.5 | 20 |

Tabla XXVI

Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos directos a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3.

*C = circuitos, S = sistemas, Ctn = circuitos tránsito, N = nuevo, d = enlace directo, t = enlace tránsito.

(Continúa en la siguiente página)

| de | hacia | d | t | bidir | C* totales | S base | C base | C resto | a | Ac base | m base | <v> base | Ctn nue | Ctn ant | Ctn agre | N costo | S aprox |
|----------|----------|---|---|-------|---------------|-----------|-----------|------------|--------|------------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| B | E | | | ✓ | 2473 | | | | | | | | | | | | 80 |
| C | A | | | x | 230 | 7 | 210 | 20 | 223.44 | 202.47 | 20.97 | 130.37 | 167 | 151 | +16 | 24.0 | 7 |
| C | D | | | x | 65 | 2 | 60 | 5 | 62.67 | 55.05 | 7.61 | 29.91 | 155 | 151 | +4 | 6.0 | 2 |
| C | E | | | x | 194 | | | | | | | | | | | | 7 |
| D | C | | | x | 62 | 2 | 60 | 2 | 59.86 | 54.18 | 5.69 | 23.25 | 14 | 13 | +1 | 1.5 | 2 |
| D | E | | | ✓ | 1295 | | | | | | | | | | | | 42 |
| E | C | | | x | 230 | | | | | | | | | | | | 8 |

Tabla XXVI

Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos directos a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3.

*C = circuitos, S = sistemas, Ctn = circuitos tránsito, N = nuevo, d = enlace directo, t = enlace tránsito.

C_{dir} = 31 Para enlaces bidireccionales y
30 Para enlaces unidireccionales
(Inicia en la página anterior)

| Enlace | C SS | S Base | C Base | C Resto | Comparación y decisión | S/R Aprox |
|--------|---------|-----------|-----------|------------|---------------------------|--------------|
| a-e | 37 | 1 | 31 | 6 | +1dir a-d | 1 |
| b-e | 1002 | 32 | 992 | 10 | Superior | 33 |
| c-e | 0 | 0 | 0 | 0 | Superior | 0 |
| d-e | 278 | 8 | 248 | 30 | Superior | 9 |
| f-e | 0 | 0 | 0 | 0 | Superior | 0 |

(a)

| Enlace | C R2 | S Base | C Base | C Resto | Comparación y decisión | S/R Aprox |
|--------|---------|-----------|-----------|------------|---------------------------|--------------|
| a-e | 31 | 1 | 30 | 1 | +1dir a-c | 1 |
| b-e | 115 | 3 | 90 | 25 | Superior | 4 |
| c-e | 0 | 0 | 0 | 0 | Superior | 0 |
| d-e | 14 | 0 | 0 | 14 | Superior | 1 |
| f-e | 25 | 0 | 0 | 25 | Superior | 1 |

(b)

Tabla XXVII

Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos finales a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3, después de haber dimensionado nuevamente todas las rutas finales con los valores modificados de medias y varianzas expuestos en la tabla XXVI.

*C = circuitos, S = sistemas.

(a) Circuitos bidireccionales salientes. (b) Circuitos unidireccionales salientes.

(Continúa en la página siguiente)

| Enlace | SS | R | B | S | E | R | S | Compu | Entrada |
|--------|-----|----|---|----|-----|----|---|----------|---------|
| e-a | 23 | | | 0 | 0 | 23 | | Superior | 1 |
| e-b | 120 | | | 3 | 93 | 27 | | Superior | 4 |
| e-c | | 85 | | 6 | 180 | 17 | | Superior | |
| e-d | 723 | | | 23 | 713 | 10 | | Superior | 24 |
| e-f | 622 | | | 20 | 620 | 2 | | Superior | 21 |

(c)

Tabla XXVII

Aplicación del algoritmo económico para la conversión de circuitos analógicos finales a sistemas digitales de la red dimensionada en la sección 2.1.3, después de haber dimensionado nuevamente todas las rutas finales con los valores modificados de medias y varianzas expuestos en la tabla XXVI.

*C = circuitos, S = sistemas.

(c) circuitos unidireccionales y bidireccionales entrantes.

(Inicia en la página anterior)

Es importante hacer notar que en la tabla XXVII(b) a pesar de haber trabajado todos los enlaces como unidireccionales, debido a que los circuitos están ubicados en una posición matricial en la cual al menos uno de los conmutadores (origen o destino) de la ruta tránsito analizada posee señalización R2 (a saber, el conmutador C), el único que lo es en realidad, es el enlace EC. Los demás enlaces de esta tabla son bidireccionales.

Con los datos calculados en las tablas XXVI y XXVII, se obtienen los diagramas de vías en sistemas digitales de los seis conmutadores del ejemplo de la sección 2.1.3, los cuales se exponen en la figura 11.

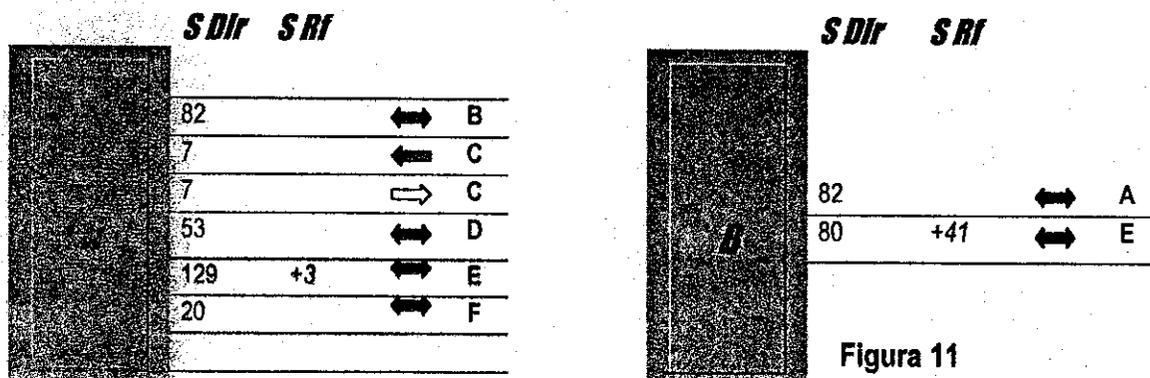


Figura 11

Diagramas de vías en sistemas digitales. (Ver siguiente página).

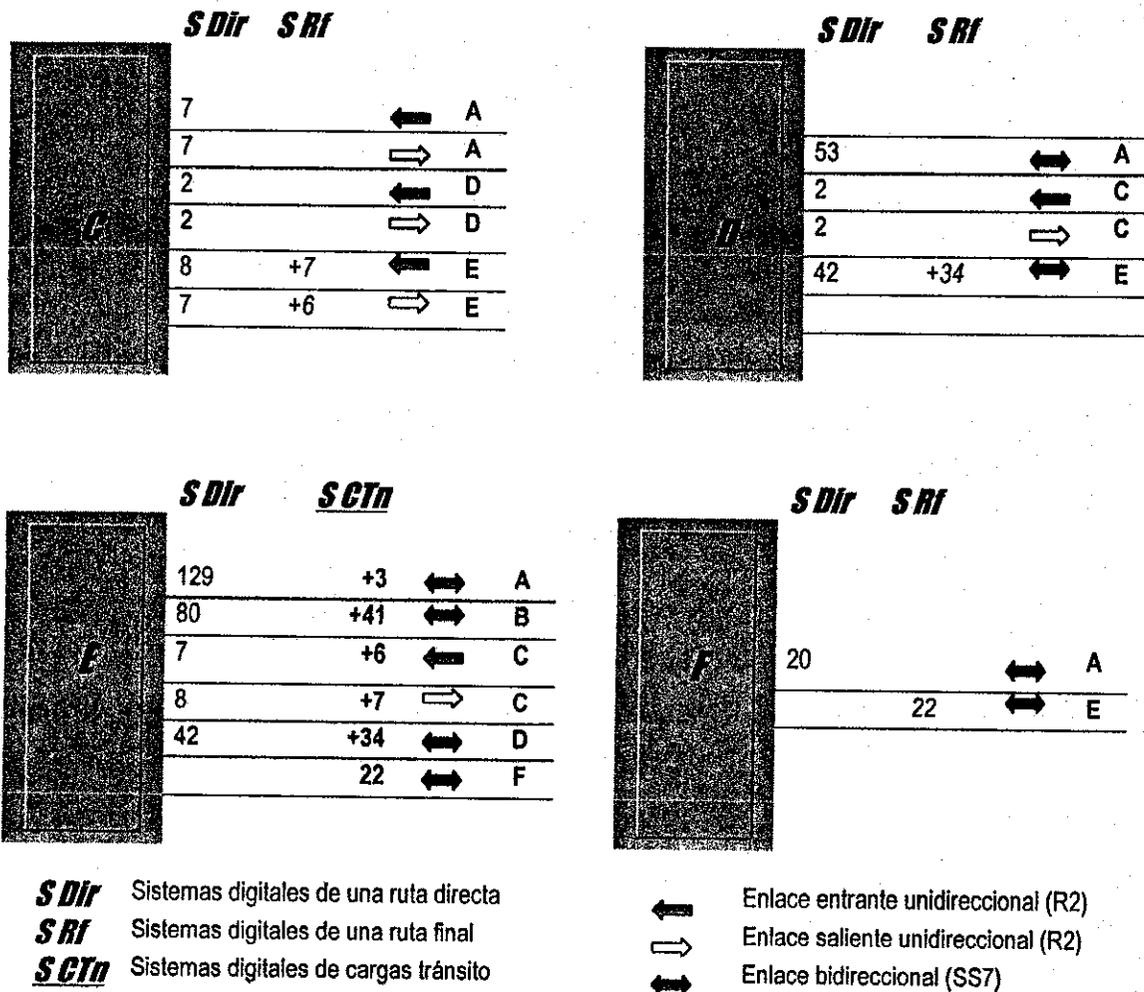


Figura 11
 Diagramas de vías en sistemas digitales de los conmutadores dimensionados en la sección 2.1.3.
 En el proceso de conversión se utilizaron sistemas de 31 circuitos para enlaces bidireccionales (SS7) y
 sistemas de 30 circuitos para enlaces unidireccionales (R2).
 (Inicia en la página anterior)

2.2.2 Matriz de costos

Esta matriz se utiliza con el objeto de brindar flexibilidad completa a los costos de los diferentes enlaces que constituyen una red de telecomunicaciones. Esta flexibilidad se debe a que en una disposición matricial es posible independizar las razones de costo de todos los enlaces que se deben dimensionar.

A esta matriz se le ha denominado comúnmente *Matriz de costos*; sin embargo, se considera que su nombre debería ser *Matriz de razones de costo*, por ser estos los valores que realmente se encuentran en la misma.

Como se expresó en la sección 2.1.1, la razón de costo de un enlace es la variación de costo que hay entre incrementar un circuito en la ruta final y uno en la ruta directa y puede obtenerse a través de la aplicación de las ecuaciones [2.6] o [2.7] o bien a través de alguna otra técnica estadística, que posean los operadores de telecomunicaciones, con el afán de obtener resultados más precisos.

En la figura 12 puede apreciarse la simplicidad de una matriz de razones de costo, sin embargo, es importante hacer notar que de ella depende la posibilidad de realizar el dimensionamiento de cualquier tipo de proyecto; grande, medio o pequeño; sin importar lo complicado que sea la distribución de costos de los diferentes enlaces.

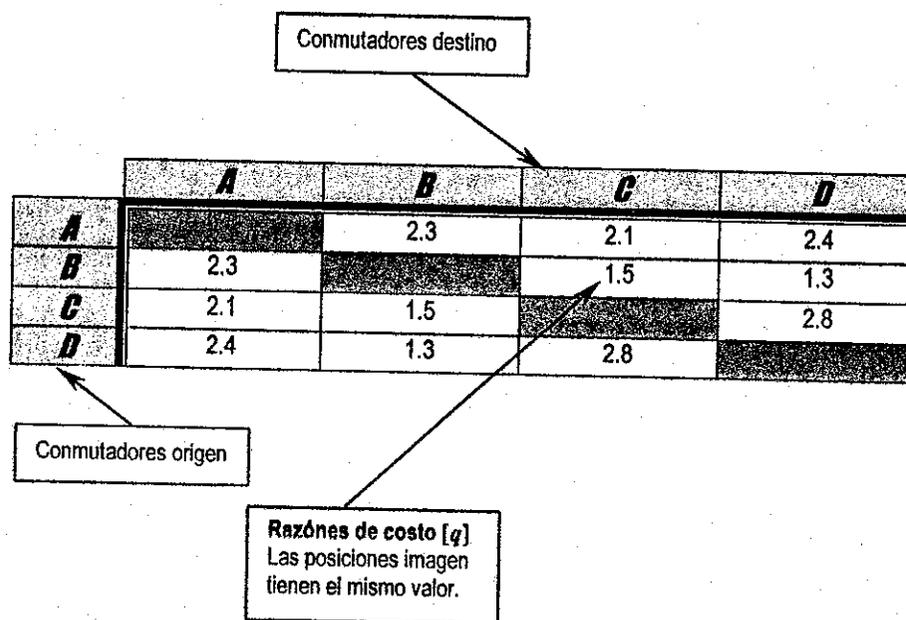


Figura 12
Representación gráfica de una matriz de costos o de razones de costo.
Los valores de q pueden ser calculados con la utilización de las ecuaciones [2.6] o [2.7].

2.3 Dimensionamiento de la red de señalización número 7 (SS7)

La señalización por canal común número 7 (SS7) se utiliza para comunicar a los diversos conmutadores de una red telefónica y de esta forma permitir el establecimiento de las llamadas en la misma.

Gracias a que esta señalización utiliza la modalidad de *canal común*; es decir, existe un circuito dedicado exclusivamente a la señalización de un grupo de circuitos de voz, se forma una red superpuesta de señalización SS7 que es relativamente independiente a la red de circuitos de voz.

La independencia de estas dos redes es relativa debido a que el dimensionamiento de ambas puede realizarse por separado, pero el funcionamiento de la red de circuitos de voz depende en su totalidad de la red de señalización, de tal forma que si esta última se congestiona, no podrán establecerse las llamadas aunque la red de circuitos de voz tenga aún capacidad de cursar tráfico.

En las secciones anteriores se estudiaron los procedimientos matemáticos para un adecuado dimensionamiento de una red de circuitos de voz. En la presente sección se extiende el estudio al dimensionamiento de la red de señalización número 7.

2.3.1 Proceso de dimensionamiento

Para iniciar el dimensionamiento de una red de señalización SS7 es necesario saber la topología de la misma, es decir, se debe conocer la cantidad de STP's (del inglés "signaling transfer point") existentes y la forma en que están interconectados estos, tanto entre sí, como con el resto de conmutadores de la red de circuitos de voz (los conmutadores se conocen como SP's -del inglés "signaling point"-). Las redes asociadas, cuasiasociadas o bien combinaciones de estas dos, son ejemplos comunes de

los modos de operar que utilizan las administraciones de telecomunicaciones, cuando en el diseño de redes de señalización SS7, buscan el equilibrio entre economía y fiabilidad.

También es importante conocer el volumen de tráfico que se le ofrece a cada ruta de señalización. Para ello se utiliza una matriz de tráfico ofrecido como la expuesta en la tabla XVI, es decir, una matriz balanceada.

El objetivo de conocer el volumen de tráfico es para poder obtener el número de llamadas por segundo que se efectúan en cada una de las rutas. Esto puede realizarse a través de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\mu_{ps} = \frac{a_i}{t_m} \quad [2.20]$$

Donde:

| | |
|------------|--|
| μ_{ps} | Número de llamadas por segundo [Call/seg] |
| a_i | Tráfico total ofrecido a la ruta de señalización (No se debe tomar en cuenta el tráfico interno de los conmutadores) [Erl] |
| t_m | Tiempo medio de duración de la llamada o retención del enlace [seg] |

Una vez conocido el número de llamadas efectuadas por segundo en las rutas de señalización [μ_{ps}], es necesario calcular el número medio de mensajes por llamada [m_{mpc}], para que así, a través del producto de estas dos cantidades se puedan obtener las unidades de señalización de mensaje por segundo (MSU, del inglés "message signaling unit"). La expresión matemática se aprecia en la ecuación [2.21].

$$MSU_{ps} = \mu_{ps} * m_{mpc} \quad [2.21]$$

Donde:

| | |
|------------|---|
| MSU_{ps} | Unidades de señalización de mensaje por segundo [Mssu/seg = mess/seg] |
| μ_{ps} | Número de llamadas por segundo [Call/seg] |
| m_{mpc} | Número medio de mensajes por llamada [mess/call] |

A continuación se detalla el proceso que se debe seguir para calcular el número medio de mensajes por llamada [m_{mpc}].

- a. Durante el establecimiento de una llamada, la red de señalización SS7 utiliza diversos mensajes cuyos tamaños difieren entre sí. Además, la cantidad de mensajes utilizados varía dependiendo del estado que alcance dicha llamada. En una red ISUP (del inglés "Integrated service user part"), se utilizan principalmente cinco tipos de mensajes diferentes, los cuales se detallan en la tabla XXVIII.

| Abreviatura | Significado | Longitud [bytes] |
|-------------|---|------------------|
| IAM | Mensaje Inicial de dirección (del inglés "Initial Address Message") | 25 |
| ACM | Dirección completa (del inglés "Address Complete Message") | 19 |
| ANM | Respuesta (del inglés "Answer Message") | 19 |
| REL | Liberación (del inglés "Release Message") | 19 |
| RLC | Liberación completa (del inglés "Release Complete") | 15 |

Tabla XXVIII

Mensajes principales utilizados en una red de señalización SS7 que alcanza el bloque funcional ISUP.

En la tabla XXIX se muestran los cuatro estados posibles de una llamada, las frecuencias típicas de los mismos en una red telefónica en buen estado y la cantidad de mensajes que estos requieren.

| Estado | Frecuencia (%) | Número de mensajes | $\langle l_{estado} \rangle$ [bytes] | m_{mps} |
|-----------------------------|----------------|--------------------|--------------------------------------|-----------|
| Completación de llamada | 60 | 5 | 19.4 | 3.00 |
| Abonado ocupado | 30 | 2 | 22 | 0.60 |
| Abonado no responde | 8 | 3 | 21 | 0.24 |
| Congestión de la red de voz | 2 | 2 | 22 | 0.04 |

Tabla XXIX

Posibles estados que puede alcanzar una llamada telefónica, frecuencias típicas de ocurrencia en una red telefónica que funciona correctamente, cantidad de mensajes requeridos, longitud media y media de mensajes por estado.

Además, la cantidad de mensajes aumenta en forma lineal con respecto al número de pasos tránsito que tenga una llamada.

- b. De las consideraciones hechas con anterioridad, es claro que no se puede tener un valor exacto de la longitud de los mensajes que se transmiten en la red de señalización SS7. Sin embargo, es posible calcular un valor medio que está expresado de la siguiente manera:

$$\langle l_{\text{mensaje}} \rangle = \{1 + P_{tn} * (m_{tn} - 1)\} * \left\{ \sum F_{\text{estado}} * \langle l_{\text{estado}} \rangle \right\} \quad [2.22]$$

Donde:

| | |
|--------------------------------------|---|
| $\langle l_{\text{mensaje}} \rangle$ | Longitud media de un mensaje [bits] |
| P_{tn} | Proporción de tráfico cursado via tránsito |
| m_{tn} | Pendiente o escala de aumento de los mensajes debido a los pasos tránsito |
| F_{estado} | Frecuencia con que se dan las llamadas de un estado en particular |
| $\langle l_{\text{estado}} \rangle$ | Longitud media de un estado en particular [bits] |

- c. Puesto que los estados de las llamadas tienen diferente cantidad de mensajes (ver tabla XXIX), la longitud media de cada uno de ellos se puede calcular según la expresión:

$$\langle l_{\text{estado}} \rangle = \frac{\sum l_{\text{mensaje}}}{n_{\text{estado}}} \quad [2.23]$$

Donde:

| | |
|-------------------------------------|---|
| $\langle l_{\text{estado}} \rangle$ | Longitud media de un estado en particular [bits] |
| l_{mensaje} | Longitud de cada uno de los mensajes involucrados en un estado en particular [bits] |
| n_{estado} | Número de mensajes por estado |

En la cuarta columna de la tabla XXIX se presentan las longitudes medias de los cuatro estados posibles de una llamada.

- d. Además del cálculo de la longitud media de un mensaje [$\langle l_{\text{mensaje}} \rangle$], se tiene que obtener el número medio de mensajes por estado [m_{mps}] (ver tabla XXIX).

$$m_{mps} = F_{\text{estado}} * n_{\text{estado}} \quad [2.24]$$

Donde:

| | |
|---------------------|---|
| m_{mps} | Número medio de mensajes por estado |
| F_{estado} | Frecuencia con que se dan las llamadas de un estado en particular |
| n_{estado} | Número de mensajes por estado |

- e. Entonces a partir del número medio de mensajes por estado [m_{mps}], se obtiene el número medio de mensajes por llamada [m_{mpc}] según la siguiente expresión:

$$m_{mpc} = \{1 + P_m * (m_m - 1)\} * \sum m_{mps} \quad [2.25]$$

Donde:

| | |
|-----------|---|
| m_{mpc} | Número medio de mensajes por llamada [mess/call] |
| P_m | Proporción de tráfico cursado vía tránsito |
| m_m | Pendiente o escala de aumento de los mensajes debido a los pasos tránsito |
| m_{mps} | Número medio de mensajes por estado |

Como se pudo apreciar en el procedimiento de cálculo del número medio de mensajes por llamada [m_{mpc}], el valor de la longitud media de un mensaje [$\langle l_{\text{mensaje}} \rangle$], no se utilizó en la ecuación [2.25], pero se obtuvo por su importancia en la determinación del volumen de información que debe cursar cada ruta de señalización.

Entonces con las unidades de señalización obtenidas con la ecuación [2.21] y la longitud media de un mensaje, calculada a través de la ecuación [2.22], se obtiene el volumen de información que debe cursar cada ruta de señalización utilizando la siguiente expresión:

$$i = \frac{MSU_{ps} * \langle l_{mensaje} \rangle}{(2 * n_{sr})} \quad [2.26]$$

Donde:

| | |
|-------------------------------|--|
| i | Volumen de información que debe cursar una ruta de señalización [bits/seg] |
| MSU_{ps} | Unidades de señalización de mensaje por segundo [Msu/seg] |
| $\langle l_{mensaje} \rangle$ | Longitud media de un mensaje [Bits/mess] |
| n_{sr} | Número de rutas de señalización que se desean crear |

A “ i ” también se le conoce con el nombre de *tráfico de señalización*, y es esta magnitud la que se utiliza para dimensionar el número de enlaces de señalización [SI] que se requieren en cada ruta. Un sistema digital de 32 canales soporta velocidades de transmisión de hasta 64 Kb/s por canal. Sin embargo, los enlaces de señalización (64 Kb/s) no deben cargarse más de un 20%.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el número de enlaces de señalización necesarios en cada ruta se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$SI = \frac{i}{0.2 * V_s} \quad [2.27]$$

Donde:

| | |
|-------|--|
| SI | Número de enlaces de señalización |
| i | Volumen de información que debe cursar una ruta de señalización [Bits/seg] |
| V_s | Velocidad de transmisión por canal de un sistema digital [Bits/seg] |

Una vez dimensionados los enlaces de la red de señalización SS7, se puede obtener la cantidad de mensajes por segundo que han de manejar los puntos de transferencia de señalización (STP), a través de la sumatoria de las unidades de señalización de mensaje por segundo [MSU_{ps}] de todos aquellos enlaces que estén conectados a cada STP.

MODELO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES

El objetivo de esta sección es modelar una red de telecomunicaciones ficticia que abarque las áreas de conmutación, señalización y transmisión (incluyendo el medio de transmisión de fibra óptica).

Para cada una de estas áreas se expone la topología de red (incluyendo distancias -si estas son requeridas-), así como los costos y parámetros técnicos típicos que caracterizan a los diferentes elementos constitutivos de las mismas. Este modelo se utiliza más adelante para realizar diversos análisis económicos en lo que respecta al desarrollo y explotación de redes de telecomunicaciones.

3.1 Modelo de la red de conmutación

La red de conmutación de este modelo está constituida por una estación terrena (encargada de las comunicaciones vía satélite al exterior -se asume que el tráfico internacional entrante es de 585 Erl.-), un conmutador de tránsito internacional, dos conmutadores que realizan el tránsito local y de larga distancia y por cuatro conmutadores locales. Los conmutadores tránsito están dedicados exclusivamente a dicha función; es decir, no prestan servicio a ningún abonado en forma directa. Asimismo, los conmutadores locales no poseen funciones tránsito.

La topología de la red de conmutación es mixta o combinada, pues en forma general es una red tipo árbol con mallas en los niveles tránsito y local para permitir mayor fiabilidad en la red.

En la figura 13 se puede apreciar con mayor claridad las características expuestas anteriormente.

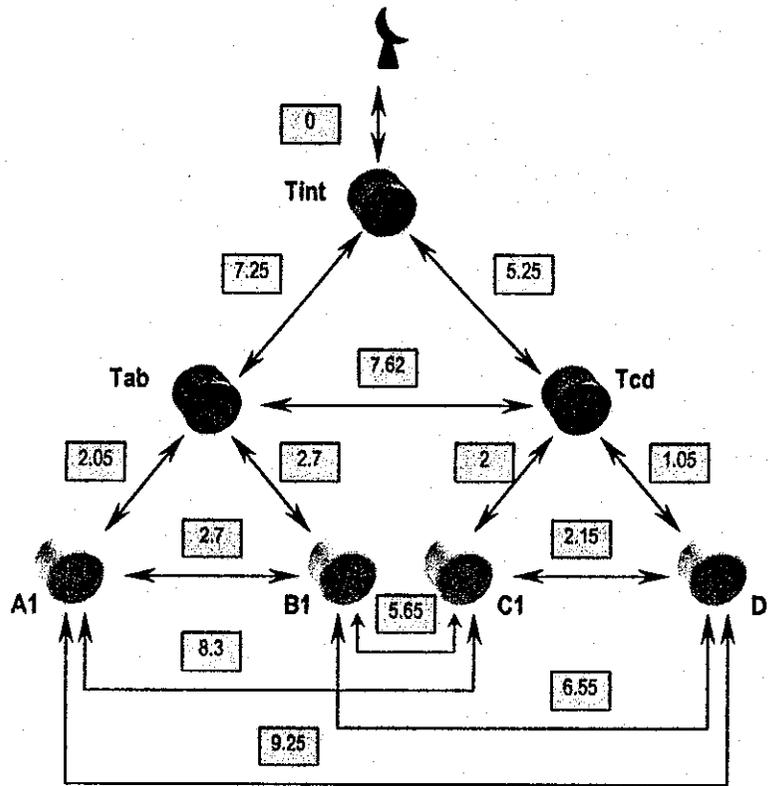


Figura 13
 Topología, interconexión y distancias de la red de conmutación ficticia.
 Las distancias están expresadas en kilómetros.

Cada conmutador está caracterizado por una serie de parámetros técnicos tales como la capacidad de procesamiento (expresada en BHCA), tecnología que utiliza (digital o analógica), tipo de señalización (SS7, R2, etc.), volumen de tráfico que debe manejar (este debe involucrar el tráfico entrante, saliente, interno y el que debe transitar), número de enlaces requeridos (obtenidos a través de un proceso de dimensionamiento riguroso), etc. Así mismo, los costos asociados a los conmutadores se pueden resumir en costos de inversión inicial, costos de procesamiento y costos de enlaces (tanto de voz como de señalización SS7 -si así se requiere-).

Los principales parámetros técnicos, que caracterizan a cada conmutador del modelo que se expone en la figura 13, se presentan en la tabla XXX.

| Conmutador | Número de abonados N_{ab} | Tráfico por abonado A_{ab} [Erl] | Señalización | Tipo | Enlaces | | | Téc. |
|------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------------|------|
| | | | | | Sistemas digitales de voz | Enlaces SS7 | Procesador [KBHCA] | |
| A1 | 30,000 | 0.102 | SS7 | Local | 146 | 2 | 600 | D* |
| B1 | 15,000 | 0.085 | SS7 | Local | 82 | 2 | 151 | D |
| C1 | 10,000 | 0.070 | SS7 | Local | 43 | 2 | 54 | D |
| D1 | 25,000 | 0.100 | SS7 | Local | 130 | 2 | 151 | D |
| Tab | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 34 | 4 | 54 | D |
| Tcd | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 33 | 4 | 54 | D |
| Tint | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (int) | 24 | 4 | 54 | D |

Tabla XXX

Información general y parámetros técnicos de los conmutadores de la red ficticia de conmutación.

*D = Tecnología digital.

**L = Local, iu = Interurbano = larga distancia, int = Internacional.

Los costos típicos de los principales elementos constitutivos de un conmutador se pueden apreciar en la tabla XXXI y a partir de estos se obtiene el costo unitario de los sistemas digitales (E1), de los enlaces de señalización SS7 y de un KBHCA (1 KBHCA = 1000 BHCA) de capacidad de procesamiento. Asimismo se determina la inversión inicial en función del número de abonados. (Ver tabla XXXII).

| Elemento constitutivo | Costo [US\$] | Detalle |
|---|--------------|---------------------------|
| Información General | | |
| Bastidor | 1,467.00 | Soporta 6 porta módulos |
| Porta módulos | 13,991.00 | Soporta 8 sistemas |
| Tarjeta de 2 Mbit/s para procesamiento de voz | 5,100.00 | De 1 sistema (30 canales) |
| Unidad de cinta | 12,550.27 | De gran capacidad |
| Bastidor de la unidad de cinta | 15,868.00 | Incluye accesorios |
| Unidad de disco duro | 5,310.00 | De gran capacidad |
| Energía 1500 A (costo fijo) | 100,000.00 | En ausencia de troncales |
| Energía 1500 A (costo variable) | 35,825.00 | Hasta 18,000 troncales |

Tabla XXXI

Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de un conmutador y el CPU del mismo. (Continúa en la siguiente página)

| Elemento constitutivo | Costo (US\$) | Detalle |
|---------------------------------------|--------------|----------------------------|
| Información General | | |
| Aire acondicionado | 26,000 | De 3 toneladas |
| Terminal de video | 5,727.00 | Con impresora |
| Instalación del equipo (conmutador) | 20,000.00 | Mano de obra |
| Varios | 40,000.00 | Varia con el tiempo |
| CPU | | |
| Procesador de hasta 54 KBHCA | 136,726.00 | Configuración básica |
| Memoria (modulo de ampliación) | 20,922.00 | Hasta 54 KBHCA |
| Procesador de hasta 151 KBHCA | 333,342.00 | Configuración básica |
| Memoria (modulo de ampliación) | 50,458.00 | Hasta 151 KBHCA |
| Procesador de hasta 600 KBHCA | 924,299.00 | Configuración básica |
| Memoria (modulo de ampliación) | 151,374.00 | Hasta 600 KBHCA |
| Procesador secundario de abonados | 1,373.00 | Hasta 5000 abonados |
| Procesador secundario de troncales | 1,373.00 | Hasta 16 sistemas |
| Matriz de conmutación (con software) | 227,000.00 | Hasta 18,000 troncales |
| Enlaces SS7 (en el conmutador) | | |
| Bastidor | 22,042.00 | Soporta 3 porta módulos |
| Porta módulos | 2,738.15 | Debe alojar 16 tarjeta |
| Tarjeta | 274.00 | De 1 enlace SS7 |
| Procesador | 1,373.00 | Hasta 8 enlaces SS7 |
| Software | 1,428.60 | Para 1 tarjeta |
| Energía 40 A (costo fijo) | 27,000.00 | En ausencia de enlaces SS7 |
| Energía 40 A (costo variable) | 2,857.00 | Hasta 50 enlaces SS7 |
| Instalación del equipo (enlaces SS7) | 7,000.00 | Mano de obra |

Tabla XXXI

Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de un conmutador y el CPU del mismo.
(Inicia en la página anterior)

| Unidad | Costo (US\$) | Detalle |
|---|---|--|
| 1 Sistema digital (E1) | 7,428.87 | |
| 1 Enlace SS7 | 2,561.71 | |
| 1 KBHCA | 2,919.41 | [0, 54] KBHCA |
| 1 KBHCA | 2,541.72 | (54, 151]** KBHCA |
| 1 KBHCA | 1,792.79 | (151, 600] KBHCA |
| Inversión inicial por conmutador (solo voz y sin Tx) | 225,455.27+ (0.2746*N _{abo}) | Depende del número de abonados [N _{abo}] |
| Costo fijo debido a los enlaces SS7 | 34,000.00 | Por conmutador |

Tabla XXXII

Costos unitarios de inversión inicial, procesamiento y enlaces en los conmutadores.
**En la notación de rangos numéricos, el corchete, "[", implica que el extremo del rango se incluye,
y el paréntesis, "(", implica que dicho extremo no se incluye.

Es importante hacer notar que los costos asociados a los enlaces de señalización SS7 que se exponen en las tablas XXXI y XXXII se incluyen debido a que cada conmutador debe estar equipado adecuadamente para interconectarse a la red superpuesta de señalización SS7 que se describe con mayor detalle en la siguiente sección (esta consideración no es válida para conmutadores que utilizan señalización R2).

La tabla XXXIII presenta un resumen de los costos de los conmutadores haciendo uso de la información expuesta en las tablas XXX y XXXII.

| Conmutador | Costo de Inversión Inicial (sin Tx) [US\$] | Costo de procesamiento [US\$] | Costo de enlaces (voz y SS7) [US\$] | Costo de ajustes* [US\$] | Costo TOTAL [US\$] |
|--|--|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| A1 | 267,693.27 | 1,075,673.00 | 1,199,686.17 | 70,448.30 | 2,579,500.74 |
| B1 | 263,574.27 | 383,800.00 | 677,584.98 | 69,470.39 | 1,360,429.64 |
| C1 | 262,201.27 | 157,648.00 | 357,549.14 | 67,446.46 | 810,844.87 |
| D1 | 266,320.27 | 383,800.00 | 1,000,592.38 | 69,470.38 | 1,686,183.03 |
| Tab | 259,455.27 | 157,648.00 | 262,828.51 | 67,866.43 | 713,798.21 |
| Tcd | 259,455.27 | 157,648.00 | 255,399.64 | 69,645.87 | 708,148.78 |
| Tint | 259,455.27 | 157,648.00 | 188,539.77 | 57,678.77 | 629,321.81 |
| Costo total de la red de Conmutación (sin la estación terrena) | | | | | 8,488,227.08 |

Tabla XXXIII

Costos asociados a los conmutadores de la red ficticia de conmutación.

*Los costos de ajustes representan el proceso de llevar el requerimiento de equipo a valores existentes en el mercado.

3.2 Modelo de la red de señalización No. 7 (SS7)

La red superpuesta de señalización SS7 de este modelo se encuentra formada por dos puntos de transferencia de señalización (STP, del inglés "signaling transfer point"), donde uno de ellos funciona como STP primario y el otro como STP de respaldo, y por siete puntos de señalización (SP, del inglés "signaling point"); es decir, los siete conmutadores.

Los STP's se consideran como "Stand Alone"; es decir, que no poseen ninguna capacidad para conmutar voz, y por lo tanto, están dedicados exclusivamente a la señalización SS7.

Por otro lado, en términos generales, la red posee un modo de operar cuasiasociado, pues todos los SP's están enlazados entre sí a través de los STP's. Sin embargo, existen tres enlaces asociados (directos) entre los conmutadores tránsito (Tint, Tab y Tcd) para aumentar la fiabilidad de la red.

La representación gráfica de la topología de red se aprecia en la figura 14.

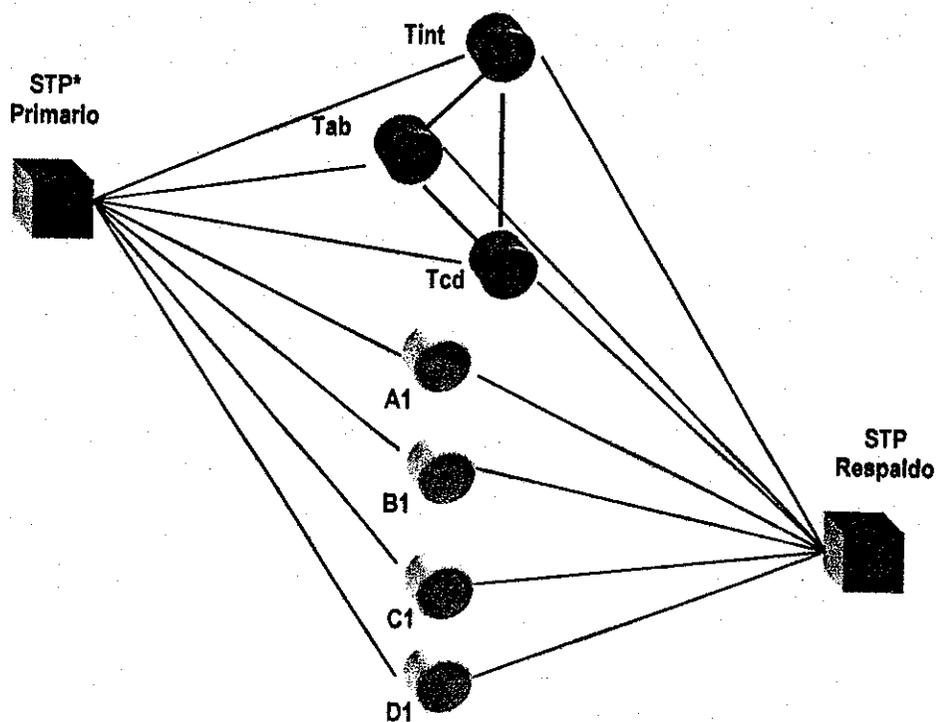


Figura 14

Topología de la red superpuesta de señalización SS7.
Los conmutadores son los SP (puntos de señalización).

*Existe un enlace de señalización entre los dos STP's que no se muestra en la figura.

Puesto que los SP's son los mismos conmutadores, sus costos y parámetros técnicos ya han sido expuestos en la sección anterior, por lo que en la tabla XXXIV se exponen los costos de los principales elementos constitutivos de un STP.

| Elemento constitutivo | Costo [US\$] | Detalla |
|-------------------------------|--------------|----------------------------|
| Enlaces SS7 | | |
| Bastidor | 22,042.00 | Soporta 3 porta módulos |
| Porta módulos | 2,738.15 | Debe alojar 16 tarjeta |
| Tarjeta | 274.00 | De 1 enlace SS7 |
| Procesador | 1,373.00 | Hasta 8 enlaces SS7 |
| Software | 1,428.60 | Para 1 tarjeta |
| Información Adicional | | |
| Energía 40 A (costo fijo) | 27,000.00 | En ausencia de enlaces SS7 |
| Energía 40 A (costo variable) | 2,857.00 | Hasta 50 enlaces SS7 |
| Aire acondicionado | 26,000.00 | De 3 toneladas |
| Instalación del equipo (STP) | 7,000.00 | Mano de obra |
| Otros | 10,000.00 | Varía con el tiempo |

Tabla XXXIV

Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de un STP.

Como se puede apreciar en la tabla XXXIV, los principales elementos constitutivos de un STP y sus costos son idénticos a los requeridos en los enlaces de señalización SS7 de los conmutadores, por lo que el costo unitario por enlace de señalización SS7 es igual al expuesto en la tabla XXXII, a saber, de US\$ 2,561.71. Sin embargo, el costo fijo asciende a US\$ 70,000.00. En la tabla XXXV se presenta un resumen de costos y parámetros técnicos de importancia en los STP's del modelo ficticio.

| STP | Capacidad de procesamiento [KMsu/s] | Enlaces SS7 | Costo fijo [US\$] | Costo de enlaces SS7* [US\$] | Costo TOTAL (con ajustes) [US\$] |
|---|-------------------------------------|-------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|
| STP primario | 0.3416 | 8 | 70,000.00 | 20,493.66 | 110,231.10 |
| STP respaldo | 0.3416 | 8 | 70,000.00 | 20,493.66 | 110,231.10 |
| Costo total de la red de señalización SS7 | | | | | 220,462.20 |

Tabla XXXV

Costos y parámetros técnicos de los STP's de la red de señalización SS7.

*Ya incluyen el costo de procesamiento proporcional.

3.3 Modelo de la red de transmisión

La red de transmisión esta constituida por un anillo de fibra óptica que une a todos los conmutadores y STP's, así como por todos los sistemas necesarios para enlazar este medio (fibra) con la red de conmutación. Esto se muestra en la figura 15.

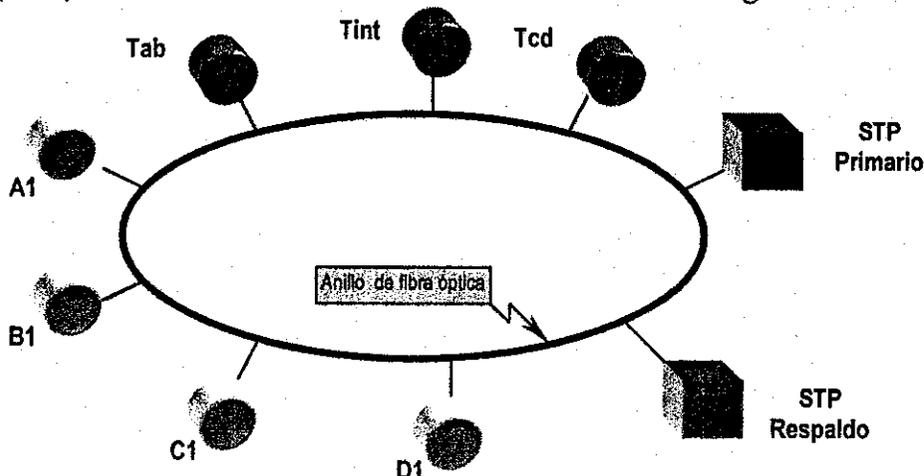


Figura 15
Topología de la red de transmisión.

Los principales elementos constitutivos de la red de transmisión y los costos asociados a los mismos se resumen en la tabla XXXVI.

| Elemento constitutivo | Costo [US\$] | Detalle |
|-------------------------------|--------------|------------------|
| Fibra Óptica | | |
| Cable de 18 fibras* | 4.55 | Por metro lineal |
| Caja de empalme | 30.00 | Una por cable |
| Empalme | 1,333.00 | Por cable |
| Tendido del cable | 0.51 | Por metro lineal |
| Canalización | 7,191.30 | Por Kilómetro |
| Pozos (mano de obra y tierra) | 1,800.00 | Uno cada 2 Km. |
| Ducto PVC de 4" | 1,000.00 | Por Kilómetro |

Tabla XXXVI

Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de una red de transmisión.

*Se asume que cada rollo de cable de fibra tiene una longitud de 2 Kms.

(Sigue en la siguiente página)

| Elemento constitutivo | Costo [US\$] | Detalle |
|----------------------------------|--------------|-------------------------|
| Sistemas de Transmisión** | | |
| ODF (Optical Distribution Frame) | 861.00 | Hasta 12 fibras (todos) |
| Sub-bastidor terminal | 2,054.00 | Hasta 12 fibras (todos) |
| Equipo de cross conexión | 1,930,736.00 | Solo para Cx Tránsito |
| Unidad tributaria 4 a 1 | 273,564.00 | Para todos (Cx o STP) |
| Equipo de sincronización | 34,348.00 | Para todos (Cx o STP) |
| Marcos de distribución | 2,800.00 | Para todos (Cx o STP) |
| Energía y aire acondicionado | 59,800.00 | Para todos (Cx o STP) |
| Materiales de instalación | 13,000.00 | Para todos (Cx o STP) |
| Instalación | 19,000.00 | Para todos (Cx o STP) |

Tabla XXXVI

Costos típicos (a 1,996) de los principales elementos constitutivos de una red de transmisión.

**Estos sistemas son necesarios para cada conmutador o STP (salvo las excepciones).

(Inicia en la página anterior)

El resumen de costos y de características técnicas de la red de fibra óptica del modelo ficticio se presenta en la tabla XXXVII.

| Característica | Valor | Dimensional |
|--|------------|-------------|
| Longitud (con segmentos aproximados al valor mínimo de cada rollo de fibra óptica) | 34 | Km |
| Ancho de banda | 622 | Mbit/s |
| Costo total por Km | 14,832.80* | US\$ |
| Costo total del anillo de fibra | 504,315.20 | US\$ |

Tabla XXXVII

Características de la red de fibra óptica del modelo ficticio.

*Este costo no incluye la electrónica asociada, pues ya fue incluida en los sistemas de transmisión.

El resumen de costos de inversión inicial para cada conmutador y STP, debido a los sistemas de transmisión necesarios en cada uno de ellos, se presenta en la columna sombreada de la tabla XXXVIII (estos valores deben agregarse a los expuestos en las secciones anteriores para obtener el monto total de la inversión inicial de los conmutadores y STP's).

| Conmutador o STP | Inversión Inicial debido a los sistemas de transmisión [US\$] | Inversión Inicial debido a la red de conmutación [US\$] | Costos fijos debidos a la red de señalización SS7 [US\$] | Gasto TOTAL [US\$] |
|------------------------|--|--|---|--------------------------|
| A1 | 406,884.50 | 233,693.27 | 34,000.00 | 674,577.77 |
| B1 | 406,884.50 | 229,574.27 | 34,000.00 | 670,458.77 |
| C1 | 406,884.50 | 228,201.27 | 34,000.00 | 669,085.77 |
| D1 | 406,884.50 | 232,320.27 | 34,000.00 | 673,204.77 |
| Tab | 2,337,620.50 | 225,455.27 | 34,000.00 | 2,597,075.77 |
| Tcd | 2,337,620.50 | 225,455.27 | 34,000.00 | 2,597,075.77 |
| Tint | 2,337,620.50 | 225,455.27 | 34,000.00 | 2,597,075.77 |
| STP primario | 406,884.50 | 0.00* | 70,000.00 | 476,884.50 |
| STP respaldo | 406,884.50 | 0.00 | 70,000.00 | 476,884.50 |
| | 9,454,168.50 | | Costo total de inversión Inicial | 11,432,323.39 |

Tabla XXXVIII

Costos de inversión inicial de los conmutadores y STP's del modelo ficticio.
 *Para los STP's la inversión inicial de la red de conmutación es cero,
 pues no poseen enlaces de voz.

3.4 Modelo de la estación terrena

Las características técnicas y económicas de la estación terrena se exponen en la tabla XXXIX.

| Característica | Valor | Dimensional |
|---|--------------|-------------|
| Costo anual por el arrendamiento de un canal vía satélite de 2 Mbit/s | 102,000.00 | US\$ |
| Costo de estación terrena con DCME 4x1 | 1,400,000.00 | US\$ |
| Número de canales (2 Mbit/s) | 6 | Canales |

Tabla XXXIX

Características de la estación terrena.

3.5 Distribución porcentual de intereses

La forma en la cual se distribuyen los intereses de comunicación entre los diferentes conmutadores del modelo ficticio expuesto en la figura 13 se detalla en la tabla XL.

Los costos de sustitución, así como los de operación y mantenimiento (O&M) se estiman en un 25 % de la inversión neta, mientras que el cambio del TPI (del inglés "Telephone Plant Index" -que representa el crecimiento inflacionario existente en el área de telecomunicaciones-) entre 1996 y 1998 genera un 0.92 % de aumento en los costos.

A pesar de tener el costo total de la inversión que se debe realizar para implementar la red de telecomunicaciones expuesta a lo largo de las secciones precedentes, es necesario transformar dicha inversión a un valor representativo anual que refleje los costos de depreciación, de impuestos y el factor de retorno de la inversión.

Asumiendo un período de vida útil de los equipos de 5 años, el costo unitario de depreciación es de 0.2. Asimismo, si el costo de capital es de un 15%, el factor de retorno de la inversión unitario es de 0.1483 y el costo unitario por impuestos (tomando en cuenta únicamente el 30% del impuesto sobre la renta aplicado al monto total) es de 0.0636. Entonces, utilizando estos tres factores y agregando el arrendamiento de 6 canales vía satélite que requiere la red, se puede obtener que el *valor real anualizado* de la inversión es de US\$ 11,019,608.30 y sabiendo que el volumen de tráfico de la red genera aproximadamente 54.252 millones de minutos de conversación al mes, se obtiene que el costo promedio de un minuto de conversación es de US\$ 0.01693 (aproximadamente 1.7 centavos de dólar).

ANÁLISIS ECONÓMICO DE UNA RED DE TELECOMUNICACIONES

El objetivo de esta última fase es efectuar el análisis económico de una red de telecomunicaciones (se utiliza el modelo desarrollado con anterioridad, y se hace referencia al mismo como "red dominante") frente a un operador que requiere interconectarse a la misma en tres escenarios diferentes. El primer escenario modela el caso cuando la red dominante no posee capacidad disponible para brindar interconexión, y por lo tanto, debe desarrollar una red alterna a la que ya esta en funcionamiento, para brindar la capacidad exacta que necesita el interconectante. El segundo escenario es igual al anterior, pero en este caso se ofrece la capacidad más próxima existente en el mercado. El tercero y último escenario modela el caso cuando la red dominante posee capacidad de reserva, que puede utilizar para brindar cierta parte de los requerimientos del interconectante, teniendo que implementar aquello que no se logre cubrir.

4.1 Interconexión a una red dominante sin capacidad

4.1.1 Consideraciones generales

La red dominante, constituida por el modelo ficticio desarrollado con anterioridad, se considera que está operando a su capacidad límite en cuanto a conmutación y señalización SS7, es decir, que cualquier aumento en la carga de tráfico actual de la misma, implica una ampliación en la red. Sin embargo, la política del operador dominante se centra en desarrollar una red alterna (con la misma estructura de la existente) en el caso de haber un aumento en el volumen de tráfico ofrecido a la red.

Por otro lado, un nuevo operador de telecomunicaciones requiere interconectarse a la red dominante, ofreciéndole a la misma un volumen de tráfico de 9.36 millones de minutos de conversación al mes. El operador interconectante estima que la relación entrante/saliente local de su red hacia la red dominante es de 1 a 6 y que la relación entrante/saliente internacional es de 10 a uno. Así mismo considera que la distribución porcentual de intereses de comunicación responde al número de abonados existentes en las diferentes regiones que atiende el operador dominante.

4.1.2 Determinación de la capacidad exacta requerida por el interconectante

Tomando como base las consideraciones de la sección anterior, el operador dominante decide realizar la interconexión de las redes de conmutación estableciendo enlaces entre el operador interconectante y los dos conmutadores de tránsito larga distancia de su red, los cuales deben transportar el tráfico hacia los conmutadores locales o hacia el conmutador internacional, según sea el caso. Ésto se puede apreciar con mayor claridad en la figura 16.

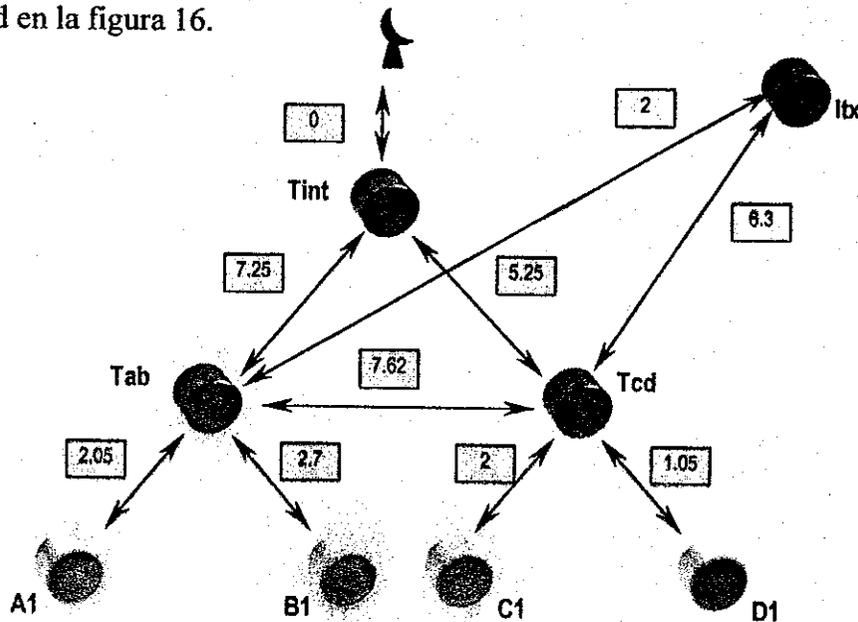


Figura 16
Interconexión entre el operador dominante y el nuevo operador (Itx).

La señalización SS7 del interconectante se hace a través de dos enlaces establecidos a un STP primario y a un STP de respaldo. Estos dos STP's permiten la operación cuasiasociada de la red alterna que debe desarrollar el operador dominante.

La red de fibra óptica no debe ser modificada gracias a la gran capacidad de transporte que posee (622 Mbit/seg), sin embargo, el interconectante debe tener los sistemas de transmisión necesarios para tener acceso a la misma.

La distribución porcentual de intereses de comunicación entre los nuevos conmutadores de la red dominante y la red del operador interconectante (Itx), se muestran en la tabla XLII.

| | A | | | B | | | C | | | D | | | E | | | F | | |
|---|------|---|---|------|---|---|------|---|---|------|---|---|-----|---|---|---|---|-----|
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E | 36,5 | 0 | 0 | 18,2 | 0 | 0 | 12,2 | 0 | 0 | 30,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,7 |
| F | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla XLII

Distribución porcentual de intereses de comunicación entre el operador dominante y el nuevo operador (Itx).
 *Referirse a la figura 7 (página 62) para interpretar el significado de cada posición matricial.

Utilizando esta distribución porcentual de intereses de comunicación (tabla XLII), el operador dominante obtiene la matriz de tráfico generada debido al proceso de interconexión, la cual se utiliza en el dimensionamiento de los conmutadores que constituyen la red alterna del operador dominante.

Los resultados exactos de dicho dimensionamiento, así como el resumen de los costos asociados a la implementación de la red alterna, se aprecian en las tablas XLIII y XLIV respectivamente.

| Enlaces | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|-----|
| Conmutador o STP | Tráfico Saliente M./[Er] | Señalización | Tipo | Sistemas digitales de voz | Enlaces SS7 | Procesador [KBHCA] | Tec |
| A1 | 81.25 | SS7 | Local | 20 | 2 | 14.5940 | D* |
| B1 | 40.63 | SS7 | Local | 12 | 2 | 7.9716 | D |
| C1 | 27.08 | SS7 | Local | 7 | 2 | 4.8640 | D |
| D1 | 67.71 | SS7 | Local | 17 | 2 | 12.1594 | D |
| Itx | 1,300.00 | SS7 | Operador interconectante | | | | D |
| Tab | 0.00 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 70 | 4 | 50.3365 | D |
| Tcd | 0.00 | SS7 | Tránsito (L, iu) | 24 | 4 | 17.0235 | D |
| Tint | 0.00 | SS7 | Tránsito (int) | 4 | 4 | 2.6026 | D |
| STP primario | | | | | 9 | 0.2938 | |
| STP respaldo | | | | | 9 | 0.2938 | |

Tabla XLIII

Información general y parámetros técnicos exactos obtenidos del proceso de dimensionamiento de la red alterna que debe implementar el operador dominante para dar interconexión a un operador (Itx) que ofrece 9.36 millones de minutos de conversación al mes.

*D = Tecnología digital.

**L= Local, iu = Interurbano = larga distancia, int = Internacional.

| Elemento | Costo [US\$] | Sub-total [US\$] |
|---|--------------|------------------|
| Conmutadores y STP's | | |
| A1 | 862,646.64* | |
| B1 | 783,882.00 | |
| C1 | 737,665.52 | |
| D1 | 833,252.32 | |
| Tab | 3,274,296.51 | |
| Tcd | 2,835,314.08 | |
| Tint | 2,644,636.14 | |
| STP primario | 499,939.87 | |
| STP respaldo | 499,939.87 | 12,971,572.95 |
| Sub-total de la red de telecomunicaciones | | 12,971,572.95 |
| Costos de sustitución, O&M y cambio del TPI** (96-98) | | 3,362,231.71 |
| TOTAL*** | | 16,333,804.66 |

Tabla XLIV

Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante (capacidades exactas).

*Estos costos involucran conmutación, señalización SS7 y sistemas de transmisión.

**TPI viene del inglés "Telephone Plant Index" y representa el crecimiento inflacionario de las telecomunicaciones.

***El costo total no incluye el arrendamiento de los canales vía satélite, pues se agrega a la inversión anualizada que debe efectuar el operador dominante.

Aplicando el factor unitario de costos de inversión de este modelo (0.41188) a la inversión total que debe realizar el operador dominante para desarrollar la red alterna (tabla XLIV), y agregando el costo anual de arrendamiento de un canal vía satélite (US\$ 102,000.00 -ver tabla XXXIX-), se obtiene que el *valor real* de la inversión anualizada es de US\$ 6,829,557.02 por lo que el costo promedio de un minuto de conversación es de US\$ 0.060804, que es aproximadamente 6.09 centavos de dólar (para el cálculo de los minutos de conversación al año se utiliza $9.36 \times 12 = 112.32$ millones de minutos). Estos costos promedio son validos únicamente si el operador dominante puede obtener la capacidad exacta requerida por el interconectante.

4.1.3 Determinación de la capacidad más próxima, a los requerimientos del interconectante, existente en el mercado

Debido a que en el mercado no existe la posibilidad de encontrar capacidades de procesamiento que coincidan exactamente a los requerimientos de un dimensionamiento, es necesario aproximar dichas magnitudes a los valores superiores más próximos que existan. Una aproximación similar (debido a la modularidad de los equipos) debe hacerse con los bastidores y los porta módulos necesarios en un conmutador o STP. Este problema no se da en los sistemas digitales y en los enlaces de señalización SS7 debido a que estos pueden adquirirse en unidades independientes, de tal forma que se pueden ajustar exactamente a los requerimientos de un dimensionamiento.

Las consideraciones anteriores hacen necesario que las capacidades de procesamiento de los conmutadores, expuestas en la tabla XLIII, se aproximen a 54 KBHCA (capacidad mínima de procesamiento para este modelo), pues ninguna de ellas sobrepasa este valor. Estas aproximaciones, sumadas a los cambios necesarios debido a la modularidad de los equipos (bastidores y porta módulos), hacen que los costos de los conmutadores y STP's aumenten, y consecuentemente la inversión total (ver tabla XLV).

| Elemento | Costo [US\$] | Sub-total [US\$] |
|---|---------------|----------------------|
| Conmutadores y STP's | | |
| A1 | 1,010,089.10* | |
| B1 | 950,902.59 | |
| C1 | 908,664.39 | |
| D1 | 993,140.80 | |
| Tab | 3,312,229.34 | |
| Tcd | 2,966,942.30 | |
| Tint | 2,825,971.57 | |
| STP primario | 520,248.38 | |
| STP respaldo | 520,248.38 | 14,008,436.85 |
| Sub-total de la red de telecomunicaciones | | 14,008,436.85 |
| Costos de sustitución, O&M y cambio del TPI (96-98) | | 3,630,986.83 |
| TOTAL** | | 17,639,423.68 |

Tabla XLV

Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante (capacidades reales).

*Estos costos involucran conmutación, señalización SS7 y sistemas de transmisión.

**El costo total no incluye el arrendamiento de los canales vía satélite.

Al igual que en la sección anterior, usando el factor unitario del costo de la inversión y el costo de arrendamiento de un canal vía satélite, se transforma la inversión total (tabla XLV) en un *valor real anualizado*, que asciende a US\$ 7,367,314.55, y a partir de esta inversión se obtiene que el costo promedio de cada minuto de conversación es de US\$ 0.065592 (6.56 centavos de dólar).

La aproximación a una capacidad de procesamiento superior, permite manejar mayores volúmenes de tráfico, siempre y cuando se adquieran los sistemas adicionales para dicho fin. Por ello, el operador dominante pretende obtener mayor beneficio al efectuar una inversión adicional, para cursar tres veces el volumen de tráfico ofrecido por el interconectante, pues de esta forma tendrá menos recursos de procesamiento ociosos y además puede vender o utilizar en su propia red la capacidad adicional que adquiera. Los resultados técnicos y económicos obtenidos por el operador dominante para implementar una red alterna que provea capacidad de cursar tres veces el volumen de tráfico ofrecido por el operador interconectante se resumen en las tablas XLVI y XLVII, respectivamente.

| Enlaces | | | | | | | |
|------------------|--|--------------|--------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|-----|
| Conmutador o STP | Tráfico Saliente λ_{out} [Erl] | Señalización | Tipo | Sistemas digitales de voz | Enlaces SS7 | Procesador [KBHCA] | Tec |
| A1 | 243.75 | SS7 | Local | 58 | 2 | 54 | D* |
| B1 | 121.89 | SS7 | Local | 32 | 2 | 54 | D |
| C1 | 81.24 | SS7 | Local | 20 | 2 | 54 | D |
| D1 | 203.13 | SS7 | Local | 48 | 2 | 54 | D |
| Itx | 3900.00 | SS7 | Operador Interconectante | | | | D |
| Tab | 0.00 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 200 | 9 | 151(29%res) | D |
| Tcd | 0.00 | SS7 | Tránsito (L, iu) | 137 | 9 | 151 | D |
| Tint | 0.00 | SS7 | Tránsito (int) | 11 | 6 | 54 | D |
| STP primario | | | | | 12 | 0.8815 [KMsu/s] | |
| STP respaldo | | | | | 12 | 0.8815 [KMsu/s] | |

Tabla XLVI

Información general y parámetros técnicos reales obtenidos del proceso de dimensionamiento de la red alterna que debe implementar el operador dominante para proveer una capacidad de 28.08 millones de minutos de conversación al mes.

*D = Tecnología digital.

**L= Local, iu = Interurbano = larga distancia, int = Internacional.

| Elemento | Costo [US\$] | Sub-total [US\$] |
|---|---------------|----------------------|
| Conmutadores y STP's | | |
| A1 | 1,296,189.63* | |
| B1 | 1,091,873.33 | |
| C1 | 1,010,089.10 | |
| D1 | 1,210,246.34 | |
| Tab | 4,511,236.82 | |
| Tcd | 4,054,451.31 | |
| Tint | 2,883,028.11 | |
| STP primario | 525,527.59 | |
| STP respaldo | 525,527.59 | 17,108,169.62 |
| Sub-total de la red de telecomunicaciones | | 17,108,169.62 |
| Costos de sustitución, O&M y cambio del TPI (96-98) | | 4,434,437.57 |
| TOTAL** | | 21,542,607.19 |

Tabla XLVII

Costos asociados a la implementación de la red alterna del operador dominante con capacidad de interconexión triplicada.

*Estos costos involucran conmutación, señalización SS7 y sistemas de transmisión.

**El costo total no incluye el arrendamiento de los canales vía satélite.

Como puede apreciarse en la tabla XLVII, la inversión total necesaria para triplicar la capacidad de interconexión aumenta 1.22 veces con respecto al costo de inversión requerido para proveer capacidad simple de interconexión (ver tabla XLV). Esto hace que la *inversión real anualizada* aumente a US\$ 9,178,955.27 (con tres canales vía satélite) y por consiguiente el costo promedio de un minuto de conversación descienda a US\$ 0.027240 (2.73 centavos de dólar).

Entonces con la implementación de la red alterna con capacidad triplicada de interconexión, y tomando los costos promedio de un minuto de conversación, el operador dominante puede tomar dos decisiones:

- a. Ofrecer al operador interconectante la capacidad requerida (9.36 millones de minutos al mes) a un costo por minuto de conversación de 8.18 centavos de dólar y así quedarse con 18.72 millones de minutos de conversación al mes de capacidad adicional para su propia red sin costo alguno.
- b. O bien ofrecer al operador interconectante tres veces la capacidad requerida a un costo de 2.73 centavos de dólar por minuto de conversación.

Es importante hacer notar que el operador dominante está vendiendo determinada capacidad de comunicación al operador interconectante independientemente de la utilización que este último le dé a la misma (los costos promedio por minuto de conversación se utilizan de referencia, pues el interconectante tendrá que pagar una tarifa mensual al operador dominante).

Al terminar el período de amortización de la inversión (si y solo si no se dan cambios en los requerimientos en el transcurso de este período), el operador dominante tendrá que evaluar nuevamente las condiciones de operación de su red con respecto a la del interconectante para modificar las tarifas por concepto de interconexión.

4.2 Interconexión a una red con capacidad de reserva

En esta sección se considera que la red dominante posee las características técnicas y económicas expuestas para el modelo ficticio inicial (ver tablas XXX y XLI) y que el requerimiento de interconexión es el mismo que se utilizó en la sección 4.1, a saber, una capacidad necesaria de 9.36 millones de minutos de conversación al mes con relaciones entrante/saliente local e internacional, vistas por el interconectante, de 1/6 y 10 respectivamente. También, se considera que la forma de interconectar las dos redes de conmutación es igual a la expuesta en la figura 16 y para el caso de la red de señalización SS7, el operador dominante establece rutas entre el operador interconectante y cada uno de los STP's existentes en su red.

De las consideraciones anteriores se aprecia una gran semejanza entre este escenario y el expuesto en la sección 4.1, sin embargo, la diferencia radica en el hecho de que en este caso la política del operador dominante es realizar una ampliación en su red original (ver tabla XLVIII) y no desarrollar una red alterna como se hizo en la sección 4.1.

| Commutador | Número de abonados N_{abo} | Tráfico por abonado A_{abo} [Erl] | Señalización | Tipo | Enlaces | | | Tec |
|------------|---------------------------------|--|--------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------------|-----|
| | | | | | Sistemas digitales de voz | Enlaces SS7 | Procesador [KBHCA] | |
| A1 | 30,000 | 0.102 | SS7 | Local | 146 | 2 | 600 | D* |
| B1 | 15,000 | 0.085 | SS7 | Local | 82 | 2 | 151 | D |
| C1 | 10,000 | 0.070 | SS7 | Local | 43 | 2 | 54 | D |
| D1 | 25,000 | 0.100 | SS7 | Local | 130 | 2 | 151 | D |
| Tab | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 34 | 4 | 54 | D |
| Tcd | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 33 | 4 | 54 | D |
| Tint | 0 | 0.000 | SS7 | Tránsito (int) | 24 | 4 | 54 | D |

Tabla XLVIII

Información general y parámetros técnicos de los conmutadores de la red original del operador dominante.

*D = Tecnología digital.

**L= Local, iu = Interurbano = larga distancia, int = Internacional.

La distribución porcentual de intereses de comunicación entre conmutadores, tomando en cuenta al operador interconectante (Itx), se presenta en la tabla XLIX.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|---|---|------|---|---|------|---|---|------|---|---|-----|---|---|---|---|
| A | 27.4 | 0 | 0 | 18.6 | 0 | 0 | 15.6 | 0 | 0 | 31.2 | 0 | 0 | 2.6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 3.5 | 0 | 0 | 21.3 | 0 | 0 | 5.8 | 0 | 0 | 30.2 | 0 | 0 | 3.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 24.1 | 0 | 0 | 22.2 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 15.4 | 0 | 0 | 3.7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 4.0 | 0 | 0 | 17.8 | 0 | 0 | 17.6 | 0 | 0 | 23.4 | 0 | 0 | 2.6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Itx | 35.7 | 0 | 0 | 17.9 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 29.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla XLIX

Nueva distribución porcentual de intereses de comunicación entre el operador dominante (que proyecta una ampliación por interconexión) y el nuevo operador de telecomunicaciones (Itx).

Los parámetros técnicos y el resumen de costos de la red dominante con las ampliaciones requeridas se resumen en las tablas L y LI, respectivamente.

| Conmutador o STP | Número de abonados <i>N_{ab}</i> | Tráfico por abonado <i>A_{ab}</i> [Erl] | Señalización | Tipo | Enlaces | | | Téc |
|------------------|---|--|--------------|--------------------|---------------------------|-------------|--------------------|-----|
| | | | | | Sistemas digitales de voz | Enlaces SS7 | Procesador [KBHCA] | |
| A1 | 30,000 | 0.1047 | SS7 | Local | 167 | 2 | 600 | D* |
| B1 | 15,000 | 0.0877 | SS7 | Local | 85 | 2 | 181 | D |
| C1 | 10,000 | 0.0727 | SS7 | Local | 47 | 2 | 54 | D |
| D1 | 25,000 | 0.1027 | SS7 | Local | 147 | 2 | 151 | D |
| Itx | 13,000 | 0.1000 | SS7 | Interconectante | | | | D |
| Tab | 0 | 0.0000 | SS7 | Tránsito (L**, iu) | 101 | 4 | 151 | D |
| Tcd | 0 | 0.0000 | SS7 | Tránsito (L, iu) | 75 | 4 | 54 | D |
| Tint | 0 | 0.0000 | SS7 | Tránsito (int) | 28 | 4 | 54 | D |
| STP primario | | | | | | 9 | 0.5730 | |
| STP respaldo | | | | | | 9 | 0.5730 | |

Tabla L

Información general y parámetros técnicos reales obtenidos del proceso de dimensionamiento (considerando un nuevo tráfico internacional entrante a la red de 676 Erl.) de la red dominante con ampliaciones para proveer interconexión al nuevo operador.

*D = Tecnología digital.

**L= Local, iu = Interurbano = larga distancia, int = Internacional.

| Elemento | Costo [US\$] | Sub-total [US\$] |
|---|---------------|----------------------|
| Conmutadores y STP's | | |
| A1 | 3,144,000.14* | |
| B1 | 1,720,968.44 | |
| C1 | 1,232,081.05 | |
| D1 | 2,218,556.85 | |
| Tab | 3,770,944.80 | |
| Tcd | 3,354,467.54 | |
| Tint | 3,003,531.08 | |
| STP primario | 520,248.38 | |
| STP respaldo | 520,248.38 | 19,485,046.66 |
| Otros componentes | | |
| Red de fibra óptica (anillo) | 504,315.20 | |
| Estación terrena** | 1,400,000.00 | 1,904,315.20 |
| Sub-total de la red de telecomunicaciones | | 21,389,361.86 |
| Costos de sustitución, O&M y cambio del TPI (96-98) | | 5,544,122.59 |
| TOTAL | | 26,933,484.45 |

Tabla LI

Costos de la red dominante con ampliaciones para proveer capacidad de interconexión de 9.36 millones de minutos.

*Estos costos involucran conmutación, señalización SS7 y sistemas de transmisión.

**La estación terrena no incluye el arrendamiento de enlaces vía satélite.

Partiendo de la inversión total que el operador dominante debe realizar para implementar la red con ampliaciones (tabla LI), se encuentra que el *valor real anualizado* de la inversión (aplicando el factor unitario del costo de capital y agregando el arrendamiento de 7 canales vía satélite) asciende a US\$ 11,807,346.36. Utilizando este valor real anualizado de la inversión y el calculado para el modelo original, a saber, de US\$ 11,019,608.30, se calcula el costo incremental promedio a largo plazo (ver ecuación [1.1]) para proveer capacidad de interconexión de 9.36 millones de minutos de conversación al mes, obteniendo que este es igual a US\$ 0.007013 (0.71 centavos de dólar).

Al analizar los valores obtenidos en los diferentes escenarios, se puede apreciar, que en la búsqueda de proveer una capacidad de interconexión de 9.36 millones de minutos de conversación al mes, el costo promedio debido al desarrollo de la red alterna

(triplicando dicha capacidad) es casi cuatro veces mayor que el costo incremental promedio debido a la ampliación de la red existente (proveyendo capacidad exacta de interconexión). Asimismo, este último es menor que un noveno del costo promedio de proveer la capacidad exacta de interconexión a través de una red alterna.

De lo anterior se deduce que para un operador de telecomunicaciones que debe suministrar capacidad de interconexión es preferible realizar ampliaciones en la infraestructura que posee.

Por otro lado, es importante poder determinar el grado de influencia que tienen las diversas variables técnicas y económicas en los costos de inversión, para ello, se hacen diversas modificaciones en las mismas, tomando como referencia el costo de inversión de la red dominante con ampliaciones (tabla LI), obteniendo los resultados expuestos en la tabla LII.

| Tipo de variable | Modificación | Inversión anualizada (US\$) | C_{inc} (Cent. dólar) | % de variación en la Inv* | % de variación en C_{inc} | Detalles |
|------------------|---|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| | Ninguna | 11,807,346.36 | 0.71 | 0.00 | 0.00 | Referencia |
| Económica | Tiempo de vida útil 6 años | 10,496,122.53 | 0.63 | -11.11 | -11.27 | Decrece + |
| Económica | Tiempo de vida útil 4 años | 13,806,187.94 | 0.82 | 16.93 | 15.49 | Aumenta + |
| Económica | Impuestos del 36% | 12,342,344.74 | 0.74 | 4.53 | 4.23 | Aumenta - |
| Económica | Impuestos del 24% | 11,356,821.40 | 0.68 | -3.82 | -4.23 | Decrece - |
| Económica | Costo de capital 18% | 11,478,845.93 | 0.69 | -2.78 | -2.82 | Decrece - |
| Económica | Costo de capital 12% | 12,157,257.70 | 0.73 | 2.96 | 2.82 | Aumenta - |
| Económica | Tiempo de vida útil 6 años y costo de capital 18% | 10,175,738.06 | 0.62 | -13.82 | -12.68 | Decrece + |
| Técnica | Tráfico generado en la red dominante aumenta 20% | 12,420,272.16 | 0.66 | 5.19 | -7.04 | Inv Aumenta - C_{inc} Decrece ± |
| Técnica | Se eliminan los enlaces directos entre conmutadores locales | 15,966,319.64 | 0.61 | 35.22 | -14.08 | Inv Aumenta+ C_{inc} Decrece+ |
| Técnica | Capacidad de interconexión aumentan en un 20% | 12,081,646.07 | 0.79 | 2.32 | 11.27 | Inv Aumenta - C_{inc} Aumenta+ |

Tabla LII

Variaciones del costo de inversión anualizado del operador dominante, debido a cambios en las variables técnicas y económicas que lo definen.

*Inv = Inversión.

Es importante hacer notar que las modificaciones en las variables de entrada, expuestas en la tabla LII, representan un aumento (o disminución) de un 20% en las mismas. Esto se realiza para que la comparación, del grado de influencia que tiene cada variable sobre la inversión anualizada y el costo incremental [C_{inc}], sea válida.

En la columna de detalle, de la tabla LII, se utilizan las palabras "aumenta" o "decrece" acompañadas de un símbolo "+" para representar los cambios de mayor magnitud, "±" para cambios moderados y "-" para aquellos cambios de menor magnitud.

Por otro lado es importante resaltar que en los análisis desarrollados con anterioridad la conexión de los abonados a la red no tiene efecto sobre los costos promedio y sobre los costos incrementales promedio a largo plazo, puesto que un proceso de interconexión es independiente de los usuarios de las redes de telecomunicaciones involucradas, sin embargo, los abonados sí generan externalidades positivas a las redes interconectadas y representan aproximadamente un costo de US\$ 100.00 por línea de abonado sin incluir los medios físicos que los enlazan a sus respectivas redes.

Por último, es necesario aclarar que este trabajo de tesis analiza desde un punto de vista técnico el costo de un minuto de comunicación en una red de telecomunicaciones tomando varios escenarios. Sin embargo, en ningún momento se recomienda una política en particular a seguir en materia de interconexión y tampoco se sugiere que operador (dominante o interconectante) es el responsable de realizar las inversiones en las redes de telecomunicaciones.

CONCLUSIONES

1. Los *costos promedio* determinan el precio mínimo que un operador de telecomunicaciones debe cobrar por la utilización de las facilidades de comunicación que provee, al efectuar un nuevo proyecto, con el fin de recuperar la inversión efectuada en un tiempo igual al de la vida útil de los equipos adquiridos.
2. Los *costos incrementales promedio a largo plazo* establecen, en forma óptima, las cargas (costos) mínimas que un operador de telecomunicaciones debe fijar por motivo de interconexión (o ampliación), basándose en la capacidad requerida para dicho fin.
3. Los *algoritmos económicos*, en combinación con la *ingeniería del teletráfico*, establecen los requerimientos óptimos, en cuanto a equipo de conmutación se refiere, para satisfacer cualquier necesidad de comunicación.
4. Los *costos incrementales promedio a largo plazo* representan un castigo para aquellos operadores de telecomunicaciones ineficientes, que agregan más capacidad de la necesaria en cualquier proyecto, puesto que estos costos disminuirán debido a las economías de escala, de tal forma que si estos operadores venden la capacidad requerida al costo incremental promedio, no cubrirían sus gastos.

5. Al analizar el desarrollo de una red capaz de cursar 9.36* millones de minutos de conversación al mes, se obtiene que su costo promedio supera más de nueve veces al costo incremental promedio a largo plazo de ampliar, en esa misma proporción, una red, cuya capacidad base es de 54.252** millones de minutos de conversación al mes.
6. El estudio técnico-económico para implementar una red que provee 28.08*** millones de minutos de conversación al mes, demuestra que los costos promedio decaen 2.4 veces con respecto a los costos promedio de implementar una red que provee únicamente un tercio de esa capacidad.
7. El costo incremental promedio a largo plazo obtenido al agregar 9.36 millones de minutos de conversación al mes a una red cuya capacidad base es de 54.252 millones de minutos de conversación al mes, es casi doce veces menor al costo promedio de proveer dicha capacidad a través de la implementación de una red que soporte hasta 28.08 millones de minutos de conversación al mes.
8. Las variables que más inciden en los costos de inversión de un proyecto de telecomunicaciones y en los costos incrementales promedio a largo plazo de los mismos, en orden de importancia, son las siguientes:
 - ✓ El volumen de tráfico enviado por rutas alternas (tránsito) y
 - ✓ El tiempo de vida útil de los equipos (depreciación).Sin embargo, los costos incrementales promedio a largo plazo, también se ven afectados considerablemente por *las variaciones en la capacidad de interconexión* (o cambios en el volumen de tráfico generado en una red).

* Capacidad de interconexión utilizada en la sección 4.1.1.

** Capacidad base que posee el operador dominante descrito en el capítulo 3.

*** Capacidad de interconexión triplicada, utilizada en la sección 4.1.3.

RECOMENDACIONES

1. Es deseable que los proyectos que realizan los diversos operadores de telecomunicaciones busquen la provisión de capacidades medias o altas de comunicación para poder gozar de economías de escala y así obtener mayores beneficios de las inversiones efectuadas.
2. Para facilitar el proceso de dimensionamiento de redes de telecomunicaciones, pueden utilizarse herramientas de software específicas, que minimicen el tiempo de cálculo y a la vez aumenten la fiabilidad de los resultados. Asimismo, estas herramientas pueden facilitar el análisis de diversas opciones (escenarios) en forma rápida, segura y económica.
3. Es conveniente realizar estudios fiables de la forma en que se distribuyen los intereses de comunicación en las diferentes áreas donde se desarrolla un proyecto de telecomunicaciones, pues de esta forma, se tiene la capacidad de satisfacer mejor las necesidades de comunicación de los usuarios.
4. Los operadores que desarrollan proyectos de ampliación para incrementar la capacidad de comunicación, con fines de brindar interconexión o simplemente para satisfacer el incremento en el volumen de las cargas de tráfico de una red de telecomunicaciones, deben basar sus planes tarifarios en los costos incrementales promedio a largo plazo obtenidos del proyecto, y asimismo, éstos deben ser efectuados eficientemente; es decir, dimensionar los equipos en forma adecuada (sin tener exceso de capacidad) para que los costos incrementales

promedio cubran sus inversiones y permitan establecer tarifas adecuadas a los usuarios.

5. Los operadores que compran capacidad de comunicación, para interconectarse a otras redes de telecomunicaciones, deben de buscar la posibilidad de utilizar toda la capacidad ofrecida por las otras redes, para poder obtener los precios mínimos, en materia de interconexión.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Bridger, Mitchel. Incremental costs of telephone access and local use. *s.d.e.***
2. Brook, Gerald W. "Incremental cost of local usage". 16 de marzo de 1995.
3. Brook, Gerald W. "The Economics of Interconnection". Abril de 1995.
4. "Costos". **Enciclopedia Salvat**. México: Editorial Salvat Mexicana de Ediciones, S.A. de C.V., 1983. Tomo 4.
5. De León Vela, Mario Gilberto. Estudio de las recomendaciones del CCITT hacia la elaboración de la versión nacional de señalización por canal común no. 7. Tesis de Ingeniería Eléctrica, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1992. 126 p.p.
6. **Mina, Ramses R. Introduction to teletraffic engineering**. Chicago: Telephony Publishing Corporation. 120 p.p.
7. Ponce Chavarría, Jacobo Estuardo y Julio César González Saenz. Estudio de la carga de los STP en la red de señalización metropolitana. Guatemala, Empresa Guatemalteca de Telecomunicaciones (GUATEL), 1993. 29 p.p.
8. Stoner, James A. F. y R. Edward Freeman. **Administración**. 5ª ed. México: Prentice hall hispanoamericana, S.A., 1994. Traductor: Arturo Córdova Just. 781 p.p.
9. Sidak, Gregory y Baumol, William. **Toward Competition in Local Telephony**. The MIT press. 169 p.p.
10. Vogelsang, Ingo y Bridger, Mitchel. **Telecommunications Competition, The Last Ten Miles**. The MIT Press. 1997. 364 p.p.
11. Vogelsang, Ingo y Bridger, Mitchel. **Telecommunication Pricing, Theory and Practice**. Cambridge University Press. 1991. 307 p.p.

