



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE UNA RED DE NÚCLEO CENTRALIZADA A UNA
DISTRIBUIDA EN COMUNICACIONES MÓVILES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

JUAN JAVIER SALIM ABUHADBA CHEHADE

**PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO JOFRÉ CÁCERES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NÉSTOR BECERRA YOMA
JUAN PÉREZ RETAMALES**

**SANTIAGO DE CHILE
Abril de 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: JUAN JAVIER SALIM ABUHADBA CHEHADE
FECHA: 20/04/10
PROF. GUÍA: ALEJANDRO JOFRÉ CÁCERES

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE UNA RED NÚCLEO CENTRALIZADA A UNA DISTRIBUIDA EN COMUNICACIONES MÓVILES

El objetivo del presente trabajo de título es construir dos modelos de planificación de la infraestructura de núcleo de redes de telefonía móvil en el caso chileno. Luego, analizar los resultados y determinar la dependencia de estos con la topología y demografía del país.

El problema consiste en determinar la localización óptima de los MSC (*Mobile Switching Center*), en el caso centralizado. Y de los MGW (*Media Gateway*) y MGC (*Media Gateway Controller*) en el distribuido. Los objetivos del estudio consisten en: minimizar los costos de inversión y operación en un horizonte de planificación definido; se cumplan todas las restricciones técnicas y de calidad de servicio; y se satisfaga la demanda en dicho período.

Se enmarca el trabajo definiendo los conjuntos, parámetros y variables necesarios. Luego, utilizando datos del caso chileno y estructuras de diseño de redes, se plantean los modelos de optimización y planificación conjunta.

El modelo de minimización de costos da como resultado 7 MSC para el caso centralizado; y de 1 MGC en Santiago con 14 MGW en el distribuido, siendo este último el de menor costo. Al analizar la solución se desprende que el principal factor que determina la capacidad total de los equipos a utilizar es la relación que existe entre el precio de los enlaces y los costos marginales de conmutación. Estos son mucho más bajos en el modelo distribuido que en el centralizado, lo que explica la gran diferencia en la instalación de conmutadores en ambos problemas. En cuanto a la ubicación de los nodos el parámetro más incidente es el intercambio de tráfico que es generado y tiene por destino la misma zona. Este valor actúa como “centro de masa” y al verificar los pesos relativos de cada sector con los resultados se confirma su repercusión, especialmente en el sistema distribuido.

Respecto a los efectos de las particularidades de la red chilena, se aprecia que la demografía provoca una gran concentración de equipos en Santiago. A su vez, la topología repercute en los modelos al preferir Chillán en desmedro de Concepción para ubicar conmutadores. Al forzar el uso de esta última zona se observa un gasto adicional en enlaces debido a su ubicación. Sin embargo, la diferencia de costos no es significativa.

Se concluye que el caso distribuido es ampliamente superior al centralizado debido a que el costo es un 37% menor, y además, en el óptimo se dispone de una capacidad de conmutación extra de 963 E1 a la demandada, por lo tanto, existe holgura en cuanto a su uso futuro o en otras aplicaciones.

Para trabajos posteriores, suponiendo que se disponga de mayor poder computacional, se propone extender el modelo a la capa de acceso. Además, se sugiere reestructurar el estudio para realizar la optimización utilizando distintas tecnologías o redes preexistentes.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. Contexto	8
1.2. Motivación	8
1.3. Alcances	9
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivos generales.....	10
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. Metodología	11
1.6. Estructura del documento.....	12
Capítulo 2. Revisión bibliográfica	14
2.1. Clasificación de redes.....	14
2.1.1. Capa de núcleo.....	15
2.1.2. Capa de distribución	16
2.1.3. Capa de Acceso.....	16
2.2. Protocolos de Señalización o <i>Call Setup</i>	17
2.2.1. H.323	17
2.2.2. MGCP	20
2.3. Conceptos y arquitectura de las redes NGN.....	22
2.3.1. Exigencias en la infraestructura de una red NGN	22
2.3.2. Arquitectura de una red NGN	23
2.4. Plataforma MPLS	24
2.5. UMTS.....	28

2.6.	Conceptos de optimización	33
2.6.1.	Problemas de localización de plantas	33
2.6.2.	Grafos y redes	35
2.7.	Descripción del problema.....	39
2.7.1.	Entradas	43
2.7.2.	Restricciones.....	43
2.7.3.	Recursos.....	44
2.7.4.	Salidas.....	44
Capítulo 3.	Implementación	46
3.1.	Problema de localización con conmutadores centralizados	46
3.1.1.	Conjuntos.....	46
3.1.2.	Parámetros	47
3.1.3.	Variables	47
3.1.4.	Restricciones.....	48
3.1.5.	Función objetivo	50
3.2.	Problema de localización con conmutadores distribuidos	51
3.2.1.	Conjuntos.....	51
3.2.2.	Parámetros	52
3.2.3.	Variables	52
3.2.4.	Restricciones.....	53
3.2.5.	Función objetivo	55
3.3.	Preparación de datos.....	56
3.3.1.	Estimación de la demanda	56
3.3.2.	Costos de enlaces	58

3.3.3.	Características de equipos.....	59
3.4.	Implementación computacional de los modelos de optimización.....	60
Capítulo 4.	Discusión de resultados	62
4.1.	Resultados	62
4.1.	Análisis económico	64
4.1.1.	Costos totales	64
4.1.2.	Costos de conmutación	65
4.2.	Análisis topológico.....	66
4.2.1.	Enlaces entre conmutadores	66
4.2.2.	Enlaces entre zonas primarias.....	67
4.2.3.	Ubicación de los conmutadores	69
4.2.4.	Cantidad de conmutadores instalados.....	72
4.3.	Geográfico y demográfico.....	73
4.4.	Robustez.....	73
4.5.	Posibles mejoras al modelo.....	74
Capítulo 5.	Conclusiones	76
5.1.	Cumplimiento de los objetivos.....	76
5.2.	Opinión personal	77
5.3.	Trabajo futuro.....	78
Capítulo 6.	Bibliografía.....	79
Capítulo 7.	Anexos.....	81
7.1.	ATM.....	81
7.2.	Tecnologías de redes de comunicaciones móviles.....	82
7.2.1.	GSM.....	82

7.2.2. GPRS	83
7.2.3. EDGE.....	83
7.2.4. Transición a la 3era Generación	84
7.2.5. IMT-2000 (3G)	86
7.3. Metodología IDEF-0.	88
7.4. Teoría de pronóstico.....	89
7.4.1. Requisitos básicos de un pronóstico	89
7.4.2. Cómo comenzar con un pronóstico	90
7.5. Tráfico MGC - MGW	91
Apéndice A: Lista de acrónimos	93
Apéndice B: Tablas de datos	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo jerárquico de Cisco	15
Figura 2: Protocolo H.323	20
Figura 3: Protocolo MGCP.....	22
Figura 4:Arquitectura de redes NGN	24
Figura 5: MPLS	25
Figura 6: Plataforma UMTS	29
Figura 7: Modelo de localización y cobertura	35
Figura 8: Ejemplo de un grafo.....	36
Figura 9: Problema de transporte.....	38
Figura 10: Problema de maximización de flujo	39
Figura 11: Diagrama de una plataforma de telecomunicaciones.....	41
Figura 12: Sistema IDEF-0 ajustado a la problemática de esta memoria.....	42
Figura 13: Conjuntos del problema centralizado.....	47
Figura 14: Variables de enlace del problemas centralizado	48
Figura 15: Conjuntos del problema distribuido.....	51
Figura 16: Variables de enlace del problema distribuido	53
Figura 17: Distribución del tráfico total	56
Figura 18: Diagrama de bloques de los programas de optimización.....	61
Figura 19: Conmutadores instalados por año en cada caso	63
Figura 20: Costos totales de ambos modelos.....	64
Figura 21: Flujos de los equipos.....	64
Figura 22: Flujos de los enlaces	65
Figura 23: Gráfico de costos marginales de conmutación en el caso centralizado ..	65

Figura 24: Gráfico de costos marginales de conmutación en el caso distribuido.....	66
Figura 25: Ejemplo de interconexión 1	67
Figura 26: Ejemplo de interconexión 2	68
Figura 27: Ejemplo de cadenas de nodos	69
Figura 28: Composición del tráfico “intrazona”	70
Figura 29: Ejemplo de interconexión 3	70
Figura 30: Preponderancia de cada zona según tráfico "intrazona"	71
Figura 31: Manejo de tráfico de salida	75
Figura 32: Encabezado MPLS	81
Figura 33: Transiciones posibles entre 2G y 3G.	85
Figura 34: Esquema básico de un sistema IDEF-0.....	89
Figura 35: Iniciación de llamada MEGACO	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Capacidades totales de conmutadores por zona primaria [Erlangs].....	62
Tabla 2: Características básicas de los sistemas GSM, GPRS y UMTS	86
Tabla 3: Tráficos totales en minutos por año	98
Tabla 4: Distribución de tráfico por zona geográfica	98
Tabla 5: Distancias camineras entre zonas primarias [Km]	100
Tabla 6: Tasas y razones de conversión	101
Tabla 7: Costos de enlaces.....	101
Tabla 8: Características de equipos de telecomunicaciones caso centralizado	102
Tabla 9: Características de equipos de telecomunicaciones caso distribuido	102

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Las telecomunicaciones cada vez adquieren mayor importancia en la vida diaria de un ciudadano común. Éstas, con mayor penetración cada año, se utilizan en aplicaciones ya sea laborales, sociales, informativas, comunicacionales, etc. Incluso servicios de telecomunicaciones han llegado a ser indispensables en situaciones donde antes no eran necesarios. Un ejemplo de esto es internet que hoy es fundamental en mercados como el correo, la publicidad, el manejo de fondos monetarios, etc.

Con el tiempo se ha demostrado que la demanda por servicios de telecomunicaciones tiene una curva ascendente por largos períodos de tiempo. Y, en la mayoría de los casos, la demanda por estos servicios llega finalmente a un punto de saturación. Además, con el desarrollo de nuevos servicios de telecomunicaciones, los mismos usuarios demandan, al pasar el tiempo y con creciente intensidad, nuevas aplicaciones, productos y servicios.

1.2. Motivación

Debido a que la demanda de servicios de telecomunicaciones está en constante aumento, y además los usuarios requieren de nuevos servicios, las redes de telecomunicaciones existentes necesitan aumentar su capacidad e implementar nuevas tecnologías periódicamente. Por este motivo, cada cierto tiempo las empresas de telecomunicaciones deben efectuar enormes inversiones en infraestructura, plataformas y gestión.

Como el nivel de inversión es muy alto, es muy importante construir una red de telecomunicaciones en forma óptima. Para de esta forma poder definir esquemas de tarificación justos y eficientes para los usuarios finales y para el proveedor del servicio.

Luego, es necesaria la acción de un planificador del diseño de la red antes de realizar dicha inversión. El planificador debe ser capaz de entregar sugerencias sobre la topología de red, las tecnologías a utilizar, la ubicación y capacidad de equipos y nodos de la red, tipos de enlaces que se necesitan, alimentación, encaminamiento, señalización, etc.

1.3. Alcances

En la planificación de redes de telecomunicaciones, los planes se dividen en dos tipos, los planes técnicos y los planes de desarrollo. Los planes de desarrollo guardan relación con los objetivos que tiene la red en el largo, mediano y corto plazo; esto incluye estrategias no inmediatas y por lo tanto pensadas a futuro, así como necesidades inmediatas que puede tener la red en un momento dado. Los planes técnicos, en cambio, están más ligados a la manera en cómo hacer funcionar la red, cómo diseñarla y construirla de manera de que funcione en la forma adecuada; para esto se definen estándares y reglas.

En el contexto de esta memoria, se analizan solo los planes de desarrollo para dos modelos de núcleo de red diferentes: el caso de conmutadores centralizados, y el caso de conmutadores distribuidos para redes de telefonía móvil. Un conmutador interconecta dos o más segmentos de red pasando datos de un segmento a otro. En el caso centralizado las funciones de conmutación las realiza un solo dispositivo, mientras en el caso distribuido las tareas de conmutación se reparten en dos capas de equipos: una para el transporte de la información y la otra para tareas de control y direccionamiento.

El modelo se utilizará sobre la topología de las redes de telecomunicaciones desplegadas actualmente en Chile. Por lo tanto, los parámetros del modelo serán datos reales de: los costos unitarios de inversión, de operación, de los equipos y de la transmisión, las capacidades de los equipos, la demanda de tráfico estimada, la matriz de distancias camineras entre los puntos de acceso y las posibles ubicaciones de los conmutadores.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Con el desarrollo de este proyecto se plantean dos modelos de planificación de la infraestructura del núcleo de la red para una red de telefonía móvil. Buscando la localización óptima de los *Mobile Switching Center*, de ahora en adelante MSC, en el caso centralizado. Y de los MGW (*Media Gateways*) y MGC (*Media Gateway Controllers*) en el caso distribuido, a modo de minimizar los costos de inversión y de operación, en ambos casos, en un horizonte de planificación de 5 años. Cumpliendo con todas las restricciones técnicas y de calidad de servicio, y además satisfaciendo la demanda en dicho período.

En definitiva, este trabajo busca obtener la información necesaria para realizar un análisis comparativo de una red de núcleo distribuido frente a una de núcleo centralizado, considerando que ambos modelos apuntan a satisfacer la misma demanda y calidad de servicio. Para esta comparación se utilizará como principal factor los costos totales de implementación de cada tipo de red.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar elementos comunes de conmutación necesarios para describir en forma general el núcleo de cualquier red de telecomunicaciones de telefonía móvil.
- Formular un esquema que describa de manera general un problema de planificación del núcleo de red para una plataforma de telecomunicaciones cualquiera, definiendo los parámetros de red y los criterios más relevantes de éste.
- Plantear modelos de optimización para la planificación del núcleo de la red, en sistemas de núcleo centralizado y en sistemas de núcleo distribuido.
- Reunir los datos y parámetros específicos del problema de optimización del caso chileno. Estos corresponden a: los costos unitarios de inversión, de operación, de los equipos y de la transmisión, las capacidades de los equipos, la demanda de tráfico estimada, la matriz de distancias camineras entre los puntos de acceso y las posibles ubicaciones de los conmutadores.

- Programar ambos problemas en alguna plataforma computacional, que permita incorporar librerías que resuelvan problemas de optimización.
- Analizar los resultados desde el punto de vista económico y topológico, teniendo en consideración la forma geográfica y demográfica de Chile y cómo influye ésta en los resultados.

1.5. Metodología

La forma en que se procede a realizar el trabajo de esta memoria se describe en los siguientes puntos:

- Revisión técnica: Se estudiarán los conceptos necesarios para comprender cabalmente los detalles técnicos del problema. Por ejemplo: las diferencias entre arquitecturas de núcleo centralizado y distribuido; planificación a demanda máxima; las funcionalidades y principales características de los equipos que componen la red.
- Ordenar y entender datos: Recopilar y comprender los datos necesarios para resolver la problemática de esta memoria.
- Planteamiento del problema: Modelar matemáticamente los casos de núcleo distribuido y centralizado. Este punto es la piedra angular de esta memoria, ya que los resultados finales estarán directamente ligados al grado de realismo y a los supuestos que se tomen en cuenta para realizar este modelo.
- Resolver el problema: Definir el formato de los datos y cargarlos computacionalmente. Conjuntamente, definir en qué plataforma se resolverá el problema para luego proceder a programar los modelos de optimización. Finalmente definir el formato de las salidas que tendrá el programa.
- Análisis de los resultados: Detectar que impacto produce el cambio tecnológico. Analizar que alternativa resulta económicamente más atractiva. Estudiar la dependencia de los resultados con las características topológicas y demográficas de Chile.

1.6. Estructura del documento

El presente documento corresponde a la estructura del trabajo de Memoria de Título para optar al grado de Ingeniero Civil Electricista. Las descripciones de los ocho capítulos que lo componen son las que siguen:

1. **Introducción:** En este capítulo se realiza una breve descripción de la situación actual del escenario de las telecomunicaciones, siendo ésta lo que motiva el desarrollo del trabajo. También, se definen el alcance y los objetivos generales y específicos, que explican hasta dónde y cuáles son los resultados que se esperan. Del mismo modo, se incluye una reseña de lo que contiene cada capítulo.
2. **Antecedentes:** Se presentan las materias necesarias para la comprensión total del documento. Entre ellas se cuenta: la clasificación de redes basada en el modelo jerárquico de Cisco, los protocolos de señalización o *call setup*, la explicación del concepto y arquitectura de las *Next Generation Networks*, descripción de las principales plataformas que comúnmente conforman las redes NGN como MPLS, y los conceptos de optimización generales necesarios para abordar el problema. Finalmente se enmarca el problema en el formato estándar IDEF-0.
3. **Implementación:** Se dará a conocer el modelo de planificación tanto para el caso centralizado como distribuido definiendo las variables, los parámetros, los conjuntos de las variables, las restricciones y la función objetivo, para formalizar el problema de optimización como tal. Se presenta la información necesaria para estos modelos y cómo ésta debe ser tratada. Finalmente una caracterización de las herramientas que se utilizan en el proceso de planificación, exponiendo cuáles serán las salidas y entradas del programa de optimización.
4. **Análisis de resultados:** Se presentarán las características principales de las redes resultantes. Y según la topología de éstas en cada caso se realizan análisis sobre los resultados obtenidos. Además, se dará cuenta de la evaluación económica de la implementación de ambas redes. Finalmente, se analizan casos específicos que se corresponden con las particularidades de la red chilena.

5. **Conclusiones:** Basado en la discusión realizada, se plantean las conclusiones que ésta permite obtener. En ella, además, se repasa cada uno de los objetivos planteados y se explicita hasta qué punto fueron cumplidos.
6. **Referencias Bibliográficas:** Se listan los libros, memorias y tesis doctorales, publicaciones y páginas web utilizados en el desarrollo del trabajo.
7. **Definiciones y Acrónimos:** Se presentan una serie de definiciones de términos específicos al área de telecomunicaciones, además del significado de las abreviaciones que aparecen a los largo del documento.
8. **Anexos y Tablas:** En este capítulo se entrega información complementaria a la presentada en el capítulo de antecedentes, la cual permite profundizar aún más en estas materias y, por ende, ayudar con la comprensión del documento. Algunos de los temas que se tratarán son: descripción del sistema ATM, plataforma UMTS y tanto a la teoría de pronóstico como a los procesos de la metodología IDEF.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se presentarán los elementos más importantes en lo que a redes de telecomunicaciones se refiere, además se explican casos típicos de optimización que guardan relación con la problemática de esta memoria.

Primero se muestra la clasificación de las redes de telecomunicaciones en tres etapas siguiendo el “modelo jerárquico de Cisco” (1). Luego se describen los protocolos de señalización H.323 y MGCP. Se explica su funcionamiento y componentes principales en cada caso (2). Se define el concepto y se presentan las principales características de las redes de nueva generación o NGN. Se da una breve descripción de la plataforma MPLS (1).

Por último, se revisan algunos conceptos de optimización necesarios para abordar el problema planteado. Se mostraran los formatos estándares de problemas de localización (3) y teoría de grafos y flujos (4).

2.1. Clasificación de redes

Existen diversas maneras de clasificar las redes de telecomunicaciones. A través de su funcionalidad, de su cercanía al usuario final, de los servicios que presta, de los protocolos utilizados, etc.

En este documento, las redes de telecomunicaciones se dividirán de manera jerárquica en tres grupos o capas:

- La capa de núcleo: Se caracteriza por tener grandes equipos de conmutación que enrutan millones de paquetes de manera confiable y rápida, y así comunican a cientos de miles de usuarios, y servicios de éstos, con sus destinos.
- La capa de distribución: Tiene como principal objetivo comunicar las redes del núcleo con la red de acceso. Normalmente se conforma por sub-redes punto a punto.

- Las redes de acceso: Se preocupan de llegar desde los puntos de distribución, pertenecientes al proveedor de servicios, hasta el lugar donde se sitúa el usuario final.

Esta clasificación se llama “modelo jerárquico de Cisco” (*Cisco Hierarchical Model*), se utiliza para ordenar las redes en capas y da un orden para la planificación y la gestión de las redes. En cada una de estas capas se definen tareas claras que cada una debe cumplir. Este modelo ayuda en la práctica a asegurar que las redes sean más confiables, escalables, flexibles y simplificadas.

En la Figura 1 se muestra la estructura generalizada del modelo.

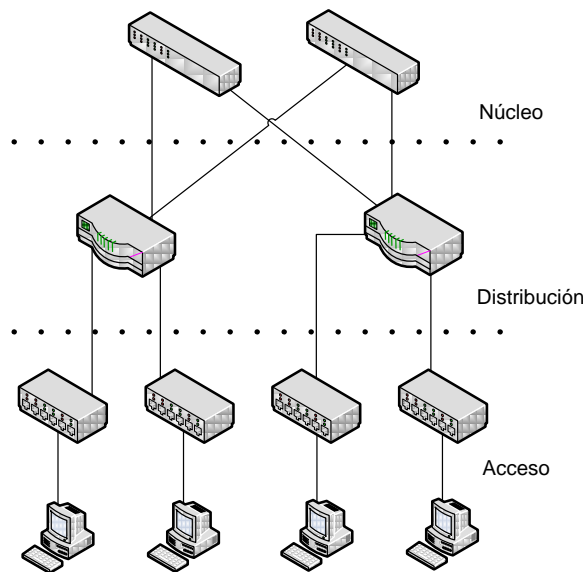


Figura 1: Modelo jerárquico de Cisco

A continuación se describen estas tres capas en detalle:

2.1.1. Capa de núcleo

Las redes de núcleo, normalmente llamadas *core* o *backbone*, tienen la función de transportar grandes cantidades de tráfico de forma rápida y confiable. Este tráfico puede provenir de diversas áreas de una ciudad, provincia y/o país.

Las principales consideraciones que se debe tener al dimensionar los equipos de esta capa son:

- Gran tasa de transferencia de datos.

- Redundancia en las conexiones que transportan el tráfico, para tener una alta confiabilidad.
- Baja latencia, se necesita conmutar los paquetes a gran velocidad.
- Crecer sólo reemplazando equipos por otros de mayor velocidad.

El núcleo de las redes de telefonía enfrenta un fuerte crecimiento en la actualidad y hacia el futuro, por lo que se requiere una gran expansión de capacidad y por lo tanto una gran inversión.

2.1.2. Capa de distribución

La capa de distribución actúa como intermediaria entre la capa de acceso y la capa de núcleo. Normalmente, en una red bien diseñada, en esta capa se encuentran las funciones de ruteo y los demás servicios de red, así como el control de tráfico y la señalización. Esta capa sirve a una gran cantidad de propósitos, incluyendo la implementación de seguridad a través de listas de acceso y filtros.

2.1.3. Capa de Acceso

La capa de acceso actúa como el punto de conexión con la red de usuarios finales, utilizando *switches* o *hubs*.

Los usuarios así como los servicios a los que estos necesitan acceder con más frecuencia, están disponibles a nivel local. El tráfico hacia y desde recursos locales disponibles está confinado entre los proveedores de servicios, *switches* y usuarios finales.

En la capa de acceso podemos encontrar múltiples grupos de usuarios con sus correspondientes demandas. En muchas redes no es posible proporcionar a los usuarios un acceso local a todos los servicios, como archivos de bases de datos, almacenamiento centralizado o acceso telefónico al *Web*. En estos casos, el tráfico de usuarios que demandan estos servicios se desvía a la siguiente capa del modelo: la capa de distribución.

2.2. Protocolos de Señalización o *Call Setup*

Los protocolos de señalización son utilizados para intercambiar la información necesaria para establecer y disolver la comunicación. Estos protocolos actúan sobre los protocolos TCP o UDP.

Permiten simular todos los pasos de la señalización de la Red Telefónica Pública Conmutada necesarios para establecer y deshacer las comunicaciones.

Los protocolos de señalización administran funciones como:

- Mapeo de los números telefónicos con las direcciones IP.
- Generación de tonos de invitación a marcar y señales de ocupado.
- Señal de alerta del llamado.
- Descuelgue.
- Disolución de la llamada.

2.2.1. H.323

Este protocolo es realmente una familia de estándares, basados en la telefonía, para multimedia, incluyendo voz y videoconferencias. Especifica mecanismos para el establecimiento, supervisión y disolución de los flujos de información, incluyendo los flujos de información de audio, entre dos terminales que cumplan H.323 en formato punto a punto¹.

Es un protocolo monolítico, es decir que contiene todo lo necesario para funcionar. Esto tiene sus ventajas y desventajas. Su principal ventaja es su robustez en cuanto a su funcionalidad; en contraparte es poco flexible, de adaptación lenta a nuevas tecnologías y el

¹ Es decir, una red que no tiene servidores fijos, sino una serie de nodos que se comportan simultáneamente como clientes y servidores.

costo de su robustez se paga con un alto costo en *overhead*²: una sesión incluye gran cantidad de *handshakes*³ y datos intercambiados para ejecutar cada función.

Es un conjunto de normas que especifican componentes, protocolos y procedimientos para soportar comunicaciones multimedia sobre redes de conmutación por paquetes. Cubre varios sub-protocolos que tienen que ver con el establecimiento de las llamadas y la señalización a través de redes LAN y WAN.

Los diferentes protocolos a que se refiere la recomendación H.323 son usados en las diferentes fases de la comunicación. Así por ejemplo, en la primera fase, en que el abonado llamante inicia la comunicación, se utilizan los protocolos de registro, admisión y estatus (RAS) que especifica la recomendación H. 225.0.

La señalización entre los terminales se hace de acuerdo a las especificaciones Q.931 y H.225.0, es decir, estos protocolos se encargan de el establecimiento, control y finalización de una llamada.

El control de la sesión, que incluye la negociación entre terminales para decidir el CODEC⁴ que se utilizará durante el flujo RTP⁵, el intercambio de mensajes para control de flujo y otras funciones de control de sesión, se hace siguiendo las especificaciones H.245

Se distinguen cuatro componentes principales:

- Terminal: Corresponden a los dispositivos extremos de red capaces de proveer comunicaciones en tiempo real y *full-duplex* (bidireccionales). Un terminal puede estar constituido por un simple teléfono IP o un computador con software con funcionalidad

² En español: cabecera o encabezado. Se refiere a la información suplementaria situada al principio de un bloque de información que va a ser almacenado o transmitido y que contiene indicaciones necesarias para el correcto tratamiento del bloque de información.

³ Es un proceso automatizado de negociación que fija dinámicamente parámetros de un canal de comunicaciones establecido entre dos entidades antes de la comunicación normal.

⁴ CODEC es una abreviatura de Codificador-Decodificador. Éstos pueden codificar un flujo de datos, para transportarlo o reducir su tamaño, y recuperarlo para su reproducción o manipulación en un formato adecuado.

⁵ *Real-Time Transport Protocol*: Es un protocolo de nivel de sesión utilizado para la transmisión de información en tiempo real, como por ejemplo audio y vídeo en una video-conferencia. Actúa sobre UDP.

dades H.323. Estos dispositivos deben soportar software *Call Setup*, protocolo RTP, CODECs y *stack* TCP/IP⁶. Como opción pueden disponer de software para comunicaciones de video.

- **Gatekeeper:** Cuando esta entidad está presente, todo dispositivo H.323 debe registrarse en ella antes de iniciar la comunicación con otro dispositivo H.323. El registro se realiza utilizando protocolo RAS, basado en UDP⁷, el que es parte de la especificación H.225. Desde el punto de vista lógico, el Gatekeeper está separado de los terminales H.323, pero sus funciones pueden cohabitar en el Gateway y en el MCU. En nomenclatura H.323 el Gatekeeper es el controlador de llamadas. Tiene asignadas varias funciones como control de admisión de los usuarios, traducción de número telefónico a dirección IP⁸, gestión de Ancho de Banda, gestión de zona, etc.
- **Gateway:** Esta entidad provee varias funciones, entre las cuales la más importante es la traducción entre terminales H.323 y otros tipos de terminales. Así por ejemplo tiene la funcionalidad para la comunicación de terminales telefónicos IP con terminales telefónicos tradicionales ubicados en la Red Telefónica Pública Conmutada.
- **Multipoint Control Unit (MCU):** Soporta en forma centralizada las capacidades de conferencia que tienen tres o más extremos que establecen una conferencia y maneja las negociaciones entre los terminales para determinar las capacidades comunes. Las funcionalidades MCU pueden residir en un teléfono IP o estar incluida en cualquier otro componente H.323. MCU tiene dos partes principales: *Multipoint Contro-*

⁶ La familia de protocolos de Internet es un conjunto de protocolos de red en la que se basa Internet y que permiten la transmisión de datos entre redes de computadoras. En ocasiones se le denomina conjunto de protocolos TCP/IP, en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen: Protocolo de Control de Transmisión (TCP) y Protocolo de Internet (IP).

⁷ *User Datagram Protocol* (UDP) es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas. Permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. Tampoco tiene confirmación ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco se sabe si ha llegado correctamente, ya que no hay confirmación de entrega o recepción.

⁸ *Internet Protocol* (IP) es un protocolo no orientado a conexión usado tanto por el origen como por el destino para la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados.

ller (MC), que maneja las funciones de control de llamada y *Multipoint Processor* (MP) que maneja el procesamiento de audio, video y transmisión de datos.

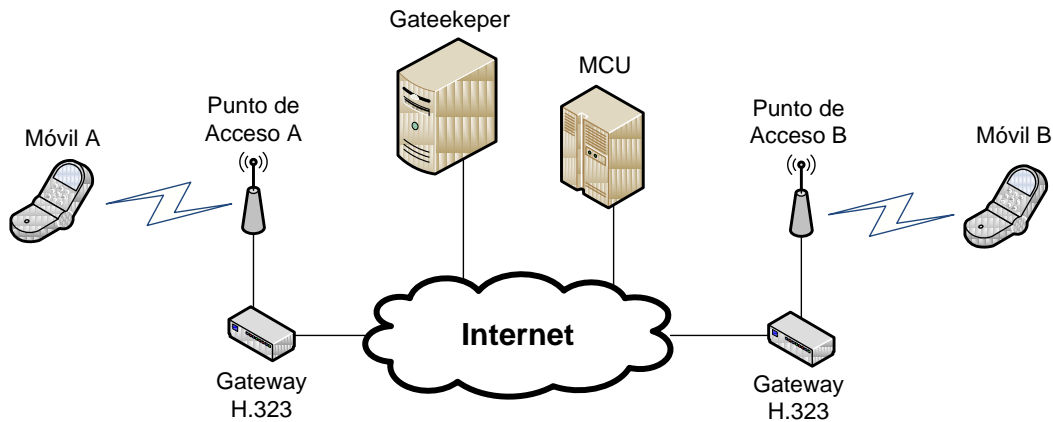


Figura 2: Protocolo H.323

2.2.2. MGCP

En el protocolo *Media Gateway Control Protocol*, de ahora en adelante MGCP, se resuelve el problema de señalización y traducción de información en entidades separadas. Es decir, en resumidas cuentas divide las funciones que realiza un Gateway H.323 en dos unidades separadas: *Media Gateway Controller* (MGC) y *Media Gateway* (MGW).

MGCP, es el protocolo para la comunicación entre MGC y MGW. Permite controlar y administrar externamente dispositivos que cumplen la función *Media Gateway*. No es alternativa de SIP⁹ ni de H.323. En realidad SIP y H.323 proveen el control de la comunicación. MGCP puede ínter operar con H.323 y SIP para crear conexiones entre *Media Gateways*, permitiendo una conexión extremo-extremo a través de redes disímiles.

En resumen, los dispositivos que conforman una red que utiliza MGCP son:

⁹ *Session Initiation Protocol*, estándar basado en IP y desarrollado por la IETF para la iniciación, modificación y finalización de sesiones.

- MGW: Actúa como traductor entre redes de telecomunicaciones dispares como PSTN¹⁰; SS7¹¹; *Next Generation Networks*; redes de acceso por radio 2G, 2.5G y 3G o PBX¹².
- MGC: Servidor que controla uno o más MGW, en modalidad cliente-servidor. Recibe información de señalización desde el *Media Gateway*, para luego hacer que éste envíe la señal de llamada a donde corresponda, para enviar y recibir datos de voz.
- *Signaling Gateway* (SG): Componente de red que se encarga de traducir mensajes de señalización entre nodos de un Canal Común de Señalización (en inglés *Common Channel Signaling*, CCS) que se comunican utilizando distintos protocolos de señalización. Gracias a esta entidad es posible traducir mensajes SS7 a SIGTRAN¹³, y viceversa.

¹⁰ La red telefónica pública conmutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*) es una red con conmutación de circuitos tradicional optimizada para comunicaciones de voz en tiempo real.

¹¹ SS7: Protocolo de señalización utilizado en la Red Telefónica Conmutada Pública.

¹² Un PBX (siglas en inglés de *Private Branch Exchange*), es cualquier central telefónica conectada directamente a la red pública de teléfono por medio de líneas troncales para gestionar, además de las llamadas internas, las entrantes y/o salientes con autonomía sobre cualquier otra central telefónica.

¹³ *SIGnalling TRANsport*, tradicionalmente conocido como SIGTRAN es un protocolo que permite transportar las señalizaciones SS7 por redes IP, de esta forma los mensajes pueden ser interpretados correctamente por un MGC.

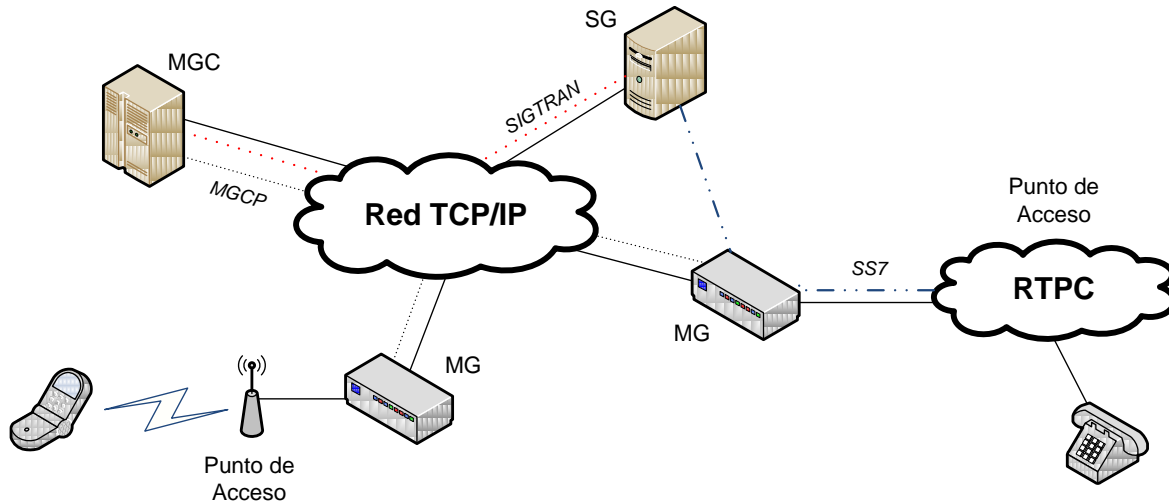


Figura 3: Protocolo MGCP

2.3. Conceptos y arquitectura de las redes NGN

Esta sección está centrada en el estudio de la función, definición y arquitectura de las redes NGN. En un comienzo se presenta una definición generalizada de estas redes, para luego enumerar los requisitos y elementos que se consideran indispensables para esta arquitectura. Finalmente, se plantean las exigencias que deben tener estas redes en cuanto a los elementos que componen su infraestructura.

Las redes NGN se utilizan para el transporte y conmutación de datos a alta velocidad, y son capaces de soportar un gran número de aplicaciones y servicios. Ya sean de voz, fax, datos y/o vídeo, realizados de forma integrada y utilizando una única red basada en conmutación de paquetes IP. Estas redes multiservicio son una evolución de las redes IP mayoritariamente implementadas hasta ahora, ya que permiten entregar servicios diferenciados según las necesidades de calidad de servicio de las aplicaciones de los clientes. Además soportan cualquier medio de acceso, ya sea móvil o fijo, y cualquier tecnología que se base en una arquitectura de datos.

2.3.1. Exigencias en la infraestructura de una red NGN

Los elementos y características que definen una red como NGN son los siguientes:

- Los sistemas de transmisión deben ser de última generación y basados en tecnologías ópticas DWDM¹⁴.
- La red debe disponer de políticas de QoS¹⁵ efectivas y totalmente operativas.
- Seguridad tanto a nivel de red como de cliente.
- La estructura de red debe ser escalable, de modo que permita evoluciones futuras de manera gradual.

2.3.2. Arquitectura de una red NGN

Estas redes pueden dividirse en capas para entender su funcionamiento, y por consiguiente comprender su arquitectura. Estas capas son:

- Aplicaciones y servicios: Es el conjunto de servidores de aplicaciones y/o servicios complementarios que utiliza la red.
- Control y transporte: Esta capa tiene la función de conmutar grandes cantidades de información entre usuarios, y con aplicaciones. Es en gran parte el núcleo de la red.
- Acceso: Esta capa engloba todos los medios por los cuales se puede acceder a la red.

En la Figura 4 se muestra la arquitectura típica de una red NGN:

¹⁴ DWDM es el acrónimo, en inglés, de *Dense wavelength Division Multiplexing*, que significa Multiplexación por división en longitudes de onda densas. DWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm).

¹⁵ QoS o Calidad de Servicio (*Quality of Service*, en inglés) son las tecnologías que garantizan la transmisión de cierta cantidad de datos en un tiempo dado (*throughput*). Calidad de servicio es la capacidad de brindar un buen servicio. Es especialmente importante para ciertas aplicaciones tales como la transmisión de video o voz.

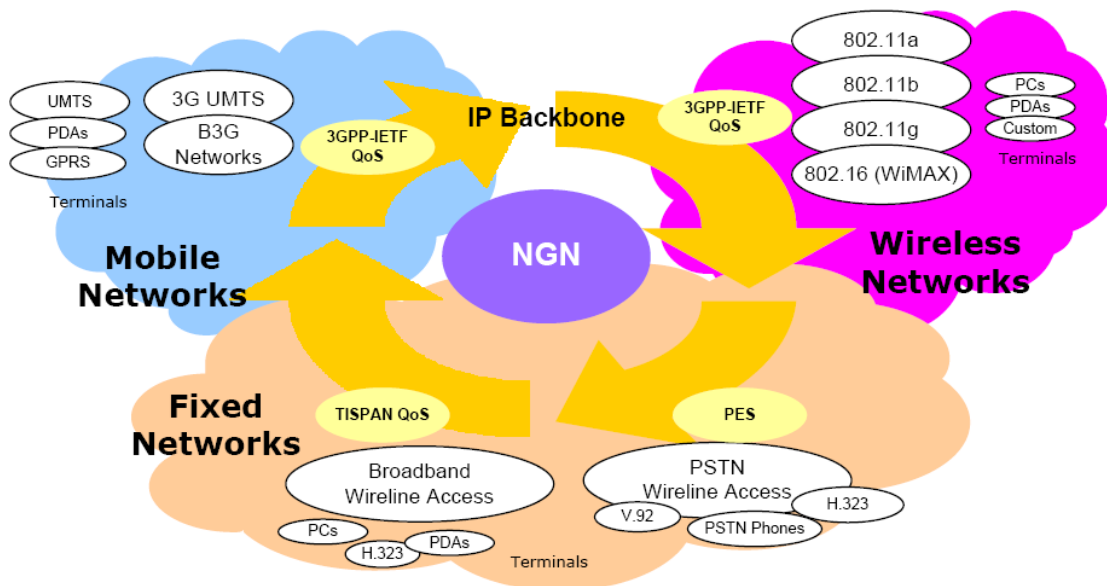


Figura 4:Arquitectura de redes NGN

(Fuente: http://www.ist-vital.eu/related_publications/Vital_white_paper_on_NGN&IMS.pdf)

2.4. Plataforma MPLS

Multiprotocol Label Switching, de ahora en adelante MPLS, es un mecanismo de transporte de datos estándar creado por la IETF¹⁶. Opera entre la capa de enlace de datos y la capa de red del modelo OSI¹⁷. Fue diseñado para unificar el servicio de transporte de datos para las redes basadas en circuitos y las basadas en paquetes. Puede ser utilizado para transportar diferentes tipos de tráfico, incluyendo tráfico de voz y de paquetes IP.

MPLS es una red privada IP utilizada normalmente en el núcleo de la red y que combina la flexibilidad de las comunicaciones punto a punto y la fiabilidad, calidad y segu-

¹⁶ El IETF (*Internet Engineering Task Force*, en castellano Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet) es una organización internacional abierta de normalización, que tiene como objetivos el contribuir a la ingeniería de Internet, actuando en diversas áreas, tales como transporte, encaminamiento, seguridad.

¹⁷ El modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) fue el estándar de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) lanzado en 1984. Es decir, fue un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.

idad de los servicios Redes Privadas Virtuales (en inglés *Virtual Private Network*, VPN), *Frame Relay*¹⁸ o *Asynchronous Transfer Mode*¹⁹ (ATM).

Esta plataforma ofrece niveles de rendimiento diferenciados y de priorización de tráfico, así como aplicaciones de voz y multimedia, y todo esto en una red única.

Este tipo de plataformas se compone de un conjunto de *Label Switching Routers*, de ahora en adelante LSRs. Estos elementos son conmutadores etiquetas de paquetes. Los LSRs situados en el borde del canal de comunicación se denominan *Label Edge Routers* (LERs), y se llama *Label Switched Path* (LSP) al túnel unidireccional que se utiliza para la comunicación MPLS.

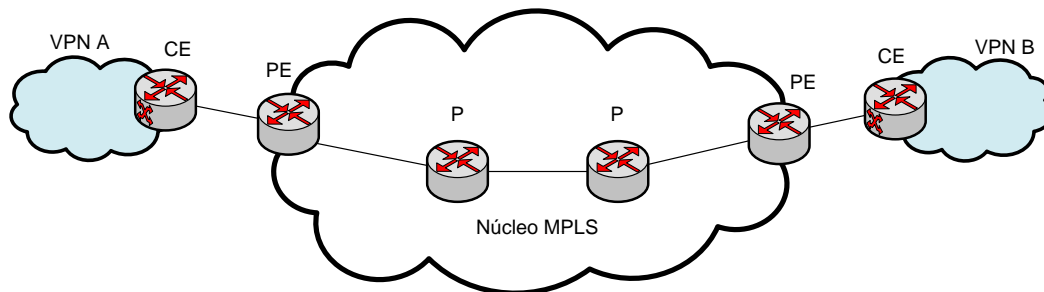


Figura 5: MPLS

Una de las características principales de MPLS es que la concatenación de múltiples LSPs permite, de manera muy simple, la creación de VPNs, lo que a su vez facilita la administración de la red, la seguridad para los clientes, la distribución óptima de recursos de red y la función de aislamiento, que permite que una empresa contrate una VPN para conectar dos o más sucursales distanciadas, simulando una conexión directa entre éstas, con garantías de calidad de servicio y con una privacidad absoluta.

¹⁸ Consiste en una tecnología simplificada de conmutación de paquetes que admite una variedad de tamaños de tramas o marcos para datos. Es perfecto para la transmisión de grandes cantidades de datos. Se utiliza para un servicio de transmisión de voz y datos a alta velocidad que permite la interconexión de redes de área local separadas geográficamente a un coste menor.

¹⁹ En este tipo de comunicación la información no es transmitida y conmutada a través de canales asignados en permanencia, sino en forma de cortos paquetes de longitud constante y que pueden ser enrutados individualmente mediante el uso de canales virtuales y trayectos virtuales. De esta forma de múltiples entradas asíncronas con tasas de transferencia variable se puede obtener una única salida de tasa constante.

En resumen, MPLS permite la tan anhelada convergencia de voz, video y datos en una misma plataforma y además soporta la utilización de múltiples protocolos de capa de enlace, ATM, *Frame Relay*, Ethernet, etc.

A continuación se presentan las principales características y ventajas de MPLS, que explican por qué MPLS es una tendencia tecnológica mundial.

- **Flexibilidad:** La topología de una MPLS VPN puede acomodarse acorde a cada necesidad, dada su naturaleza que brinda conexiones "Any-to-Any" entre los distintos puntos que comprenden la VPN, contando así con el mejor camino o ruta entre cada punto.
- **Escalabilidad:** Cada vez que se necesite incluir un nuevo punto a una VPN, sólo hay que configurar el equipamiento del proveedor de Servicios que conecte este nuevo punto. De esta forma, se evitan tareas complejas y riesgosas, como las que se producen cuando se activa un nuevo punto en una red basada en circuitos virtuales de *Frame Relay* o ATM, en donde es necesario re-configurar todos los puntos involucrados.
- **Accesibilidad:** La arquitectura de MPLS VPN permite utilizar prácticamente todas las tecnologías de acceso para interconectar las oficinas del cliente con el Proveedor de Servicios. Por este motivo, versatilidad que esta red permite al conectarse redes pequeñas, así como redes grandes, permite cada punto de la VPN acorde a sus necesidades, sin restringir la de los demás.
- **Calidad de servicio (QoS) y Clases de servicio (CoS):** Mediante la utilización de técnicas y herramientas de Calidad de Servicio se ofrecen distintas clases de servicio dentro de una MPLS VPN para cumplir con los requerimientos de cada servicio o aplicación. Esto permite la convergencia de datos, con aplicaciones de voz y video interactivas, y la transmisión de video de alta calidad.

- **Monitoreo y SLA²⁰:** Las MPLS VPN son monitoreadas, controladas y con un constante seguimiento en forma permanente por parte del proveedor de servicios. Además, se extienden SLA para garantizar y asegurar la estabilidad y rendimiento que el cliente necesite.
- **Fácil Migración:** La simplicidad de la tecnología determina que las tareas de aprovisionamiento, administración y mantenimiento sean actividades sencillas para el proveedor de servicios, obteniendo una migración del servicio actual sin complicaciones.
- **Seguridad:** Los niveles de seguridad entregados por una MPLS VPN son comparables con los entregados por los circuitos virtuales de *Frame Relay* y ATM. Sin embargo, en aplicaciones donde estos niveles no son suficientes, como por ejemplo en transacciones financieras, una MPLS VPN puede también ser combinada con la encriptación y autenticación de IPSec²¹, elevando aún más la seguridad de la VPN.
- **Bajo Costo:** Es posible afirmar que un servicio MPLS VPN reduce los costos de la red, ya que esta red es independiente del CPE²² y por lo tanto no requiere de la instalación de un hardware específico ni costoso, y además al ser una red que soporta múltiples clases de servicios, se puede unificar los servicios de voz, video y datos en esta estructura de red única, reduciendo los costos significativamente ya que se puede aprovechar al máximo las capacidades de ésta.

²⁰ Un acuerdo de nivel de servicio o *Service Level Agreement*, también conocido por las siglas ANS o SLA, es un contrato escrito entre un proveedor de servicio y su cliente con objeto de fijar el nivel acordado para la calidad de dicho servicio.

²¹ Internet Protocol security es un conjunto de protocolos cuya función es asegurar las comunicaciones sobre el Protocolo de Internet (IP) autenticando y/o cifrando cada paquete IP en un flujo de datos.

²² Customer Premises Equipment, en español Equipo Local del Cliente, es un equipo usado tanto en interiores como en exteriores para originar, encaminar o terminar una comunicación.

2.5. UMTS

Universal Mobile Telecommunications System es una tecnología de acceso inalámbrica de 3era Generación que permite la transmisión de voz en tiempo real y transmisión de datos de hasta 2 Mbps. Esta plataforma fue diseñada para poseer total compatibilidad con las redes GSM²³ pudiendo conectarse fácilmente con redes de conmutación de circuitos (MSC), como con redes de conmutación de paquetes IP (SGSN).

Esta plataforma se compone principalmente de cuatro Dominios:

- Dominio Central (*Core Network*, CN): La función principal de la red *Core* es proveer enrutamiento, conmutación y tránsito para la información de tráfico y señalización de los usuarios, sin embargo también posee las bases de datos de los usuarios, los servidores de gestión de la red y los *gateways* de conexión con redes PDN²⁴, ISDN²⁵ y PSTN. Este dominio se conecta con el dominio AN a través de la interfaz Iu. Esta partición permite que la CN pueda estar conectada con ANs basadas en diferentes tecnologías de acceso, y que la CN pueda estar también basada en diferentes tecnologías.
- Dominio de Red de Acceso (*Access Network*, AN): Es la red de acceso de radio que proporciona la conexión entre los terminales móviles y el *Core Network*. En UMTS recibe el nombre de UTRAN y se compone de una serie de sistemas de red radio o RNCs y una serie de Nodos B dependientes de él. Los Nodos B son los elementos de la red que corresponden a las estaciones bases o antenas.

²³ El Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, proviene de "*Groupe Special Mobile*") es un sistema estándar, completamente definido, para la comunicación mediante teléfonos móviles que incorporan tecnología digital.

²⁴ Una *Public Data Network* es una red creada y operada por una administración pública, o en algunos casos por un organismo privado, con el propósito específico de proporcionar servicios de transmisión de datos para el público.

²⁵ Una Red Digital de Servicios Integrados (RDSI o ISDN en inglés) es una red que procede por evolución de la Red Digital Integrada (RDI) y que facilita conexiones digitales extremo a extremo para proporcionar una amplia gama de servicios, tanto de voz como de otros tipos, y a la que los usuarios acceden a través de un conjunto de interfaces normalizadas.

- Dominio de Equipo Móvil (*Mobile Equipment, ME*): El ME puede subdividirse en dos partes, la Terminación Móvil, que realiza las funciones relacionadas con la transmisión radio, y el Equipo Terminal que contiene las aplicaciones extremo a extremo. Este dominio se conecta con el dominio AN a través de la interfaz Uu.
- Dominio USIM (*User Services Identity Module*): El USIM contiene datos y procedimientos que identifican de forma segura y sin ambigüedad al usuario, y éstos están normalmente incluidos en una tarjeta inteligente. Dicha tarjeta está asociada a un usuario que se puede identificar independientemente del ME usado.

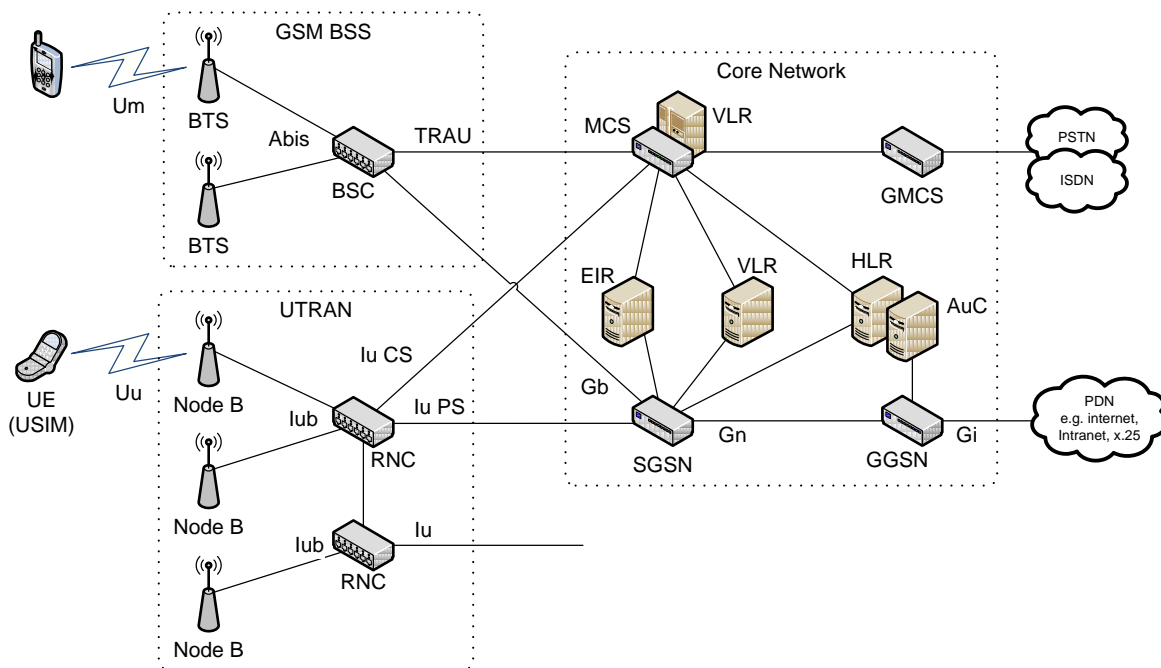


Figura 6: Plataforma UMTS

En la Figura 14 se aprecia un diagrama de la plataforma UMTS.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la arquitectura de red UMTS incorpora la red de acceso GSM y la red UTRAN, y la red central incluye un dominio con conmutación de circuitos (CS) y un dominio con conmutación de paquetes (PS).

A continuación se detalla cada uno de los componentes de la red UMTS.

- *Mobile Station (MS)*: Una MS es un UE y está compuesta por el equipo móvil y la tarjeta de identificación de abonado UMTS (USIM).
- *Base Station System (BSS)*: La Red de Acceso GSM consiste de uno o varios BSSs. El BSS realiza la asignación y liberación de recursos radio para permitir la comunicación con MSs en una cierta área. Un BSS está compuesto de un BSC, y uno o varios BTSs.
- *Base Station Controller (BSC)*: El BSC es la entidad controladora de un BSS y se encarga del control general de los recursos de radio proporcionados por uno o varios BTSs.
- *Base Transceiver Station (BTS)*: Es el componente responsable de la transmisión y recepción de radio hacia y desde MSs en una o más celdas GSM.
- *Radio Network System (RNS)*: La Red de acceso UTRAN está compuesta de uno o varios RNSs. El RNS realiza la asignación y liberación de recursos radio para permitir la comunicación con los MSs en una cierta área. Un RNS está compuesto de un RNC, y uno o varios nodos B.
- *Radio Network Controller (RNC)*: El RNC es la entidad controladora de un RNS y se encarga del control general de los recursos de radio proporcionados por uno o varios nodos B. El RNC es responsable de las decisiones de *handover* que requieren señalización al MS.
- *Node B*: Es el componente responsable de la transmisión y recepción de radio hacia y desde MSs en una o más celdas UMTS. Un nodo B puede soportar el modo FDD, el modo TDD, o una operación en modo dual.
- *Home Location Register (HLR)*: El HLR contiene una base de datos encargada de gestionar a los abonados móviles. Una PLMN puede contener uno o varios HLRs. El HLR almacena información de suscripciones y datos de ubicación que permiten la tasación y encaminamiento de llamadas y mensajes hacia el MSC o el SGSN donde se ha registrado la MS.
- *Visitor Location Register*: El VLR se encarga de controlar el *roaming* de las MSs en un área MSC. Cuando una MS entra en una nueva área de ubicación se comienza un procedimiento de registro. El MSC encargado de dicha área notifica este registro y transfiere

re al VLR la identidad del área de ubicación donde la MS está situada. Si dicha MS no está todavía registrada, el VLR y el HLR intercambian información para permitir el adecuado manejo de las llamadas de esta MS. El VLR puede estar encargado de una o varias áreas MSC.

- *Authentication Centre (AuC)*: El AuC contiene una base de datos que mantiene los datos de cada abonado móvil para permitir la identificación internacional de abonados móviles (IMSI) para poder realizar la autenticación del abonado y para poder cifrar la comunicación por el camino radio entre la MS y la red. El AuC transmite los datos requeridos para la autenticación y cifrado a través del HLR hasta el VLR, MSC y SGSN que necesitan autenticar al abonado móvil. El AuC está asociado a un HLR y almacena claves de identificación para cada abonado móvil registrado en ese HLR.
- *Equipment Identity Register (EIR)*: El EIR contiene una base de datos que mantiene los identificadores internacionales de equipos móviles (IMEI) para controlar el acceso a la red de los equipos móviles.
- *Mobile Switching Centre (MSC)*: El MSC es una central que realiza todas las funciones de señalización y conmutación requeridas para el manejo de servicios CS hacia y desde las MSs localizadas en una determinada área geográfica. La principal diferencia con una central de una red fija es que incorpora funciones para la gestión de la movilidad como los procedimientos para el registro de posición y para el *handover*. Una CN puede estar constituida por uno o varios MSCs.
- *Gateway MSC (GMSC)*: En el caso de llamadas entrantes a una PLMN, la llamada es encaminada hacia un MSC, si la red fija no es capaz de interrogar a un HLR. Este MSC interroga el HLR apropiado y entonces encamina la llamada al MSC donde esté la MS llamada. El MSC que realiza la función de encaminamiento hasta la ubicación de la MS se denomina GMSC.
- *Serving GPRS Support Node (SGSN)*: El SGSN sigue y mantiene la posición de las MSs en su área, y realiza funciones de seguridad y control de acceso. El SGSN establece contextos PDP (*Packet Data Protocol*) activos que son usados para el encaminamiento con el GGSN que el abonado este usando. La función de registro de posición en un SGSN almacena información de suscripciones y datos de ubicación de los abona-

dos registrados en el SGSN para servicios con conmutación de paquetes. Dicha información es necesaria para llevar a cabo la transferencia entrante o saliente de paquetes de datos.

- *Gateway GPRS Support Node (GGSN)*: El GGSN proporciona el funcionamiento con redes externas con conmutación de paquetes. La función de registro de posición en un GGSN, almacena información de suscripciones y datos de encaminamiento para cada abonado que tenga al menos un contexto PDP activo. Dicha información es recibida desde el HLR y el SGSN, y es necesaria para poder establecer un túnel de tráfico de paquetes de datos, destinado a una MS, a través del SGSN donde el MS está registrado. El SGSN y el GGSN poseen funciones de encaminamiento IP, por lo tanto pueden estar interconectados por un *router*²⁶.

Cuando el SGSN y el GGSN están en diferentes PLMN²⁷, ellos utilizan una función de seguridad requerida para la comunicación inter-PLMN (VPN).

En definitiva, en la UTRAN o BSS se tiene es un nodo B o una BTS, que hace las funciones de *switch*²⁸ entre todos los UEs o MSs que tienen a su alcance. Luego se tiene el RNC o BSC que cumple las funciones de gestión de las celdas y decisiones de *handovers*²⁹, y que además juega el papel de un *switch*.

²⁶ El enrutador (del inglés *router*) es un dispositivo de hardware para la interconexión de red de ordenadores que opera en la capa tres (nivel de red). Este dispositivo permite asegurar el enrutamiento de paquetes entre redes o determinar la ruta que debe tomar el paquete de datos.

²⁷ Una *Public Land Mobile Network (PLMN)* es una red que está establecida y gestionada por una administración pública o por un *Recognized Operating Agency (ROA)* con el propósito específico de proporcionar servicios de telecomunicaciones móviles terrestres al público.

²⁸ Un conmutador o *switch* es un dispositivo digital de lógica de interconexión de redes de computadores que opera en la capa 2 (nivel de enlace de datos) del modelo OSI. Su función es interconectar dos o más segmentos de red, de manera similar a los puentes (bridges), pasando datos de un segmento a otro de acuerdo con la dirección MAC de destino de las tramas en la red.

²⁹ Se denomina *Handover* (también *Handoff*) al sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares con el objetivo de transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

La red central contiene entidades de bases de datos, y de gestión de tráfico y llamadas. De manera general, se podría juntar todas las entidades de base de datos (EIR, VLR, HLR y AuC) en un solo servidor, conectado a las otras entidades a través de un *router*, y que posea la funcionalidad de base de datos.

También se puede utilizar un servidor con la funcionalidad de un servidor de acceso, que genere las gestiones de red, que conecte las redes PSTN y PDN con la PLMN, y que tenga una base de datos con la ubicación de cada MS.

2.6. Conceptos de optimización

En este capítulo se describirán algunos problemas tipo, tratados comúnmente en el área de investigación de operaciones. Estos, por separado, resuelven las distintas aristas del problema que se propone resolver en esta memoria.

2.6.1. Problemas de localización de plantas

En esta sección se describen la familia de modelos de optimización, que se denominan problemas de *localización y distribución de plantas*.

Por *instalación* se entiende cualquier servicio público o privado, que requiera de una planta para su funcionamiento. Por *distribución* se comprende la manera en que se asignarán las plantas a los espacios físicos disponibles.

Para localizar nuevas instalaciones, en todos los modelos de optimización se considera una función objetivo de costo, la cual se minimiza. Dicha función es representativa de la distancia y/o el tiempo necesario para hacer fluir bienes o servicios de las nuevas instalaciones a las ya existentes y/o a los clientes.

Los problemas de localización se pueden dividir para su estudio en relación a:

1. *Lo que se quiere localizar*: en problemas de distribución de espacio y problemas de localización.
2. *Las características de las nuevas instalaciones*: en problemas de localización sencilla (una instalación) o múltiple (varias instalaciones), localización de punto

o de área, donde el número de las nuevas instalaciones esta dado o es una variable adicional de decisión y donde la localización es independiente o dependiente de las otras localizaciones.

3. *Las características de las instalaciones existentes:* en problemas de localización estática o dinámica, determinística o probabilística.
4. *La interacción de las diversas instalaciones:* en problemas cualitativos o cuantitativos.
5. *El espacio:* en problemas unidimensionales o multidimensionales, discretos o continuos, restringidos o no restringidos.
6. *La función objetivo:* en problemas cuantitativos o cualitativos y, dentro de los primeros, problemas donde se minimizan funciones de costo y tiempo o se minimizan funciones de costo y tiempo o se minimizan funciones tipo minimax.

A continuación se describirá un modelo de localización que, de acuerdo a las subdivisiones mencionadas anteriormente, reúne las características principales de la problemática de esta memoria.

2.6.1.1. Modelo discreto de localización y de cobertura

Se define el siguiente problema de localización. Sea x_j una variable binaria de decisión que es igual a:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{si una instalación se localiza en el sitio } j \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

y sean $y_{ij} \geq 0$ variables de decisión continua que indican la fracción de demanda i (clientes) que son atendidos por la instalación localizada en el sitio j , $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$.

Se conoce el número de clientes m ; el número de posibles sitios de localización, n ; el costo asociado a la satisfacción de demanda del cliente i por parte de la instalación en el sitio j , c_{ij} ; y el costo fijo, f_j , de establecer una instalación en el sitio j .

Se requiere entonces encontrar x_j y y_{ij} para todo j e i que,

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} y_{ij} + \sum_{j=1}^n f_j x_j$$

$$\begin{aligned}
\text{S.a: } \quad & \sum_{i=1}^m y_{ij} \leq m x_j, \quad j = 1, \dots, n \\
& \sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m \\
& x_j = 0, 1, \quad j = 1, \dots, n \\
& y_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n
\end{aligned}$$

En este problema entero-mixto se debe seleccionar uno o varios sitios entre n alternativas posibles en lugar de escoger el sitio o sitios adecuados en el espacio continuo. Si no existiera el costo fijo f_j , la solución óptima sería establecer una instalación en cada uno de los n sitios. Si no existiera el costo de transporte c_{ij} , la solución óptima sería establecer la instalación en el sitio con menor costo fijo f_j . El problema es interesante, porque la solución óptima debe balancear los costos f_i y c_{ij} .

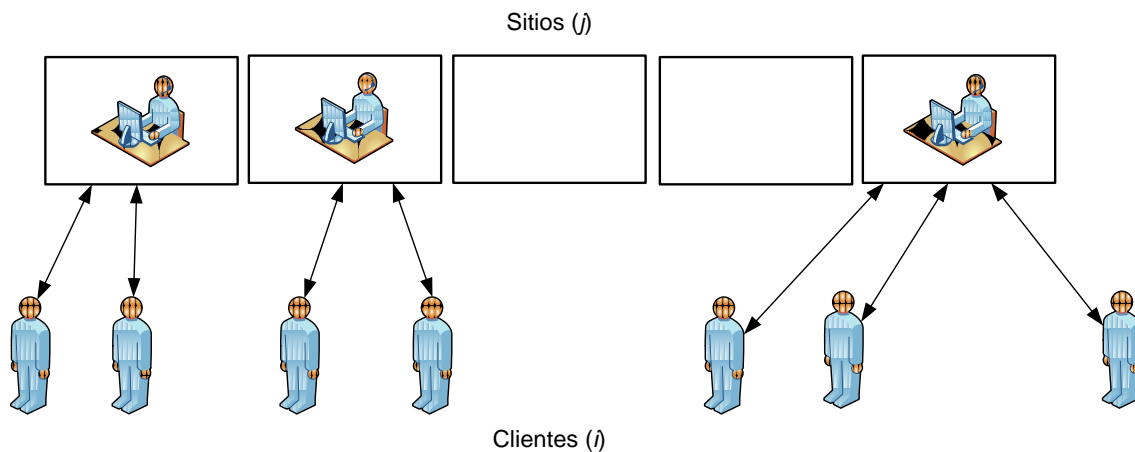


Figura 7: Modelo de localización y cobertura

2.6.2. Grafos y redes

Un *grafo* se define como un conjunto de *nodos* o puntos, y un conjunto de *arcos* que unen ciertos *pares* de nodos. Un ejemplo de grafo se presenta en la Figura 8.

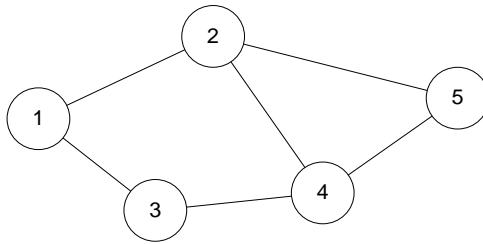


Figura 8: Ejemplo de un grafo

Una *red* es un grafo en cuyos arcos existe un flujo. En este caso los arcos pueden ser *dirigidos* y permitir flujo en una sola dirección.

Para grafos y redes existe la siguiente terminología:

- Una *cadena* entre los nodos j e i de un grafo es una secuencia de arcos que conecta ambos nodos.
- Cuando los arcos de la cadena son dirigidos, ésta se denomina *paso*.
- Un *ciclo* es una cadena que conecta a un nodo con sí mismo.
- Un grafo se dice *conectado* si existe una cadena que une cada par de nodos.
- Un *árbol* es un grafo conectado que no contiene ciclos.

2.6.2.1. Problemas en redes

Existen varios tipos de problemas con estructura lineal que pueden plantearse como problemas en redes. A continuación examinamos algunos de ellos.

a) El problema de transporte

Si se supone un conjunto de centros en los cuales se produce un cierto tipo de producto, un conjunto de lugares donde se consume tal producto y un conjunto de rutas que conectan todos los centros de producción con todos los lugares de consumo. Asociado a cada ruta existe un costo de transporte, que se supone constante y proporcional a las unidades transportadas. Además, son conocidas las producciones en cada centro y la demanda en cada lugar, y se asume que la producción total es igual a la demanda global.

El problema consiste en determinar las cantidades que se enviarán desde cada centro a cada lugar de consumo, de tal manera de minimizar los costos de transporte.

Este problema se puede plantear, fácilmente, como un problema de programación lineal en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min z &= \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \\ \text{S.a:} \quad & \sum_i x_{ij} = d_j \\ & \sum_j x_{ij} = b_i \\ & x_{ij} \geq 0, \forall i, j \end{aligned}$$

donde:

- x_{ij} : cantidad enviada desde el centro i al lugar j
- c_{ij} : costo unitario de transporte por unidad, de i a j
- d_j : demanda en el lugar j
- b_i : producción en el centro i .

Este es un problema de programación lineal que puede resolverse usando cualquiera de los algoritmos Simplex. Sin embargo, es posible especializar tales algoritmos y llegar a una solución en forma mucho más eficiente.

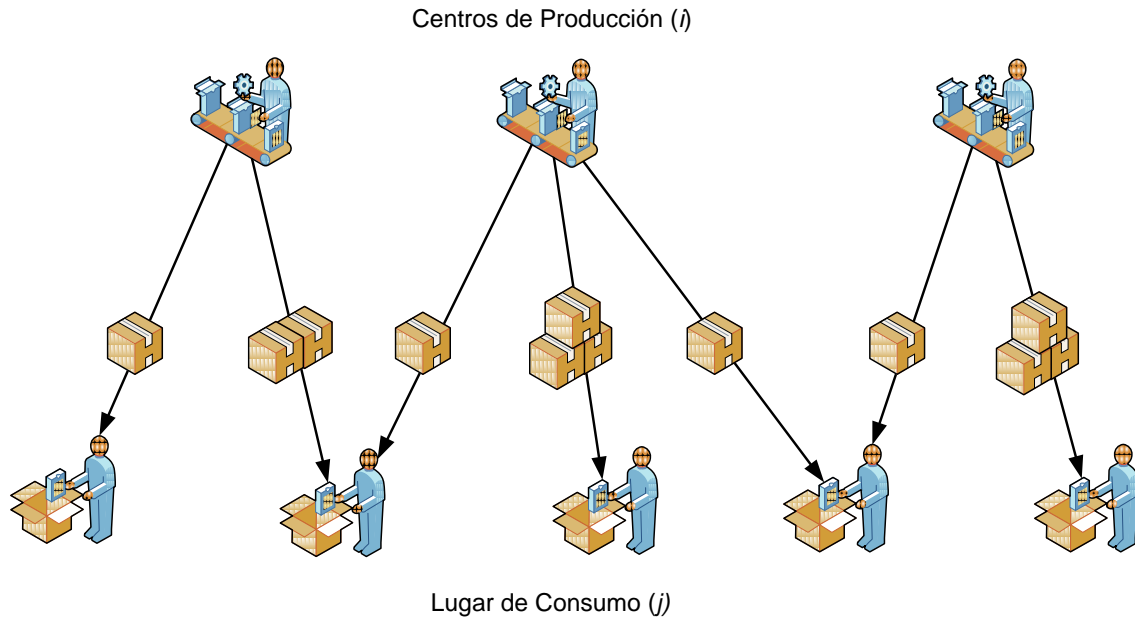


Figura 9: Problema de transporte

b) Problema de maximización de flujo

Se considera una red conectada que tiene un nodo, al cual se designa como origen y otro, al que se llama terminal.

Se asocia a cada arco (i, j) una capacidad c_{ij} , la que representa el flujo máximo que puede pasar en la dirección $i \rightarrow j$. La capacidad puede ser diferente en la dirección $j \rightarrow i$. El problema que se plantea es: determinar el flujo máximo que puede existir entre el nodo inicial y el terminal, respetando las restricciones de capacidad.

Matemáticamente el problema puede plantearse de la siguiente manera.

$$\max F = \sum_k x_{ok} = \sum_k x_{kt}$$

S.a:

$$\sum_i x_{ik} - \sum_j x_{kj} = 0, k \neq o, t$$

$$0 \leq x_{ij} \leq c_{ij}, \forall i, j$$

donde:

x_{ij} : flujo desde i a j

c_{ij} : capacidad del arco (i, j)

o, t : nodos de origen y terminal respectivamente.

El modelo se compone por: la función objetivo, que es la definición del flujo que se intenta maximizar; la primera restricción, que se encarga de la continuidad del flujo en todos los nodos, menos el de origen y terminal; y la segunda restricción, que limita los flujos de los arcos según su capacidad.

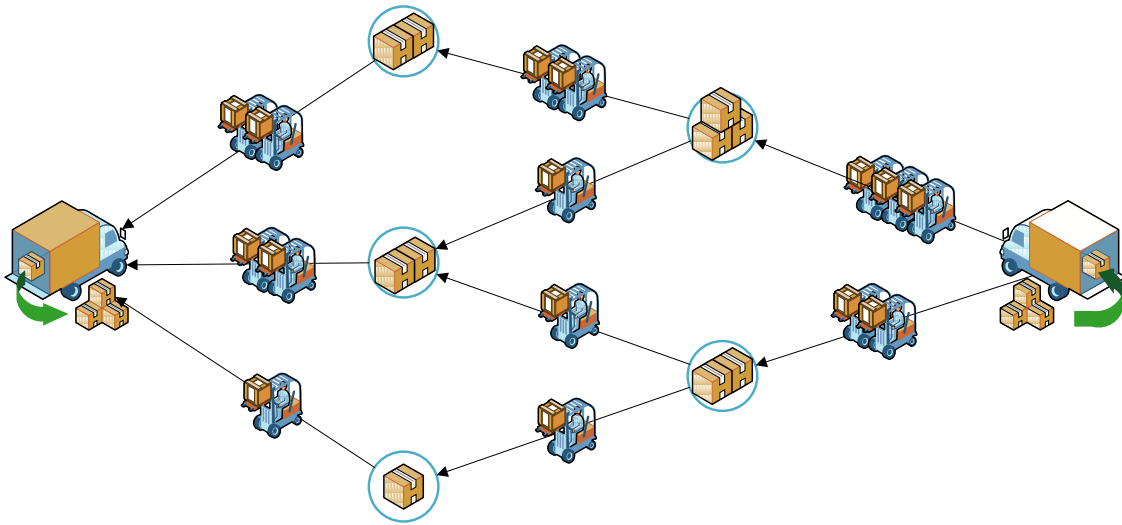


Figura 10: Problema de maximización de flujo

2.7. Descripción del problema

En esta memoria, se analizarán los planes de desarrollo para modelos de núcleo de red diferentes: el caso de conmutadores centralizados, y el caso de conmutadores distribuidos para redes de telefonía móvil.

Los problemas propuestos serán modelados en programas de optimización, de tal forma que se minimicen los costos de inversión y de operación. Cumpliendo con todas las restricciones técnicas y de calidad de servicio, y además satisfaciendo la demanda en un período determinado.

En definitiva, este trabajo busca obtener la información necesaria para realizar un análisis comparativo de una red de núcleo distribuido frente a una de núcleo centralizado.

Para esta comparación se utilizará como principal factor los costos totales de implementación de cada tipo de red.

Para entablar una base sobre la demanda que se asume conocida de antemano (entradas) y la configuración óptima de la red para satisfacer esta demanda (salidas), se realiza un esquema especificando las entradas, restricciones, recursos y salidas que el sistema posee. Este esquema entrega una visión general de las variables involucradas en un problema típico de planificación.

En todos los diagramas mostrados en este documento se utiliza la metodología IDEF-0, especificada en la sección 7.3. La Figura 11 muestra el esquema general planteado para la planificación de una plataforma de telecomunicaciones cualquiera.

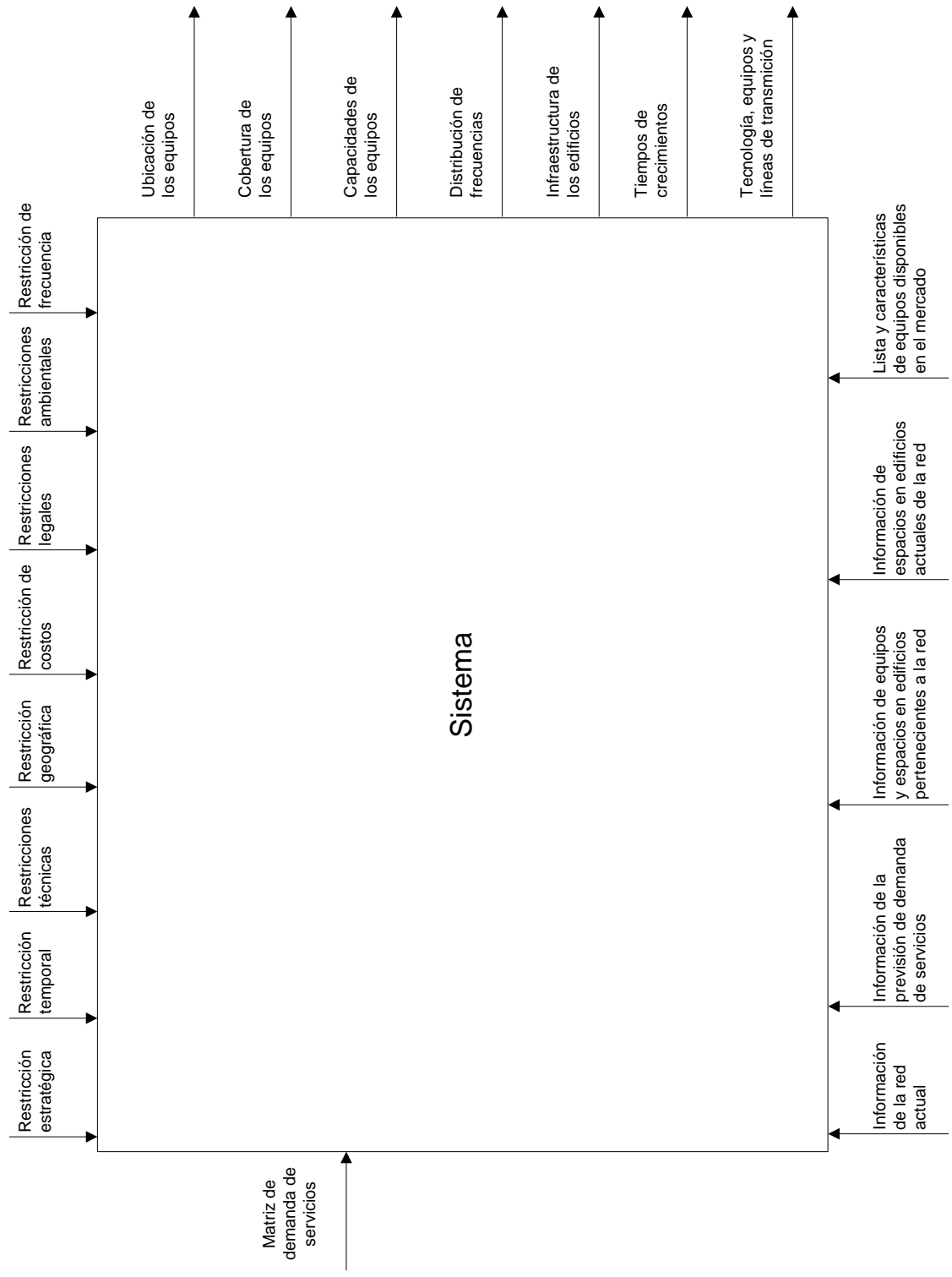


Figura 11: Diagrama de una plataforma de telecomunicaciones

En el diagrama presentado anteriormente, la planificación de plataformas de telecomunicaciones se muestra como un sistema con sus respectivas entradas, salidas, recursos y restricciones, sin embargo ésta se describe internamente a través de un proceso de múltiples etapas en donde cada etapa es compuesta por un subsistema. Estos subsistemas están relacionados entre sí, se encuentran interconectados y retroalimentados de manera que iterativamente se llegue a resultados cada vez más óptimos.

Considerando que los objetivos de esta memoria contemplan la optimización solo del núcleo de red, y además se considera que no existe una red preexistente. El diagrama al que responderán los modelos es una versión reducida del que se muestra en la Figura 11, este diagrama resumido se muestra en la Figura 12.

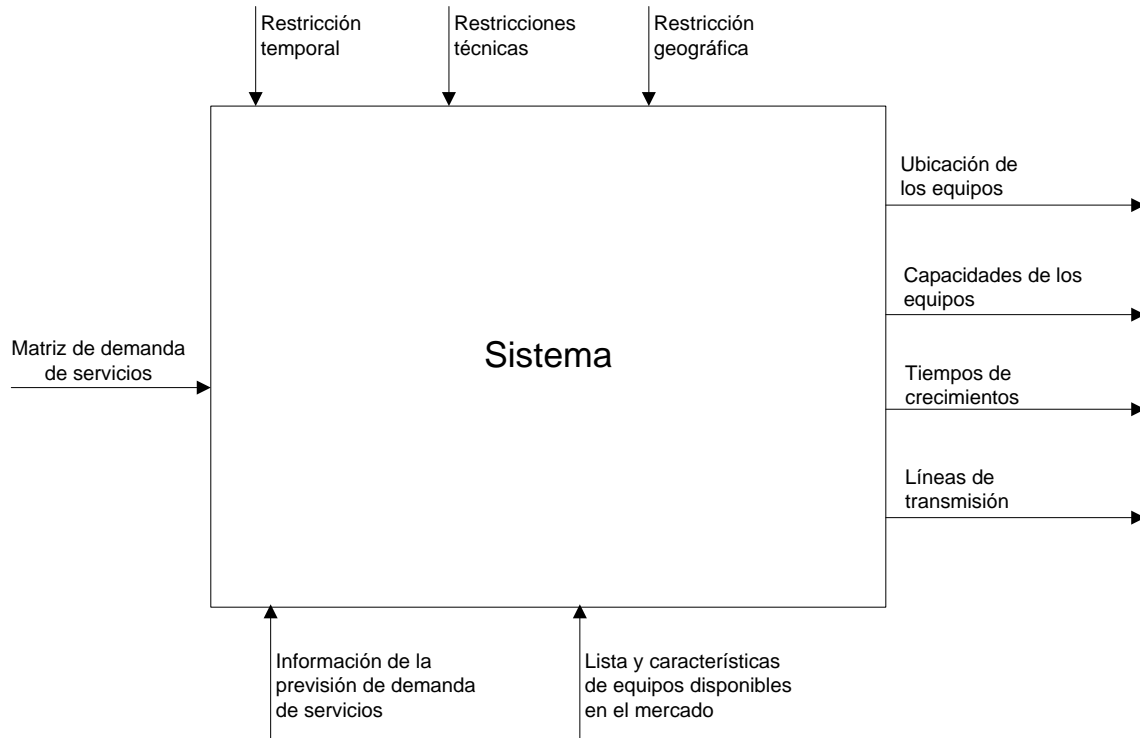


Figura 12: Sistema IDEF-0 ajustado a la problemática de esta memoria

A continuación, se entrega una explicación de cada una de las entidades que intervienen en el diagrama de la Figura 12. En el contexto de la problemática propuesta en esta memoria.

2.7.1. Entradas

2.7.1.1. Matriz de demanda de servicios

La principal entrada de este sistema es la matriz de demanda de servicios de telecomunicaciones. Se trata de una matriz que cubre toda el área de estudio, en la cual se ha dividido la demanda en zonas primarias de consumo. Además, se debe incluir la demanda por tráfico que existe hacia otras redes en cada zona primaria. Para esto se considerarán nodos que representan virtuales centros de demanda, ya que en términos prácticos se comportan de la misma forma.

2.7.2. Restricciones

2.7.2.1. Restricción temporal

La planificación temporal es fundamental para el éxito de un proyecto de telecomunicaciones. En el proceso de planificación, el tiempo juega un papel fundamental debido a que en cada decisión que se tome, se debe considerar el tiempo que demora implementar dicha elección, teniendo cuidado de no sobrepasar el tiempo máximo estipulado para finalizar el proyecto. De esta manera se evita generar retrasos en el desarrollo de éste.

Además, la optimización considerará tiempos de inversión, es decir, se tomará en cuenta el valor presente de los gastos en equipos y líneas. En este sentido el factor temporal adquiere un rol determinante en las ampliaciones de capacidad de la red.

Para el análisis que se llevará a cabo la unidad temporal mínima para realizar ampliaciones a la red será de un año, y la evaluación se realizará en un horizonte de 5 años.

2.7.2.2. Restricciones técnicas

Las restricciones técnicas se refieren a los requerimientos de QoS que se entrega a los usuarios de la red. Según la calidad de servicio se determina la cantidad de canales necesarios para intercambiar una determinada cantidad de tráfico.

El nivel de servicio que entregarán los modelos corresponde a una probabilidad de bloqueo de un 1%. Y para determinar el número de canales, se utilizará el modelo de teoría de colas Erlang-B (5).

2.7.2.3. Restricción geográfica

En este trabajo se consideran como ubicaciones disponibles para la instalación de los equipos sólo las zonas primarias. Esto porque sin ésta restricción el modelo resultaría poco práctico para el análisis y para lograr encontrar una solución, considerando los recursos computacionales disponibles.

2.7.3. Recursos

2.7.3.1. Lista de precios y características de equipos disponibles

El detalle de los equipos a utilizar en el modelo. Sus capacidades y precios. En el caso centralizado estos equipos son los MSC y las puertas que amplían la capacidad de conmutación de los conmutadores; mientras que en el caso distribuido los equipos son los MGW y los MGC.

2.7.3.2. Información de la previsión de demanda de servicios

Método mediante el cual se estimará la demanda que deberán atender las redes por todo el periodo a modelar. Los datos necesarios para la estimación son: la demanda total proyectada para la red en cada año, considerando el tráfico saliente, entrante y el que se trafica dentro de la misma red; y, la proporción en que se distribuye el tráfico entre las zonas primarias.

2.7.4. Salidas

2.7.4.1. Ubicación de los equipos

Esta salida del sistema representa la ubicación física que deben tener los equipos de una cierta capacidad para abastecer una determinada área. El conjunto de ubicaciones posibles se restringe a las zonas primarias de demanda.

2.7.4.2. Capacidades de los equipos

Una de las salidas de este esquema son las capacidades de los equipos, entre las que se encuentran:

- La capacidad de ancho de banda de los enlaces.

- La capacidad de los conmutadores.
- Las ampliaciones de capacidad de los conmutadores.

2.7.4.3. Tiempos de los crecimientos

Además, al considerar la demanda de servicios distribuida en el tiempo, el planificador debe determinar cuándo es el mejor momento para hacer crecer la red, y así satisfacer la nueva demanda. Esta respuesta incorpora la inclusión de nuevos conmutadores, la ampliación de conmutadores preexistentes y el incremento en la capacidad de enlaces.

2.7.4.4. Líneas de transmisión

Esta variable indica cuales enlaces serán utilizados, el tipo de enlace, su origen y destino. El tipo de enlace puede ser de fibra óptica, microondas o satelital. Y las conexiones se pueden realizar entre: MSC – Zona primaria y MSC – MSC en el caso centralizado; y, MGW – Zona primaria, MGW – MGW y MGW – MGC en el caso distribuido.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo detalla los métodos y el desarrollo de los criterios que se deben considerar en la planificación de ambos modelos de núcleos de red. Buscando la consecución de los objetivos específicos propuestos en la sección 1.4.2.

3.1. Problema de localización con conmutadores centralizados

3.1.1. Conjuntos

Conjuntos a utilizar:

- I : Conjunto de locaciones de centros de demanda. Se incluyen nodos virtuales que representan puntos de conexión con el exterior de la red.
- K : Conjunto de potenciales locaciones de conmutadores.
- T : Conjunto de años de la evaluación (1 a 5).
- S : Conjunto de tipos de conmutadores.

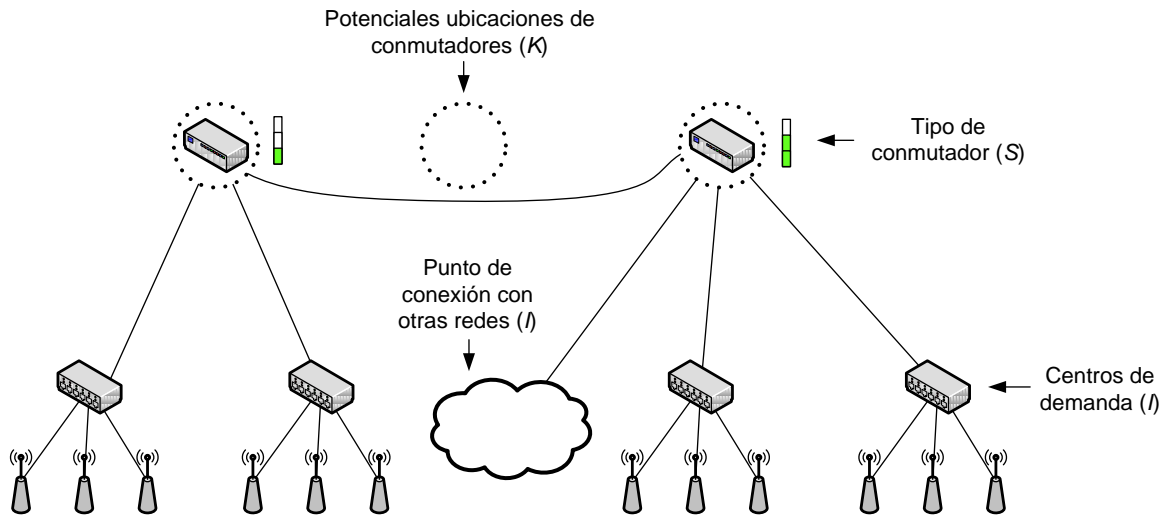


Figura 13: Conjuntos del problema centralizado

3.1.2. Parámetros

Parámetros a utilizar:

- C_{st} : Costo fijo de un conmutador tipo $s \in S$ en el año $t \in T$.
- Cp_t : Costo de agregar una puerta adicional a un conmutador en el año $t \in T$.
- Cc_{ijt} : Costo de arriendo de un circuito entre los nodos $i \in IUK$ y $j \in IUK$ en el año $t \in T$.
- Cd_{it} : Costo de arriendo líneas de distribución en la zona primaria $i \in I$ en el año $t \in T$.
- Dem_{ijt} : Demanda por capacidad de circuitos para transportar tráfico desde el nodo $i \in IUK$ hacia el nodo $j \in IUK$ en el año $t \in T$.
- $CapMax^s$: Capacidad máxima de un conmutador tipo $s \in S$.
- $CapMin^s$: Capacidad mínima de un conmutador tipo $s \in S$.
- P_{kt} : Penalidad de sobrecarga de tráfico en el conmutador $k \in K$ en el año $t \in T$.

3.1.3. Variables

Variables de decisión del problema:

- x_{kjt}^i : Tráfico desde el conmutador $k \in K$ hacia el nodo de demanda $j \in I$, proveniente del nodo de demanda $i \in I$. En el año $t \in T$.
- y_{klt}^i : Tráfico desde el conmutador $k \in K$ hacia el conmutador $l \in K$, proveniente del nodo de demanda $i \in I$. En el año $t \in T$.
- z_{ikt} : Tráfico desde el centro de demanda $i \in I$ hacia el conmutador $k \in K$ en el año $t \in T$.
- NSw_{kt}^s : Número de conmutadores nuevos del tipo $s \in S$ que se instalan en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- Sw_{kt}^s : Número de conmutadores del tipo $s \in S$ en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- Cap_{kt} : Capacidad de los conmutadores que tiene el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- Amp_{kt} : Capacidad en que se amplían los conmutadores ya instalados en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- $Over_{kt}$: Sobrecarga de tráfico que debe soportar el conmutador $k \in K$ en el año $t \in T$.

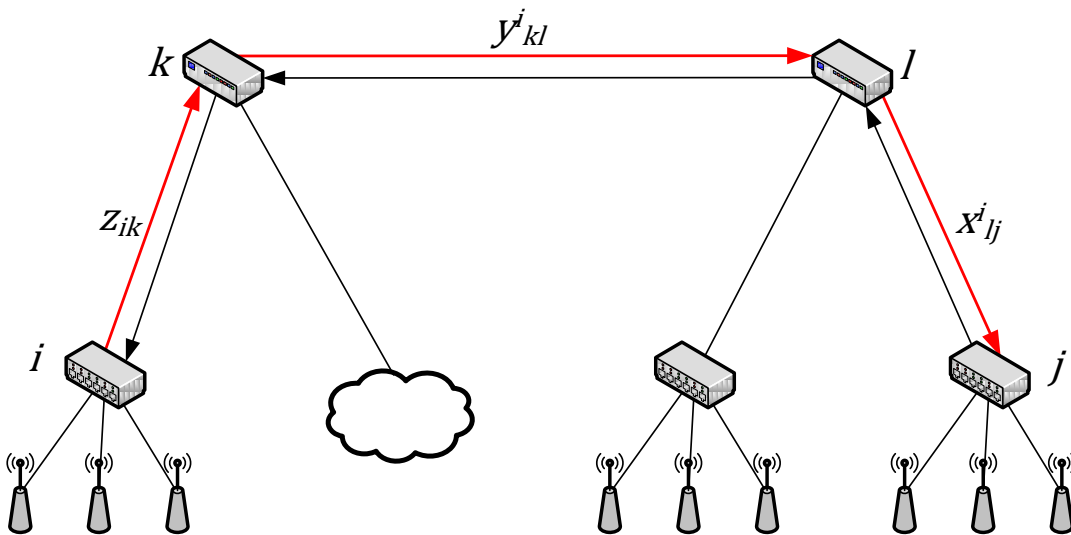


Figura 14: Variables de enlace del problemas centralizado

3.1.4. Restricciones

Restricciones del modelo:

La suma total del tráfico generado en un nodo de demanda $i \in I$ a los conmutadores $k \in K$ a los que está conectado debe ser igual a la demanda por capacidad de circuitos del nodo $i \in I$ para cada año.

$$\sum_{k \in K} z_{ikt} \geq \sum_{j \in I} Dem_{ijt} \quad \forall i \in I; \forall t \in T$$

La suma total de tráfico que llega a un nodo $j \in I$ desde los conmutadores $k \in K$, provenientes de un nodo de origen $i \in I$, debe ser igual a la demanda total de capacidad de circuitos entre $i \in I$ y $j \in I$.

$$\sum_{k \in K} x_{kjt}^i \geq Dem_{ijt} \quad \forall i \in I; \forall j \in I; \forall t \in T$$

La suma total del tráfico que llega a un conmutador $k \in K$, llevando tráfico proveniente del nodo $i \in I$, debe ser igual a la suma del tráfico saliente del conmutador, también llevando tráfico proveniente de $i \in I$.

$$z_{ikt} + \sum_{l \in K} y_{lkt}^i = \sum_{l \in K} y_{klt}^i + \sum_{j \in I} x_{kjt}^i \quad \forall i \in I; \forall k \in K; \forall t \in T$$

No puede llegar tráfico desde un conmutador $k \in K$ al nodo $j \in I$, si no existe tal conmutador.

$$x_{kjt}^i \leq Dem_{ijt} \sum_{s \in S} Sw_{kt}^s \quad \forall i \in I; \forall j \in I; \forall k \in K; \forall t \in T$$

La suma de las capacidades de los conmutadores en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$, debe ser suficiente para atender la demanda.

$$\sum_{i \in I} z_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in K} y_{lkt}^i \leq Cap_{kt} + Over_{kt} \quad \forall k \in K; \forall t \in T$$

La capacidad de los conmutadores en el año $k \in K$ es igual a la capacidad que tenían en el año anterior más las ampliaciones del año $t \in T$ y las adiciones de conmutadores nuevos. Para el año 1 la capacidad del periodo anterior es cero.

$$Cap_{kt} = Cap_{k(t-1)} + \sum_{s \in S} CapMin^s NSw_{kt}^s + Amp_{kt} \quad \forall k \in K; \forall t \geq 2$$

$$Cap_{k1} = \sum_{s \in S} CapMin^s NSw_{k1}^s + Amp_{k1} \quad \forall k \in K$$

Capacidad máxima de los conmutadores.

$$Cap_{kt} \leq \sum_{s \in S} CapMax^s Sw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall t \in T$$

Hay capacidad mínima de nuevos conmutadores.

$$Cap_{kt} \geq Cap_{k(t-1)} + \sum_{s \in S} CapMin^s NSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall t \geq 2$$

$$Cap_{k1} \geq \sum_{s \in S} CapMin^s NSw_{k1}^s \quad \forall k \in K$$

El número de conmutadores permanece o se incrementa en el tiempo.

$$Sw_{kt}^s = Sw_{k(t-1)}^s + NSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S; \forall t \geq 2$$

$$Sw_{k1}^s = NSw_{k1}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S$$

3.1.5. Función objetivo

Función objetivo. El modelo minimiza el costo de instalación y ampliación de conmutadores por año:

$$\min A + B + C$$

$$A = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} [C_{st} NSw_{skt} - fd(t) \cdot C_{s\bar{t}} NSw_{sk\bar{t}}] \\ + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} [Cp_t Amp_{kt} - fd(t) \cdot Cp_{\bar{t}} Amp_{k\bar{t}}]$$

$$B = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (Cc_{ikt} + Cd_{it}) z_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \sum_{t \in T} Cc_{klt} y_{klt}^i \\ + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{j \in I} \sum_{t \in T} (Cc_{ijt} + Cd_{jt}) x_{ijt}^i$$

$$C = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} P_{kt} Over_{kt}$$

3.2. Problema de localización con conmutadores distribuidos

3.2.1. Conjuntos

Conjuntos a utilizar:

- I : Conjunto de locaciones de centros de demanda. Se incluyen nodos virtuales que representan puntos de conexión con el exterior de la red.
- K : Conjunto de potenciales locaciones de conmutadores (MGW o MGC).
- T : Conjunto de años de la evaluación (1 a 5).
- S : Conjunto de tipos de MGW.
- M : Conjunto de tipos de MGC.

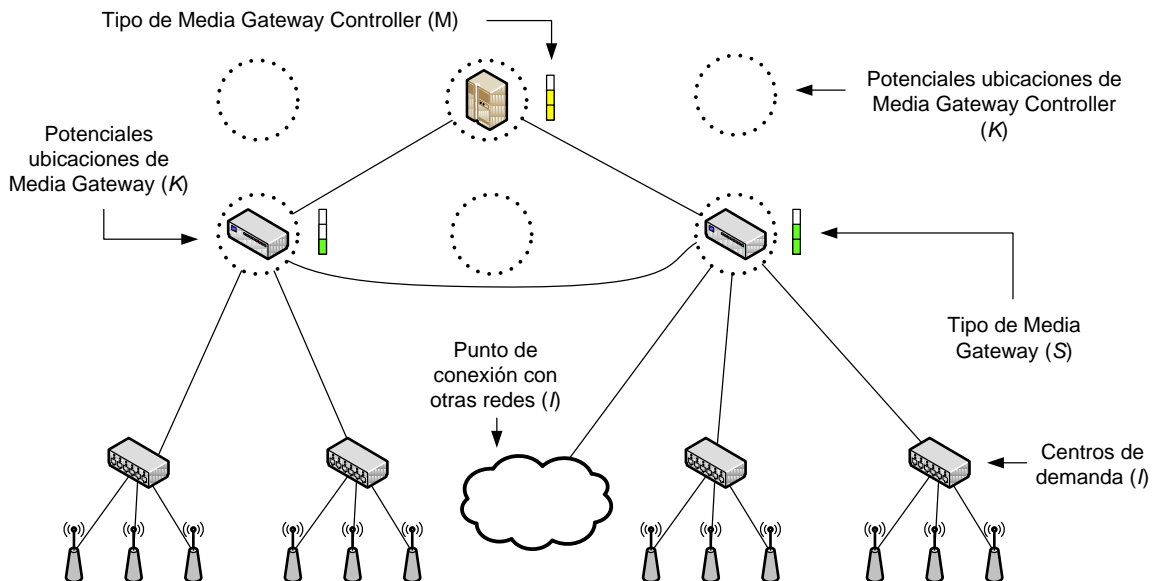


Figura 15: Conjuntos del problema distribuido

3.2.2. Parámetros

Parámetros a utilizar:

- Cc_{ijt} : Costo de arriendo de un circuito entre los nodos $i \in IUK$ y $j \in IUK$ en el año $t \in T$.
- Cd_{it} : Costo de arriendo líneas de distribución en la zona primaria $i \in I$ en el año $t \in T$.
- Dem_{ijt} : Demanda por capacidad de circuitos para transportar tráfico desde el nodo $i \in IUK$ hacia el nodo $j \in IUK$ en el año $t \in T$.
- $CMGW_{st}$: Costo fijo de un conmutador tipo $s \in S$ en el año $t \in T$.
- $CapMGW^s$: Capacidad de un MGW tipo $s \in S$.
- $CMGC_{mt}$: Costo fijo de un MGC tipo $m \in M$ en el año $t \in T$.
- $CapMGC^m$: Capacidad de un MGC tipo $m \in M$.

3.2.3. Variables

Variables de decisión del problema:

- x_{kjt}^i : Tráfico desde el conmutador $k \in K$ hacia el nodo de demanda $j \in I$, proveniente del nodo de demanda $i \in I$. En el año $t \in T$.
- y_{klt}^i : Tráfico desde el conmutador $k \in K$ hacia el conmutador $l \in K$, proveniente del nodo de demanda $i \in I$. En el año $t \in T$.
- z_{ikt} : Tráfico desde el centro de demanda $i \in I$ hacia el conmutador $k \in K$ en el año $t \in T$.
- NSw_{kt}^s : Número de MGW nuevos del tipo $s \in S$ que se instalan en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- Sw_{kt}^s : Número de MGW del tipo $s \in S$ en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- $CapMGW_{kt}$: Capacidad de los MGW que tiene el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.
- $MNSw_{kt}^m$: Número de MGC nuevos del tipo $m \in M$ que se instalan en el nodo $k \in K$ en el

año $t \in T$.

MSw_{kt}^m : Número de controladores de MGC del tipo $m \in M$ en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.

$CapMSC_{kt}$: Capacidad de los MGC que tiene el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$.

w_{kht} : Tráfico de control desde el MGW $k \in K$ hacia el MGC $h \in K$. En el año $t \in T$.

v_{hlt} : Tráfico de control desde el MGC $h \in K$ hacia el MGW $l \in K$. En el año $t \in T$.

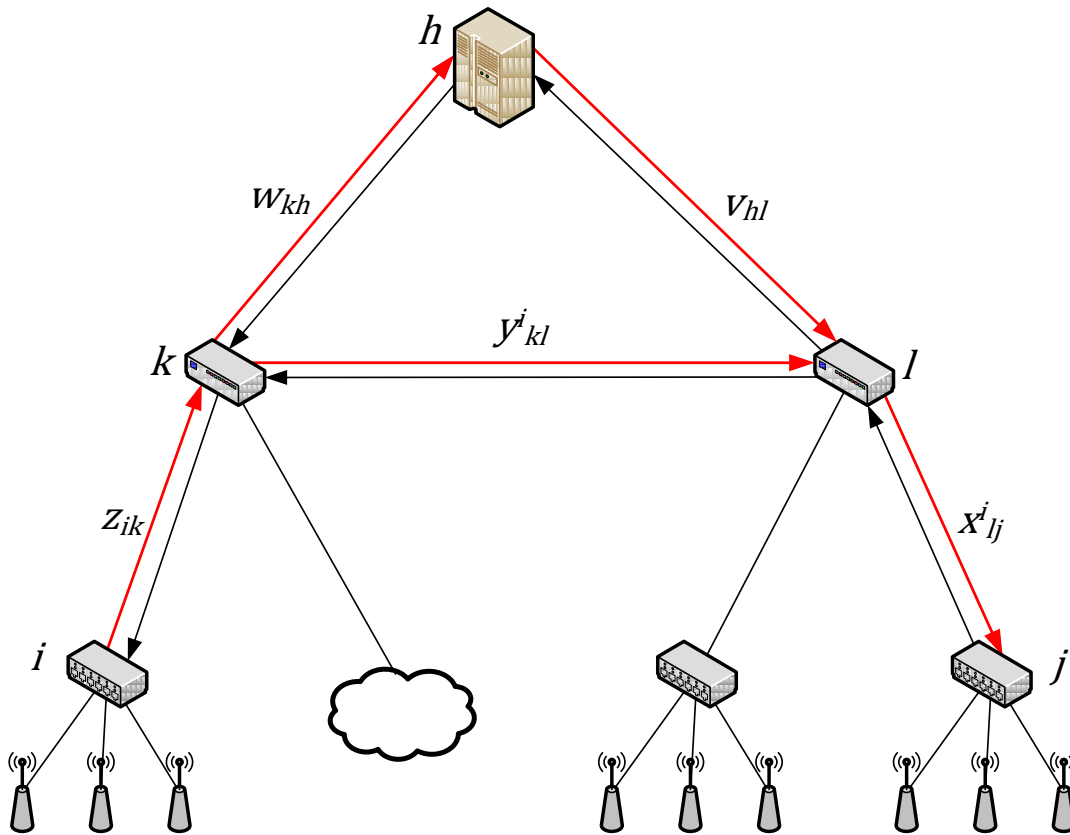


Figura 16: Variables de enlace del problema distribuido

3.2.4. Restricciones

Restricciones del modelo:

La suma total del tráfico generado en un nodo de demanda $i \in I$ a los conmutadores $k \in K$ a los que está conectado debe ser igual a la demanda por capacidad de circuitos del nodo $i \in I$ en todos los años.

$$\sum_{k \in K} z_{ikt} = \sum_{j \in I} Dem_{ijt} \quad \forall i \in I; \forall t \in T$$

La suma total de tráfico que llega a un nodo $j \in I$ desde los conmutadores $k \in K$, provenientes de un nodo de origen $i \in I$, debe ser igual a la demanda total de capacidad de circuitos entre $i \in I$ y $j \in I$.

$$\sum_{k \in K} x_{kjt}^i = Dem_{ijt} \quad \forall i \in I; \forall j \in I; \forall t \in T$$

La suma total del tráfico que llega a un conmutador $k \in K$, llevando tráfico proveniente del nodo $i \in I$, debe ser igual a la suma del tráfico saliente del conmutador, también llevando tráfico proveniente de $i \in I$.

$$z_{ikt} + \sum_{l \in K} y_{lkt}^i = \sum_{l \in K} y_{klt}^i + \sum_{j \in I} x_{kjt}^i \quad \forall i \in I; \forall k \in K; \forall t \in T$$

$$\sum_{k \in K} w_{kht} = \sum_{l \in K} v_{hlt}, \quad \forall h \in K, \forall t \in T$$

No puede llegar tráfico desde un conmutador $k \in K$ al nodo $j \in I$, si no existe tal conmutador.

$$x_{kjt}^i \leq Dem_{ijt} \sum_{s \in S} Sw_{kt}^s \quad \forall i \in I; \forall j \in I; \forall k \in K; \forall t \in T$$

La suma de las capacidades de los conmutadores en el nodo $k \in K$ en el año $t \in T$, debe ser suficiente para atender la demanda.

$$\sum_{i \in I} z_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in K} y_{lkt}^i \leq CapMGW_{kt} \quad \forall k \in K; \forall t \in T$$

$$\sum_{k \in K} w_{kht} \leq CapMGC_{ht} \quad \forall h \in K; \forall t \in T$$

La capacidad de los conmutadores en el año $k \in K$ es igual a la capacidad que tenían en el año anterior más las ampliaciones del año $t \in T$ y las adiciones de conmutadores nuevos. Para el año 1 la capacidad del periodo anterior es cero.

$$CapMGW_{kt} = CapMGW_{k(t-1)} + \sum_{s \in S} CapMGW^s NSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall t \geq 2$$

$$CapMGW_{k1} = \sum_{s \in S} CapMGW^s NSw_{k1}^s \quad \forall k \in K$$

$$CapMGC_{kt} = CapMGC_{k(t-1)} + \sum_{s \in S} CapMGC^s MNSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall t \geq 2$$

$$CapMGC_{k1} = \sum_{s \in S} CapMGC^s MNSw_{k1}^s \quad \forall k \in K$$

El número de conmutadores permanece o se incrementa en el tiempo.

$$Sw_{kt}^s = Sw_{k(t-1)}^s + NSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S; \forall t \geq 2$$

$$Sw_{k1}^s = NSw_{k1}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S$$

$$MSw_{kt}^s = MSw_{k(t-1)}^s + MNSw_{kt}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S; \forall t \geq 2$$

$$MSw_{k1}^s = MNSw_{k1}^s \quad \forall k \in K; \forall s \in S$$

Balace de flujo en MGC (ver justificación de esta restricción en la sección 7.5).

$$\sum_{h \in K} w_{kht} = \left(\sum_{i \in I} z_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in K} y_{lkt}^i \right) \cdot 19\%, \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

$$\sum_{h \in K} v_{hlt} = \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ljt}^i \right) \cdot 19\%, \quad \forall l \in K, \forall t \in T$$

3.2.5. Función objetivo

Función objetivo. El modelo minimiza el costo de instalación y ampliación de conmutadores por año:

$$\min A + A' + B + B'$$

$$A = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} [CMGW_{st} NSw_{skt} - fd(t) \cdot CMGW_{s\bar{t}} NSw_{sk\bar{t}}]$$

$$A' = \sum_{m \in M} \sum_{h \in K} \sum_{t \in T} [CMGC_{mt} MNSw_{mht} - fd(t) \cdot CMGC_{m\bar{t}} MNSw_{mh\bar{t}}]$$

$$\begin{aligned}
B &= \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} (C c_{ikt} + C d_{it}) z_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} \sum_{t \in T} C c_{klt} y_{klt}^i \\
&\quad + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{j \in I} \sum_{t \in T} (C c_{ijt} + C d_{jt}) x_{ijt}^i \\
B' &= \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{h \in K} C c_{kht} w_{kht} + \sum_{t \in T} \sum_{h \in K} \sum_{l \in K} C c_{hlt} v_{hlt}
\end{aligned}$$

3.3. Preparación de datos

3.3.1. Estimación de la demanda

La información disponible para la estimación de la demanda corresponde a los minutos totales de tráfico cursado al año proyectados a cinco años (Tabla 3, pg.98), y a la distribución del tráfico entre las zonas primarias (Tabla 4, pg. 98). Con estos datos se realizará una estimación detallada de la demanda de cada zona primaria.

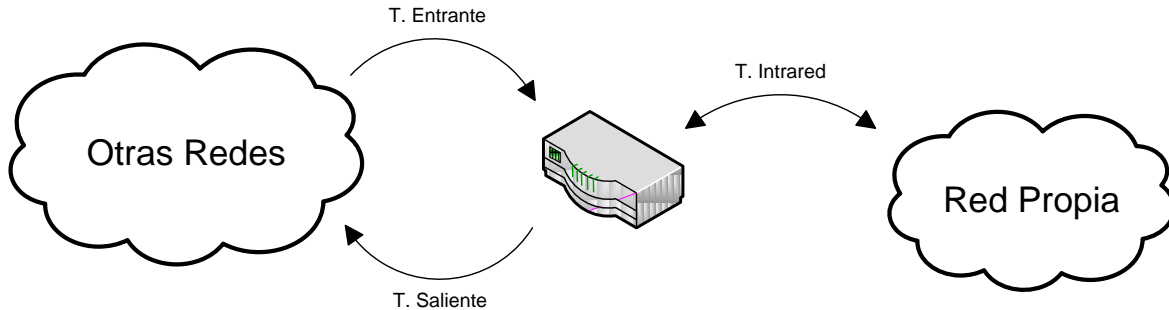


Figura 17: Distribución del tráfico total

En la Tabla 3, los tráficos (uso de recursos de conmutación en minutos por año) corresponden a:

- Tráfico intrared: Minutos cursados dentro de la misma compañía. Se denominará T_{int}^t al tráfico intrared del año t .
- Tráfico entrante: Es el tráfico que proviene de otras redes. Se denominará T_{ent}^t al tráfico entrante del año t .

- y Tráfico saliente: Es el tráfico que debe ser dirigido a otras redes. Se denominará T_{sal}^t al tráfico saliente en el año t .

En la Tabla 4 se muestra la distribución de tráfico en las zonas primarias. Para hacer referencia a valores de esta tabla se utilizara la notación D_k que corresponderá a la fracción de tráfico que corresponde a la zona primaria $k \in K = \{0, \dots, \bar{k} - 1\}$. En el caso de las interconexiones con otras redes se utilizarán los mismos valores para cada zona, luego para cualquier D_i con $i \in I = \{0, \dots, \bar{k} - 1, \bar{k}, \dots, 2\bar{k} - 1\}$ (considerando que \bar{k} , corresponde al número de zonas primarias 24), se tiene que $D_i = D_{i-\bar{k}} \forall i \geq \bar{k}$.

Utilizando la información de la Tabla 3 y de la Tabla 4 se pueden hacer las siguientes estimaciones:

- El tráfico intrared total en la zona primaria k en el año t será $T_{int}^t D_k$. Luego el tráfico intrared que es generado por tráfico generado en la zona k y con destino a la zona l en el año t es $T_{int}^t D_k D_l$.
- El tráfico entrante en la zona i en el año t será $T_{ent}^t D_i$. Luego el tráfico entrante en la zona i con destino a la zona l en el año t es $T_{ent}^t D_i D_l$.
- El tráfico saliente en la zona primaria k en el año t será $T_{sal}^t D_k$.

El tráfico saliente a otras compañías se entregará en el nodo en que se produce, esto para no incurrir en costos de transmisión extras.

Considerando estas estimaciones se construyó la siguiente tabla de demanda:

		$i \in I$						
$k \in K$		$T_{int}^t D_0 D_0$	...	$T_{int}^t D_0 D_k$	...	$T_{int}^t D_0 D_{\bar{k}-1}$	$T_{sal}^t D_{\bar{k}}$	[0]
		\vdots		\vdots		\vdots	\ddots	
		$T_{int}^t D_k D_0$	...	$T_{int}^t D_k D_k$	...	$T_{int}^t D_k D_{\bar{k}-1}$	$T_{sal}^t D_i$	
		\vdots		\vdots		\vdots	\ddots	
	$T_{int}^t D_{\bar{k}-1} D_0$	...	$T_{int}^t D_{\bar{k}-1} D_k$	...	$T_{int}^t D_{\bar{k}-1} D_{\bar{k}-1}$	[0]	$T_{sal}^t D_{2\bar{k}-1}$	
$\wedge i$		$T_{ent}^t D_{\bar{k}} D_0$	...	$T_{ent}^t D_{\bar{k}} D_k$	...	$T_{ent}^t D_{\bar{k}} D_{\bar{k}-1}$	[0]	

⋮	⋮	⋮				
$T_{ent}^t D_i D_0$	⋯	$T_{ent}^t D_i D_k$			⋯	$T_{ent}^t D_i D_{\bar{k}-1}$
⋮	⋮	⋮			⋮	⋮
$T_{ent}^t D_{2\bar{k}-1} D_0$	⋯	$T_{ent}^t D_{2\bar{k}-1} D_k$	⋯	$T_{ent}^t D_{2\bar{k}-1} D_{\bar{k}-1}$		

Luego se procedió a calcular el tráfico total en la hora cargada³⁰. Utilizando la fórmula se convierte el elemento de la matriz de demanda de la fila x y la columna y (MD_{xy} , cuyas unidades son minutos de uso anual) a Tr_{xy} expresado en Erlangs.

$$Tr_{xy} = \frac{MD_{xy}}{60 \cdot f_d \cdot f_m \cdot 12}$$

Por último estos valores son evaluados en la tabla Erlang-B para determinar la cantidad de circuitos necesaria para tener un 1% de probabilidad de bloqueo por intentos de conexión. Los resultados de este último paso es la demanda por circuitos que se utilizará para resolver ambos modelos.

3.3.2. Costos de enlaces

Para la determinar los costos de los enlaces se utilizarán tasas y parámetros adjuntos en la Tabla 6 (pg. 101), las distancias camineras entre zonas primarias (Tabla 5, pg. 100) y los costos de los distintos tipos de enlaces (Tabla 7, 101).

En ambos modelos se pueden distinguir dos tipos de enlaces: Conmutador – Conmutador y Conmutador – Centro de demanda. En los enlaces entre conmutadores se utilizará fibra óptica o enlaces satelitales, mientras que para los enlaces entre conmutadores y centros de demanda se utilizará una combinación de fibra óptica o enlaces satelitales (para el tráfico entre zonas primarias) con microondas (para la distribución dentro de las zonas primarias).

³⁰ En Chile empíricamente se usa un factor de carga diario $f_d = 10$ y un factor de carga mensual de $f_m = 22$.

Los enlaces satelitales son de uso exclusivo para las zonas de Coyhaique y Punta Arenas, ya que en estas zonas no existen enlaces de fibra óptica instalados.

Los costos de arriendo de los enlaces de fibra óptica, microondas y enlaces satelitales se denominarán C_{fo} , C_m y C_{sat} respectivamente, estos pueden ser encontrados en la Tabla 7. Y utilizando las tasas de conversión de la Tabla 6, se estandarizaron las unidades en $[\frac{\text{US\$}}{\text{Km-Erlang-Año}}]$ para la fibra óptica y $[\frac{\text{US\$}}{\text{Erlang-Año}}]$ para microondas y enlaces satelitales. Para los descuentos de capital se asignará la tasa de descuento indicada en la Tabla 6, de la forma $\frac{C}{(1+TDC)^t}$ con C cualquiera de los costos mencionados.

En el caso específico de los enlaces de fibra óptica se hace necesario conocer la distancia caminera en la que se extiende el enlace. Estos datos se encuentran en la Tabla 5 y para hacer referencia a ellos se denominará DC_{ij} a la distancia caminera entre i y $j \in K \cup I$.

Con respecto a los modelos presentados en las secciones 3.1 y 3.2, las variables x y z interconectan centros de demanda con conmutadores y, por lo tanto, los costos de arriendo por año de un enlace de E erlangs que conecte un centro de demanda $i \in I$ y $k \in K$ pueden ser $E \cdot [C_{fo}^t \cdot DC_{ik} + C_m^t]$ o $E \cdot [C_{sat}^t + C_m^t]$. Mientras los enlaces y , w y v son interconexiones de conmutadores, por lo tanto, los costos de arriendo por año de un enlace de E erlangs que conecte conmutadores ubicados en k y $l \in K$ son $E \cdot C_{fo}^t \cdot DC_{kl}$.

3.3.3. Características de equipos

Para determinar los parámetros relacionados con los equipos que se utilizarán en ambos modelos se utilizarán la Tabla 6 (pg. 101), la Tabla 8 (pg. 102) y la Tabla 9 (pg. 102).

Para el caso centralizado los costos y capacidades de los conmutadores se especifica en la Tabla 8, además en esta tabla se adjunta el precio y capacidad de las puertas. La presencia de estas puertas se debe a que los conmutadores en el caso centralizado no tienen capacidad de conmutación por si solos. La capacidad mínima para todos los tipos de conmutadores es cero y la capacidad máxima dependerá del tipo de conmutador y corresponde al tope de puertas que éste pueda manejar. En consecuencia el costo de un conmutador tipo

$s \in S$ que pueda conmutar E erlangs costará $C_s + E \cdot C_{p_k}$ con $CapMin_s = 0 \leq E \leq CapMax_s$. Incluyendo la tasa de descuentos de capital (ver Tabla 6), el costo será $\frac{C_s + E \cdot C_{p_k}}{(1+TDC)^t}$.

En casos extraordinarios es considerable aumentar la tasa de procesamiento de los conmutadores (y por consiguiente su capacidad). Esto trae consecuencias respecto a la vida útil de los equipos ya que esta sobre exigencia deteriora a una tasa mucho mayor que la normal a los equipos.

En el caso distribuido los costos y las capacidades de los conmutadores se especifica en la Tabla 9. En este caso los conmutadores tienen instalada una capacidad fija y, por lo tanto, no se usan puertas. Luego: un MGW tipo $s \in S$ costará $CMGW_s$ y su capacidad será $CapMGW^s$; análogamente un MGC tipo $m \in M$ costará $CMGC_s$ y su capacidad será $CapMGC^s$. Incluyendo la tasa de descuentos de capital los costos varían con el tiempo de la forma $\frac{c}{(1+TDC)^t}$, en ambos casos.

La depreciación de los equipos es un dato importante en la evaluación de ambos proyectos. Para todos los equipos se consideró la misma vida útil (ver Tabla 6), de ahora en adelante VU . Se determino utilizar una depreciación lineal para todos los equipos, luego el factor que corresponde al remanente que se utilizará en ambos modelos corresponde a:

$$fd(t) = \left(\frac{VU - (\bar{t} - t)}{VU} \right),$$

donde \bar{t} es el último año de evaluación. Este factor multiplicado por el precio del equipo en el último año, corresponde al valor que se obtendrá por la venta del equipo al final del ejercicio.

3.4. Implementación computacional de los modelos de optimización

Si se quiere realizar la planificación de una red de telecomunicaciones, se puede aprender el funcionamiento de las distintas tecnologías, teniendo métodos de planificación y de cálculos, sin embargo, la única manera de llevarlo a la realidad es a través de herra-

mientas computacionales ya que normalmente se necesita una gran cantidad de iteraciones para llevar a cabo dichos métodos y cálculos.

En el caso específico de esta memoria se asume que todos los datos de la red son conocidos y que el funcionamiento de la red de núcleo es independiente de si éste es centralizado o distribuido.

Viéndolo de una manera general, los bloques más importantes que se deben incluir en la plataforma computacional son:

- **Bloque de optimización:** Permite encontrar una configuración de red óptima, es decir una red que cumpla con los requisitos planteados al mínimo costo. La herramienta utilizada en esta memoria es ILOG CPLEX esto debido a su capacidad de trabajar en conjunto con JAVA.
- **Bloque de manejo de bases de datos:** Debido a la gran cantidad de parámetros que requiere el modelo, se hace necesario utilizar bases de datos. Se utilizaron bases de datos CSV por su fácil manejo en MS Excel y compatibilidad con JAVA.
- **Bloque central:** Se encarga de la interacción de los dos bloques anteriores. Es decir, carga el modelo en bloque de optimización junto a los parámetros recibidos desde las bases de datos. Finalmente, estructura la salida del programa en un archivo CSV.

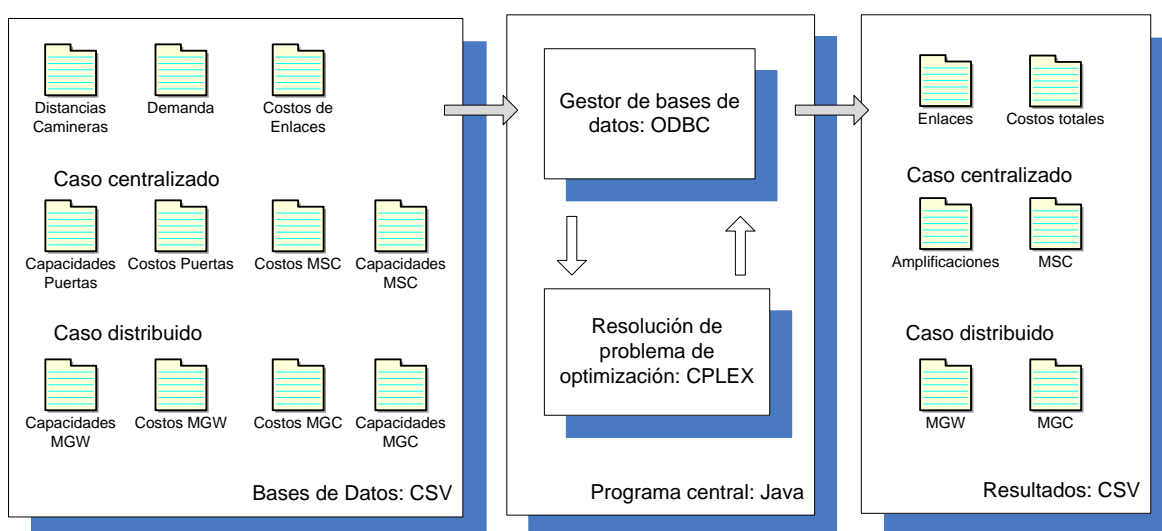


Figura 18: Diagrama de bloques de los programas de optimización

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

En la Figura 19 se esquematiza la instalación de conmutadores nuevos en cada año en ambos casos. Solo con estas variables se puede apreciar en términos generales las diferencias entre ambos modelos. Las capacidades totales de los equipos instalados en el último año se muestran en la Tabla 1.

Zona Primaria	Caso Centralizado		Caso Distribuido	
	MSC	Capacidad instalada	MGW	MGC
Santiago	24000	100 %	39990	12600
Iquique	–	–	3900	–
Antofagasta	8633	71,94 %	3900	–
Copiapó	–	–	3900	–
La Serena	–	–	3900	–
Valparaíso	6000	100 %	3900	–
Rancagua	–	–	3900	–
Talca	–	–	3900	–
Chillán	12000	100 %	3900	–
Temuco	–	–	3900	–
Valdivia	5756	95.93 %	3900	–
Coyhaique	–	–	3900	–
Punta Arenas	558	55.8 %	3900	–

Tabla 1: Capacidades totales de conmutadores por zona primaria [Erlangs]

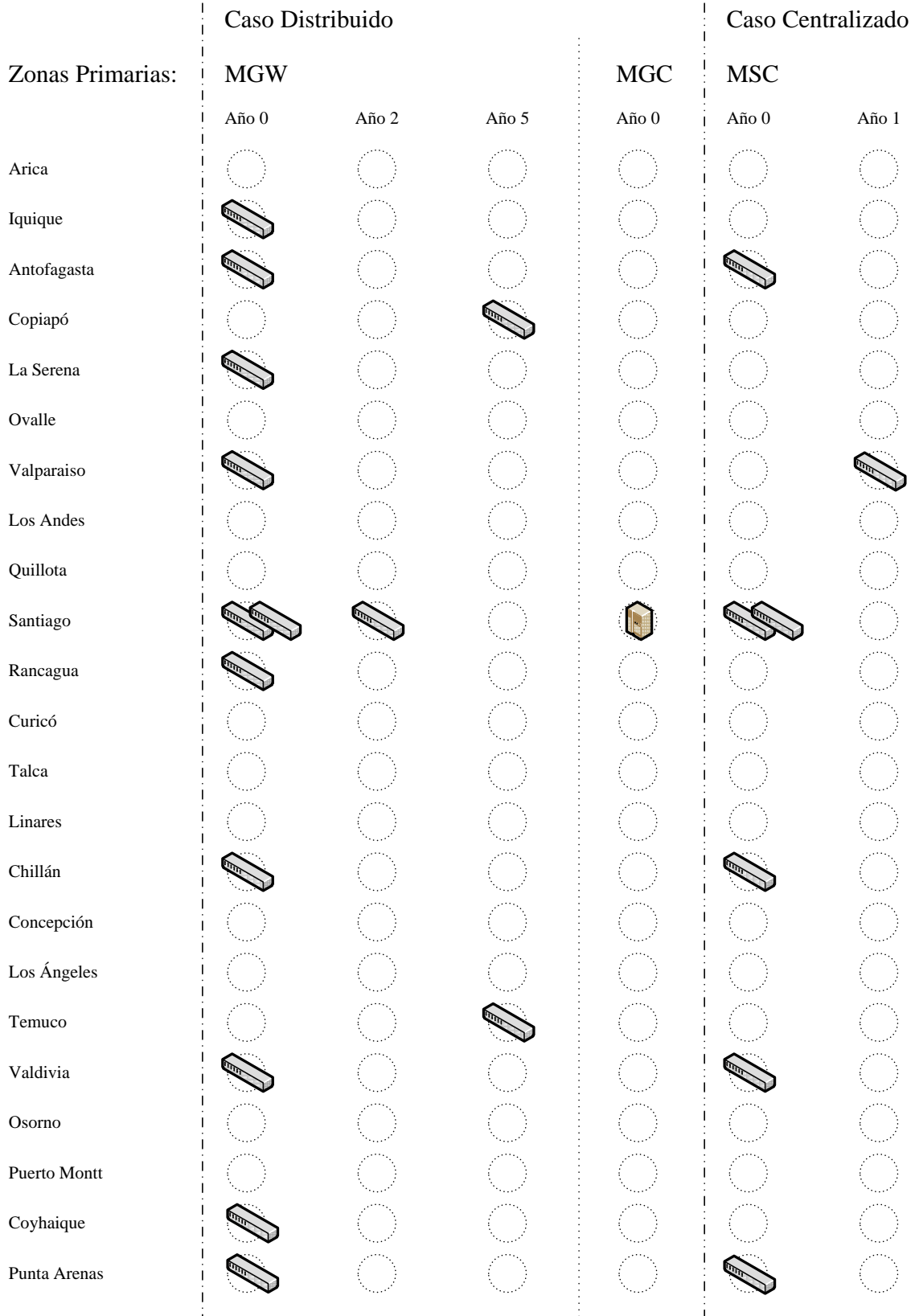


Figura 19: Conmutadores instalados por año en cada caso

4.1. Análisis económico

4.1.1. Costos totales

Los costos totales de cada sistema se muestran gráficamente en la Figura 20.

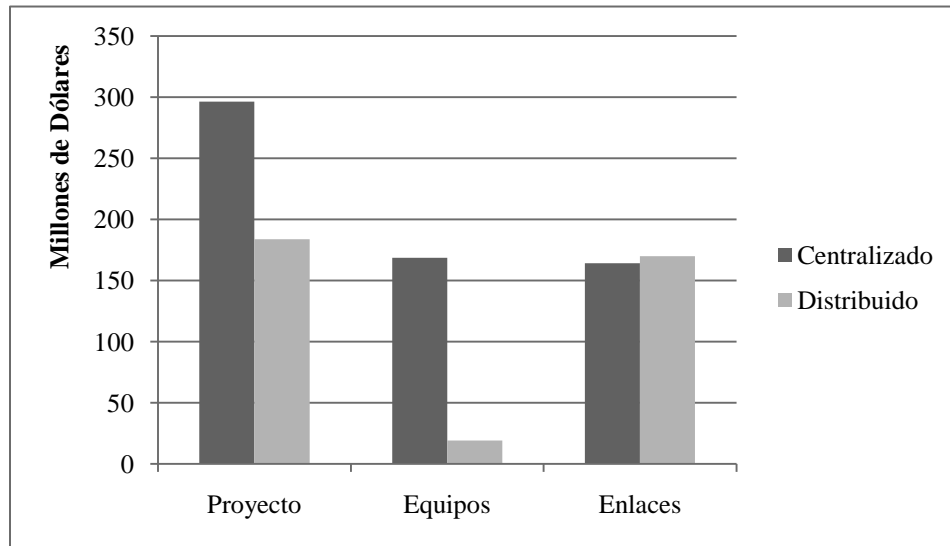


Figura 20: Costos totales de ambos modelos

Los flujos detallados de cada año en cuanto a equipos y enlaces se muestran en la Figura 21 y en la Figura 22 respectivamente.

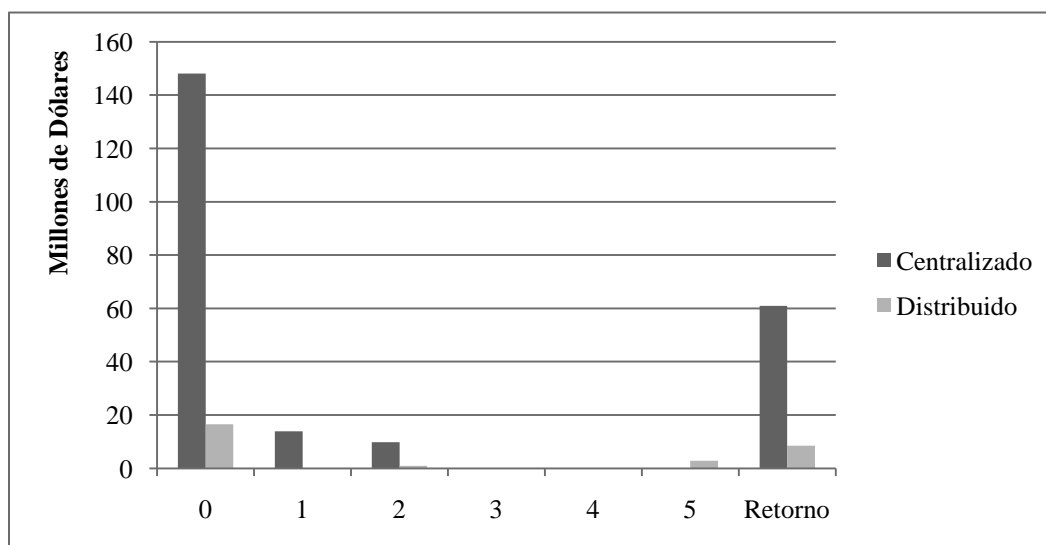


Figura 21: Flujos de los equipos

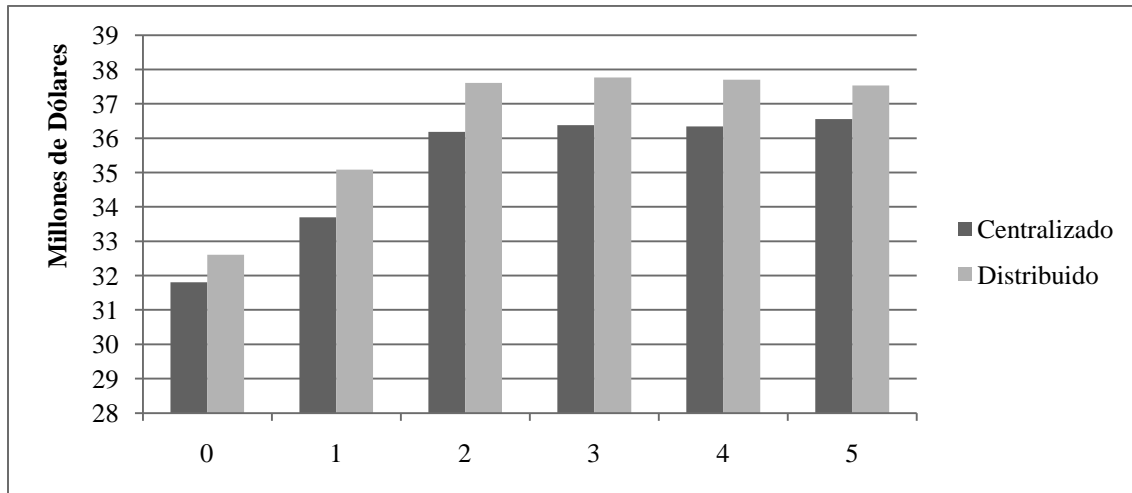


Figura 22: Flujos de los enlaces

4.1.2. Costos de conmutación

Los costos de conmutación dependen de parámetros como los costos de los equipos y puertas. Cuando se llega al límite de capacidad de un conmutador se hace necesario hacer una fuerte inversión debido a que es necesario comprar un nuevo equipo, en cambio cuando el conmutador ya está instalado el costo es mucho menor, o bien, nulo en el caso distribuido.

Los costos marginales de conmutación se muestran para el caso centralizado y distribuido en la Figura 23 y la Figura 24 respectivamente.

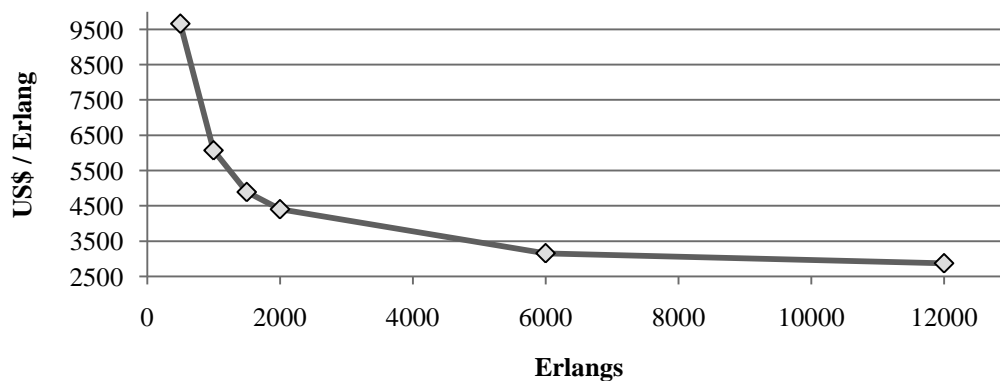


Figura 23: Gráfico de costos marginales de conmutación en el caso centralizado

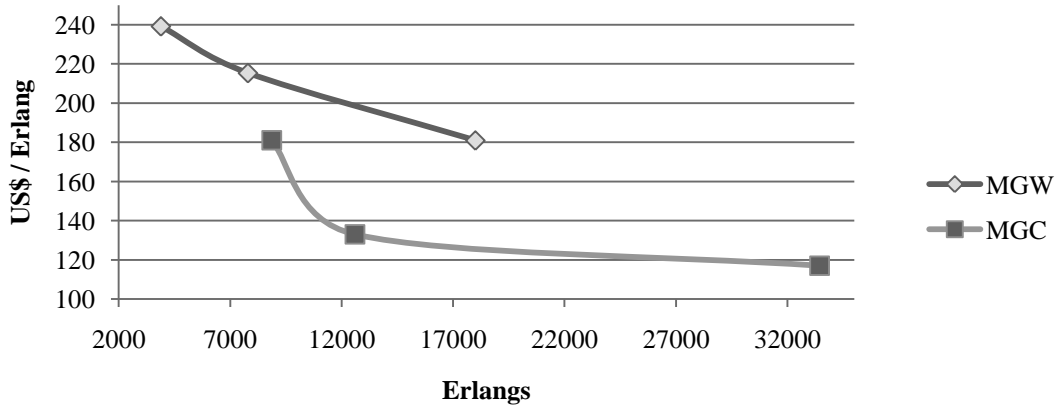


Figura 24: Gráfico de costos marginales de conmutación en el caso distribuido

Observando la Figura 23 y la Figura 24 se puede dar explicación a lo visto en la Figura 20 donde se muestra que los costos en equipos en el caso distribuido son mucho menores que en el caso centralizado. Esto se debe a que en el caso centralizado los costos por conmutación varían entre 9.659 y 2.871 $[\frac{\$US}{Erlang}]$ mientras que en el caso distribuido varían entre 239 y 180 $[\frac{\$US}{Erlang}]$.

A esto se suman los fenómenos analizados en las secciones 4.2.2 y 4.2.3 que dan cuenta de los costos a nivel sistémico que producen los conmutadores. La topología de la red y las capacidades de los conmutadores instalados son claves en el efecto de estos fenómenos. Es decir, los costos y beneficios de instalar o ampliar un conmutador en una zona determinada depende de toda la red.

4.2. Análisis topológico

4.2.1. Enlaces entre conmutadores

En los resultados obtenidos no existen, en ninguno de los dos modelos, enlaces entre conmutadores. Este fenómeno se muestra gráficamente en un ejemplo en la Figura 25.

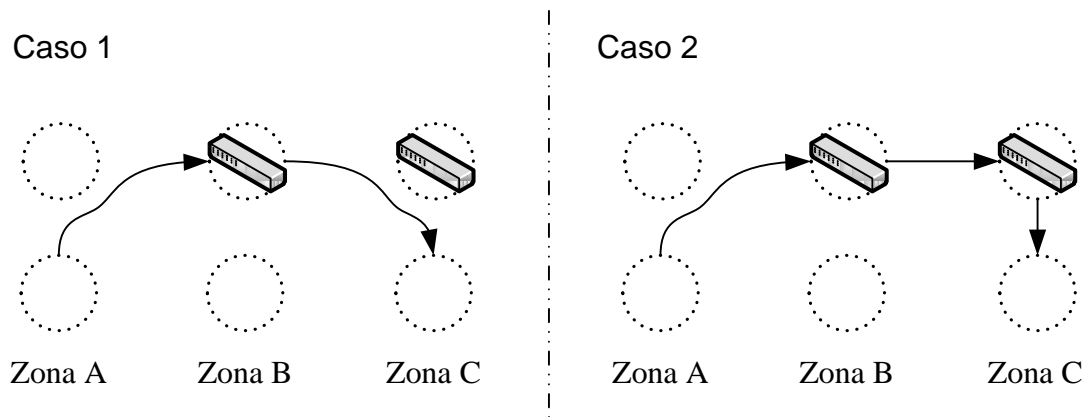


Figura 25: Ejemplo de interconexión 1

Para analizar los casos de la Figura 25 se utilizarán variables genéricas para los dos modelos que solo contemplan la interconexión entre MSC o MGW. Estas variables son: Cd_k , costo de distribución en la zona k ; Cc_{kl} , costo de interconexión entre zonas primarias; y C_k , costo de utilizar el conmutador ubicado en la zona k . Las unidades de todos estos costos son [$\$US/Erlang \cdot A\tilde{n}o$]. Luego, los costos de conexión del caso 1, C_{caso1} , y del caso 2, C_{caso2} , son:

$$C_{caso1} = Cd_A + Cc_{AB} + C_B + Cc_{BC} + Cd_C$$

$$C_{caso2} = Cd_A + Cc_{AB} + C_B + Cc_{BC} + C_C + Cd_C$$

$$C_{caso2} - C_{caso1} = C_C > 0$$

Con este resultado se puede concluir que en ningún caso se optará por utilizar interconexiones entre conmutadores, esto debido a que al utilizar este tipo de enlaces se tendría que conmutar la información 2 veces y, por lo tanto, incurrir en costos de capacidad que no se justifican.

4.2.2. Enlaces entre zonas primarias

Para determinar que conmutador debe encausar el tráfico entre dos zonas primarias se propone el siguiente ejemplo en la Figura 26.

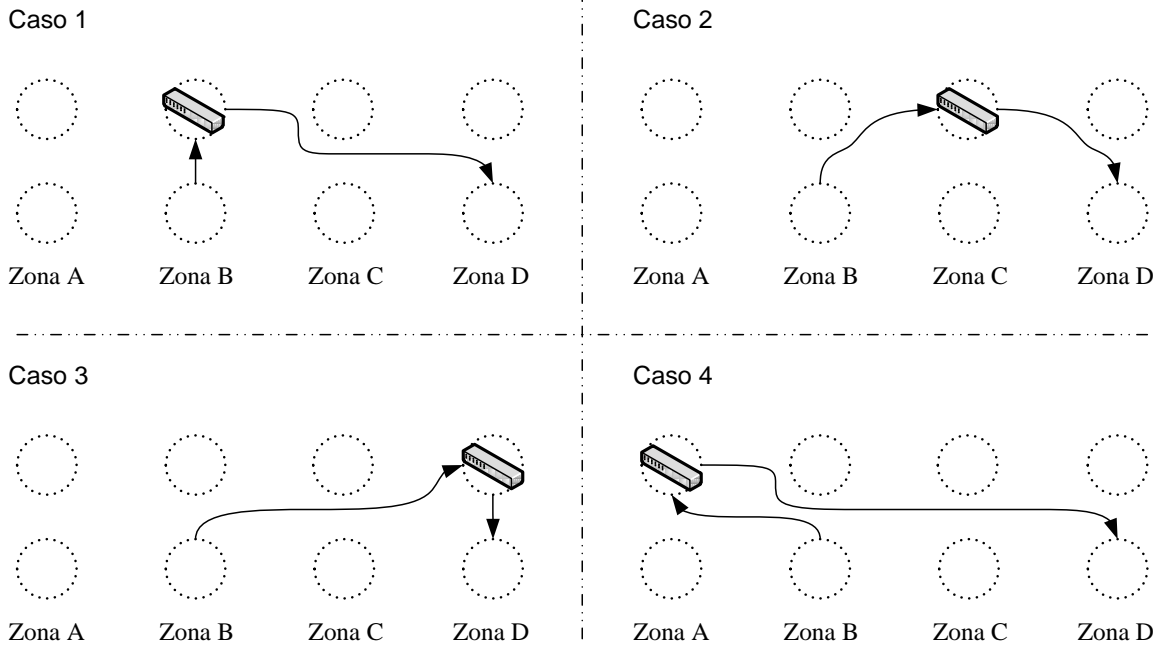


Figura 26: Ejemplo de interconexión 2

Los costos en cada caso son:

$$C_{caso1} = Cd_B + C_B + Cc_{BD} + Cd_D$$

$$C_{caso2} = Cd_B + Cc_{BC} + C_C + Cc_{CD} + Cd_D$$

$$C_{caso3} = Cd_B + Cc_{BD} + C_D + Cd_D$$

$$C_{caso4} = Cd_B + Cc_{BA} + C_A + Cc_{AD} + Cd_D$$

Considerando que $Cc_{BC} + Cc_{CD} = Cc_{BD}$ y si además se supone que $C_A = C_B = C_C = C_D$, es decir, los costos de conmutación son iguales. Se llega a la conclusión de que los tres primeros casos cuestan lo mismo, C_{123} , a diferencia del último. Si se considera que $Cc_{AD} = Cc_{AB} + Cc_{BD}$ y que $Cc_{AB} = Cc_{BA}$, la diferencia de costos entre los tres primeros casos y el último es:

$$C_{caso4} - C_{caso\ 1,2\ o\ 3} = Cc_{BA} + Cc_{AD} - Cc_{BD} = Cc_{BA} + Cc_{AB} + Cc_{BD} - Cc_{BD} = 2 \cdot Cc_{AB}$$

Luego es más conveniente un conmutador que se encuentre entre las zonas primarias (en el caso de que exista alguno) a uno que este fuera del camino que las une. Para generalizar este concepto se puede descomponer el costo de conexión entre zonas primarias Cc_{kl} como $Cc \cdot D_{kl}$, donde Cc corresponde al costo por kilómetro por Erlang del enlace y D_{kl} a la distancia caminera entre k y

l . Luego, si se considera que los costos de distribución y de conmutación se mantienen para todos los posible casos se tiene que:

Para todo h, l tal que $h, l \in Q$ con Q el conjunto de nodos que compone la cadena que interconecta k y l se cumple que $D_{kh} + D_{hl} = D_{kl}$, esto se cumple en el caso chileno, ya que este tiene una estructura de red alargada tal como su topología. Para redes enmallas el análisis sería distinto.

Luego para interconectar la zonas k y l un conmutador ubicado en cualquiera de los nodos que pertenezcan a Q será óptimo para la interconexión. En el caso que no exista ningún conmutador en Q , el óptimo será el conmutador más cercano a Q y se deberá incurrir en un gasto adicional al óptimo igual al doble del costo de conexión entre Q y este nodo.

Considerando la topología lineal y alargada que conforman las zonas primarias de Chile este efecto será mucho más fuerte para redes que no posean conmutadores en las zonas de los extremos debido a que la cadena de nodos cubiertos por los conmutadores será más pequeña. En la Figura 27 se ejemplifica esta situación.

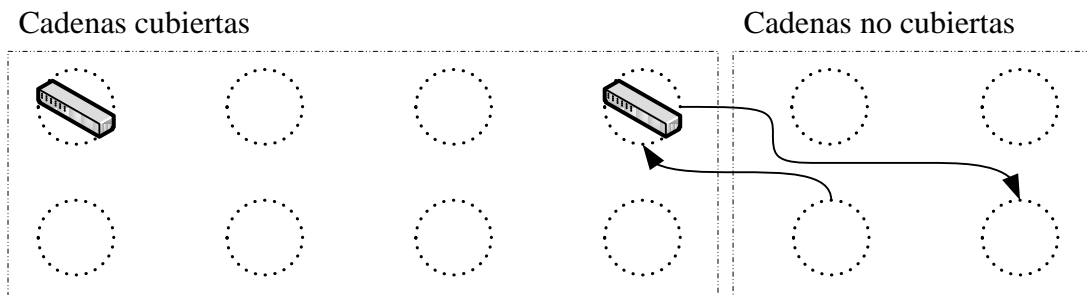


Figura 27: Ejemplo de cadenas de nodos

4.2.3. Ubicación de los conmutadores

Se denominará tráfico “intrazona” k a la suma de todo el tráfico que es generado y tiene por destino el mismo nodo k . Este tráfico correspondería a:

- el tráfico de salida en la zona $T_{sal}D_k$,
- el tráfico de entrada por la zona y con destino a la misma $T_{ent}D_kD_k$
- y el tráfico intrared generado en la zona y con destino a la misma $T_{int}D_kD_k$.

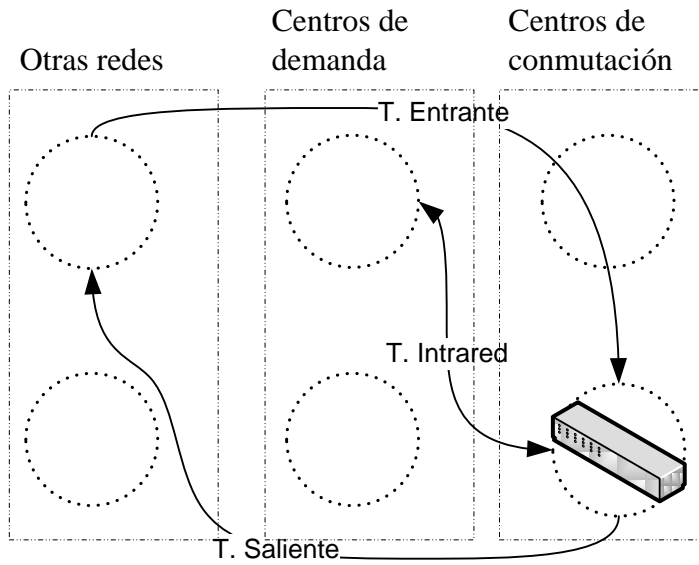


Figura 28: Composición del tráfico “intrazona”

Para estudiar el efecto del tráfico intrazona sobre la ubicación de los conmutadores se analizará el ejemplo presente en la Figura 29.

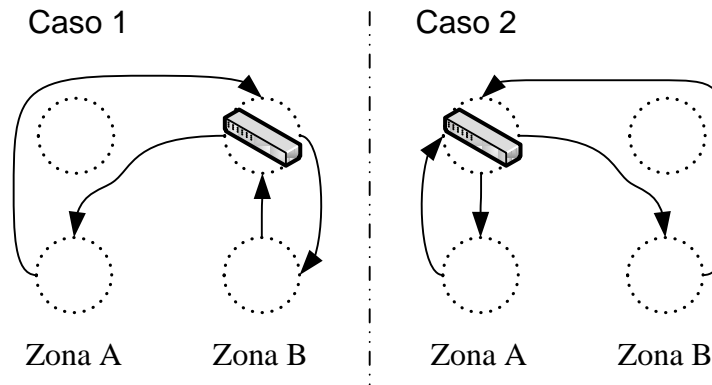


Figura 29: Ejemplo de interconexión 3

Si se denomina E_k el tráfico intrazona en el nodo k , entonces los costos totales en cada caso serán:

$$C_{caso1} = [C_B + 2 \cdot (Cd_A + Cc_{AB})]E_A + [C_B + 2 \cdot Cd_B]E_B$$

$$C_{caso2} = [C_A + 2 \cdot Cd_A]E_A + [C_A + 2 \cdot (Cd_B + Cc_{AB})]E_B$$

$$C_{caso1} - C_{caso2} = 2 \cdot Cc_{AB}[E_B - E_A] + [C_B - C_A][E_A + E_B]$$

$$\frac{C_{caso1} - C_{caso2}}{2 \cdot C_{cAB}(E_A + E_B)} = \Delta_{12} = \frac{E_B - E_A}{E_A + E_B} + \frac{C_B - C_A}{2 \cdot C_{cAB}}$$

De esta última ecuación se tiene que dependiendo de si Δ_{12} es positivo, negativo o cero, se preferirá la zona 2, 1 o cualquiera de las dos respectivamente.

El término $\frac{E_B - E_A}{E_A + E_B}$ puede variar entre 1, cuando $E_B \gg E_A$, y -1, cuando $E_A \gg E_B$. Para mostrar la preponderancia de cada zona sobre el resto se muestra la función $f(\hat{k}) = \sum_{k \in K} \frac{E_{\hat{k}} - E_k}{E_{\hat{k}} + E_k}$ en la Figura 30.

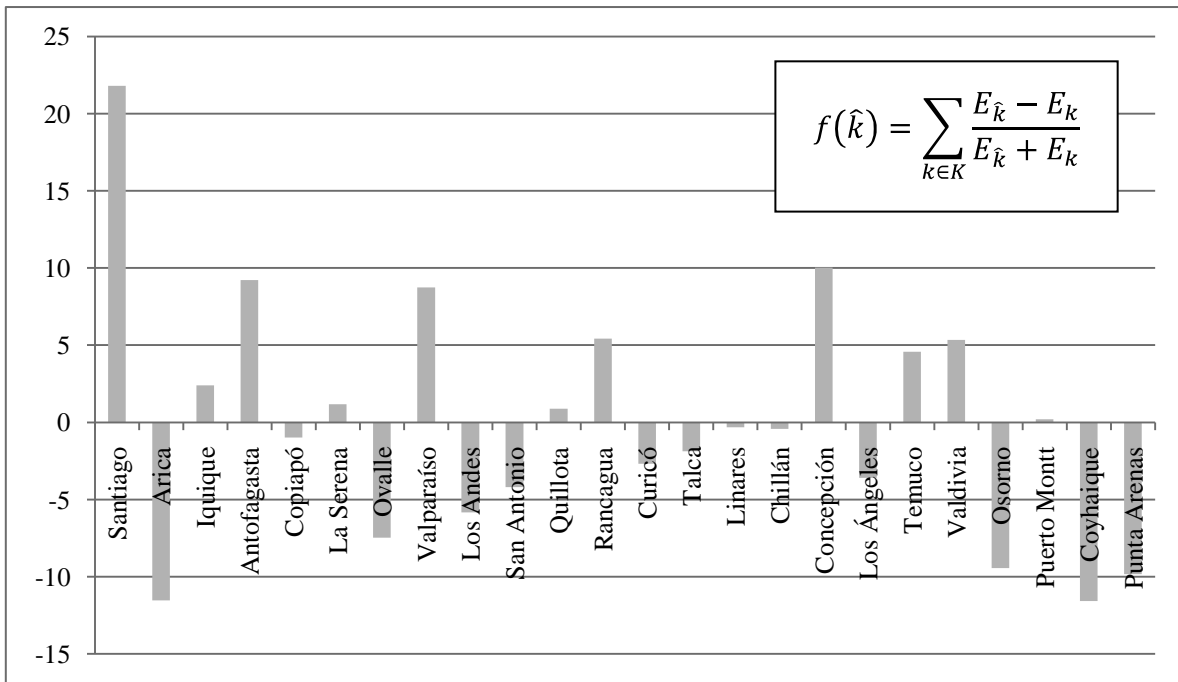


Figura 30: Preponderancia de cada zona según tráfico "intrazona"

En la Figura 30 se puede observar la coincidencia que existe entre los valores positivos de este factor y la ubicación de conmutadores tanto para el caso centralizado como distribuido.

Ahora, examinando el término $\frac{C_B - C_A}{2 \cdot C_{cAB}}$ se tiene que: la distancia caminera promedio entre zonas primarias, exceptuando Coyhaique y Punta Arenas, es de 627 [Km] (Ver Tabla 5) y el costo de un enlace de fibra óptica es de 0,5464 $\left[\frac{\$US}{\text{Erl} \cdot \text{Año} \cdot \text{Km}} \right]$ (Ver Tabla 7), luego el costo promedio entre zonas primarias es de 342,8 $\left[\frac{\$US}{\text{Erl} \cdot \text{Año}} \right]$; con respecto a los costos margi-

nales de conmutación depende del caso: para el caso centralizado varían entre 9.659 y 2.871 $[\frac{\$US}{Erl \cdot Año}]$ (Ver Figura 23) y para el caso distribuido varían entre 239 y 181 $[\frac{\$US}{Erl \cdot Año}]$ (Ver Figura 24). Concluyendo, este término resulta ser un factor importante en el caso centralizado, ya que, según la región de la curva de costos marginales de conmutación en que se encuentre el conmutador la diferencia puede ser comparable a los costos de enlace; en contraparte, en el caso distribuido este término es poco relevante, ya que los costos marginales de conmutación son muy bajos respecto al de los enlaces.

4.2.4. Cantidad de conmutadores instalados

Dependiendo de la relación entre los costos de enlace y los costos marginales de conmutación (Vistos en la sección 4.1.2), será más conveniente instalar más conmutadores o más enlaces.

En el caso centralizado el número de conmutadores utilizados, al igual que la capacidad de estos, es mucho menor que en el caso distribuido. Esto se corrobora en la Tabla 1, donde se muestran las capacidades e instalaciones realizadas en cada modelo. La capacidad total de conmutación en el último año de evaluación para el caso distribuido alcanza los 86.700 [Erlangs], mientras que para el caso centralizado ésta es de 56.947 [Erlangs]. Comparado con la demanda por capacidad máxima de conmutación total del sistema que es de 56.739 [Erlangs]. Esto refleja que las prioridades de los modelos son distintas: en el caso centralizado se debe ahorrar lo máximo posible en recursos de conmutación debido a su alto costo relativo, mientras que en el caso distribuido el elemento más costoso corresponde a los enlaces.

Otro análisis importante es que el efecto sobre los costos del tráfico intrazona, descrito en la sección 4.2.3, será mucho más fuerte cuando la cantidad de conmutadores es menor. Esto debido a que existirá una menor cantidad de centros de demanda que puedan conmutar su tráfico intrazona con un mínimo costo. Observando la solución de los dos modelos, es claro que el caso centralizado tiene una cantidad inferior de conmutadores que el caso distribuido. Por lo tanto, este efecto influye muy fuertemente en los costos por concepto de enlaces en el caso centralizado.

4.3. Análisis geográfico y demográfico

Un caso que escapa a la lógica presentada en la sección 4.2.3 es la zona primaria de Concepción que aunque tiene un tráfico “intrazona” mayor que las zonas primarias aledañas, no posee un conmutador en ninguno de los dos modelos. Este efecto responde a la cercanía que existe entre Concepción y Chillán (104 [Km]), por lo que los costos de transmisión no son muy altos entre ellas y, además Chillán está más cerca que Concepción a zonas aledañas del sector debido a que este último se encuentra en la costa que se aleja del troncal de zonas primarias que pasa por la depresión intermedia. Forzando la ubicación de conmutadores en Concepción en desmedro de Chillán se aprecia un aumento de un 0,465% y un 0,072% en la inversión, en los casos centralizado y distribuido respectivamente.

Además, solo se utilizan enlaces satelitales entre Coyahique – Santiago y Punta Arenas – Santiago, ya que no hay fibra óptica en estas zonas, por lo que no existen enlaces entre Coyahique o Punta Arenas con el resto de la red. Por lo tanto, para abaratar costos, el modelo opta por instalar conmutadores en estas zonas para su tráfico “intrazona” y utilizar el enlace satelital solo para comunicaciones con otras zonas.

Por último, la concentración demográfica de la zona de Santiago genera una necesidad de alta capacidad de conmutación para ambos modelos. Además en el caso distribuido es necesario instalar un MGC en esta zona que controla de forma centralizada a todos los MGW de la red, esto debido a que la mayor concentración de enlaces se encuentra ahí.

4.4. Robustez

Para determinar la robustez, entendida en el contexto de disponibilidad de los elementos de la red, se debe precisar el número de equipos y enlaces que requiere cada una, y luego calcular la disponibilidad aproximada de cada elemento. De esta forma se podrá determinar la disponibilidad de todo el sistema para cada caso.

Para los equipos de conmutación se utilizará la fórmula $A_e = \frac{MTBF_e}{MTBF_e + MTTR_e}$, donde: A_e es la disponibilidad; $MTBF_e$ (*Mean Time Between Failures*) el tiempo medio entre fallas; y $MTTR_e$ (*Mean Time To Recovery*) el tiempo medio de recuperación del elemento e .

Asumiendo que el *MTBF* promedio de los equipos que componen las estaciones es de 500.000 [Hrs] y el *MTTR* es de 1 [Hrs], la disponibilidad de los equipos será de 99,9998%.

En cuanto a los enlaces, estos son arrendados y, por lo tanto, existe un nivel de SLA acordado con el prestador del servicio y que también está definido por la Ley General de Telecomunicaciones (6). Para determinar el nivel necesario requerido para el correcto funcionamiento de cada sistema, este se determinará dependiendo de la disponibilidad de los equipos y del nivel de servicio objetivo para cada caso.

Considerando que la indisponibilidad del sistema este en el orden de los minutos, se debería exigir un SLA de 99,99 %. Con este nivel, el tiempo de inactividad del sistema por año sería de 53 minutos aproximadamente.

Si se define como A_l la disponibilidad promedio de los enlaces, A_S la disponibilidad objetivo, n_l^c y n_l^d el número de enlaces y n_e^c y n_e^d el número de equipos en el caso centralizado y distribuido, entonces se debe cumplir que:

- $A_S = A_e^{n_e^c} \cdot A_l^{n_l^c}$, para el caso centralizado y
- $A_S = A_e^{n_e^d} \cdot A_l^{n_l^d}$, para el caso distribuido.

Para el caso centralizado el número de equipos y canales es de 7 y 1.388 respectivamente; mientras que para el caso distribuido 16 y 1.393. Si se considera que un enlace E1 tiene 30 canales, y suponiendo que solo se utilizarán este tipo de enlaces, luego en el caso centralizado se utilizan 42,26 enlaces y en el caso distribuido 46,43 enlaces.

Para este número de equipos y enlaces, la disponibilidad que se debe requerir corresponde a 99,99979 % para el caso centralizado y 99,99985 % para el caso distribuido.

4.5. Posibles mejoras al modelo

Aunque el modelo representa bastante bien la problemática de optimización de redes de núcleo, este puede ser mejorado. Algunas posibles mejoras para aumentar el realismo del modelo son:

- El costo de arriendo por Erlang de los enlaces debiese ser por ejemplo: decreciente con respecto a la capacidad de estos (economía de escala). Para llevar a cabo esta mejoría se propone agregar una dimensión extra a las variables de enlace que indique el tipo al que este último corresponde.
- El tráfico con destino a otras redes, o saliente, debiese evacuar la red en el conmutador más cercano al nodo en que se genera, y no necesariamente en el mismo nodo (ver Figura 31). Es posible realizar esto utilizando restricciones del tipo “*Big M*” cuya función sería conducir el tráfico de salida solo a nodos que tengan conmutadores instalados.

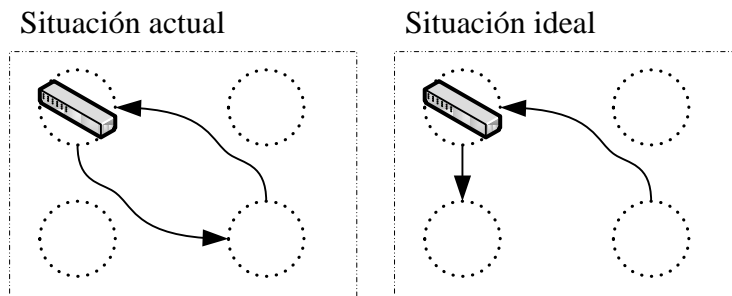


Figura 31: Manejo de tráfico de salida

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue llevar a cabo un análisis, y con esto una resolución, respecto a desplegar una red de núcleo distribuido frente a una de núcleo centralizado, considerando que ambos modelos apuntan a satisfacer la misma demanda y calidad de servicio en el caso de redes móviles chilenas.

5.1. Cumplimiento de los objetivos

Como primer paso para lograr dicho objetivo, se determinaron los elementos comunes de conmutación necesarios para describir en forma general el núcleo de cualquier red de núcleo de telefonía móvil: los equipos de conmutación (los MSC en el caso centralizado y los MGW y MGC en el caso distribuido), los enlaces entre conmutadores (de fibra óptica, microondas o enlace satelital) y las interconexiones con otras redes (representadas como nodos virtuales).

Luego, a través de un esquema se identifican los elementos que componen una planificación, a nivel general, al definir las entradas, recursos, restricciones y salidas de un proceso de este tipo. Teniendo este esquema completo se simplifica para adecuarlo a la problemática propuesta en esta memoria.

Se formularon modelos de optimización, especificando: conjuntos, variables, parámetros, restricciones y la función objetivo para ambos casos. Los modelos se realizaron en base a los detalles técnicos de los equipos y elementos de los sistemas de red.

Se reunieron los datos y parámetros específicos del problema de optimización del caso chileno. Las capacidades de los equipos y puertas; la demanda de tráfico (*intranet*, saliente y entrante) total estimada anual, sobre la cual se realizaron proyecciones para determinar las demandas específicas de cada zona; los tipos de enlaces posibles y sus respectivos costos y capacidades; la matriz de distancias camineras entre los puntos de acceso y las posibles ubicaciones de los conmutadores.

La programación de ambos problemas se realizó utilizando JAVA, y sobre ésta se manejaron de bases de datos a través del puente JDBC.ODBC y, además, se dio solución a los problemas de optimización utilizando CPLEX.

Se realizó un análisis profundo tanto de los resultados como de los efectos que inciden en el modelo. Desde el punto de vista económico y topológico, y de cómo se ven afectados estos resultados debido a la geografía y demografía de Chile.

A través de los análisis, se confirma que es preferible optar por utilizar conmutadores distribuidos, desde todos los puntos de vista analizados en la memoria. El costo es mucho menor y, además, se dispone de capacidad extra a la demandada, por lo tanto, existe holgura en cuanto a su uso futuro o en otras aplicaciones.

Los resultados del caso distribuido son previsibles, debido a que los costos de los conmutadores son muy bajos en relación a su capacidad. Luego, como se aprecia en los resultados, se utiliza un conmutador por zona primaria en casi todos los nodos, salvo en Santiago donde se concentra la mayor parte de la demanda de la red y es necesario utilizar un mayor número de conmutadores.

5.2. Opinión personal

Esta memoria permite visualizar las tecnologías y topologías de las redes núcleo de manera simple e ilustrativa, esto la hace recomendable como material didáctico para estudiantes universitarios del área.

El estudio de las tecnologías de telecomunicaciones que se realiza en esta memoria, aporta al conocimiento de las opciones técnicas que se manejan en este rubro, indagando en cada una de sus partes. Lo anterior también aporta en el ámbito laboral puesto que aporta como preparación y fuente de experiencia, con miras a enfrentar los problemas de la realidad.

Por otra parte, la importancia de la planificación radica en el dinamismo de las tecnologías de la información, que suelen cambiar y siguen cambiando periódicamente, y por lo tanto se debe estar preparado para cualquier eventualidad. La planificación permite simular variados escenarios de manera de estar listo para reaccionar con cualquier situación que

ocurra en la realidad. La planificación de las redes de telecomunicaciones, es y seguirá siendo muy importante para el éxito de una empresa, puesto que lo más probable es que una buena planificación lleve al éxito de los proyectos en que se realice.

5.3. Trabajo futuro

Como tema para trabajos futuros se sugiere la realización de una herramienta de planificación que integre el proceso de optimización, simulación y análisis en un solo sistema, incluyendo un entorno de visualización sofisticado para tener una visión más amplia del problema. Sumado a esto se puede implementar un curso de planificación, en donde se transmitan los conceptos principales, los pasos a seguir y los criterios que se deben adoptar en este proceso.

Otro enfoque no considerado en esta memoria consiste en complementar la programación de tal forma que se pueda optimizar considerando una red preexistente, que no necesariamente sea de la misma tecnología. O, en el mismo enfoque, buscar la forma óptima de expandir una red preexistente.

Aprovechando el aumento vertiginoso de la capacidad de los computadores, se podría incrementar la complejidad del problema planteado en este documento, agregándole nuevos elementos que agreguen detalle al modelo y resuelvan más variantes de éste.

Además, se cree que el modelo mostrado en este trabajo puede servir como base para cualquier tipo de tecnología nueva que surja, ya que considera los factores primordiales o bases dentro de una planificación de redes de núcleo.

Eventualmente, en el futuro se podría construir un modelo que considere las redes inalámbricas y las cableadas, con lo que se podría planificar la red completa.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

1. **CISCO.** Cisco Press. [En línea] <http://www.ciscopress.com/>.
2. **Castillo, Luís.** *Apuntes de “Sistemas de Conmutación Telefónica”*. 2008.
3. **Barros, Oscar.** *Investigación Operativa*. Santiago : Editorial Universitaria, 1980.
4. **Prawda, Juan.** *Métodos y modelos de investigación de operaciones*. Ciudad de México : Editorial Limusa, 1984.
5. **ITU.** International Telecommunication Union. [En línea] <http://www.itu.int/>.
6. **Ley General de Telecomunicaciones.** [En línea] <http://www.leychile.cl>.
7. **Telefónica I+D.** *Las Telecomunicaciones de Nueva Generación*. s.l. : Achiet, 2005.
8. **Chong Ip, Cristian Felipe.** *Análisis técnico y económico de la implantación de redes móviles de tercera generación en el mercado chileno*. 2007.
9. **Espinoza Armijo, Jaime Ignacio.** *Dimensionamiento de la capacidad de y caracterización de la calidad de una red GPRS*. 2007.
10. **Heikki Kaaranen, Ari Ahtiainen, Lauri Laitinen, Siamäk Naghian, Valtteri Niemi.** *UMTS Networks Architecture Mobility and Services*. Chichester, England : John Wiley & Sons Ltd., 2005.
11. **Iga Jadue, Alexis Rodrigo.** *Metodologías, herramientas y criterios para la planificación*. 2007.
12. **Wikimedia.** Wikipedia. [En línea] <http://es.wikipedia.org/>.
13. **Comité Consultivo Internacional, Telegráfico y Telefónico, CCITT.** *Planificación General de la*. Ginebra, Suiza : s.n., 1983.

14. **Lavalle, Steven.** *Planning Algorithms.* Cambridge, Inglaterra : 1^a Edición, University of Illinois, Cambridge University, 2006.

15. **Lazcano, Cesar.** *Diseño e Implementación de Procesos de Planificación de Capacidad para Operadores de Plataformas con Servicios de Nueva Generación.* 2006.

16. **Guo, Liang, Zhang, Jie y Maple, Carsten.** *Coverage and Capacity Calculations for 3G Mobile.* Liverpool, Inglaterra : University of Luton: Department of Computing and Information Systems, Liverpool, 2003.

CAPÍTULO 7. ANEXOS

7.1. ATM

Esta tecnología principalmente lo que hace es incluir un encabezado más entre el encabezado de capa 2 y el encabezado de capa 3. Este encabezado, mostrado en la Figura 15, posee un campo de 20 bits para la identificación de etiquetas, 3 bits para el campo EXP que hoy en día se utiliza para la diferenciación de servicios, 1 bit para el campo S que identifica a la primera etiqueta introducida, y 8 bits para el campo TTL (*Time To Live*) que se incrementa en uno en cada paso por un LSR.



Figura 32: Encabezado MPLS³¹

Este tipo de plataformas se compone de un conjunto de LSRs, algunos situados en el borde de la red, los *edge* LSRs, y otros en el interior de ésta, los *internal* LSRs.

Los Edge-LSRs son los encargados del etiquetado de cada uno de los *frames* o paquetes que necesiten ingresar a la red MPLS y también de la elaboración de los *Label Switch Path* (LSPs). Los LSRs internos por su parte son como *routers* pero que funcionan en base al intercambio de etiquetas según se le asignó en el LSP.

Un LSP es un canal virtual unidireccional, con garantías de QoS, de borde a borde de la red MPLS que deben seguir todos los paquetes que tengan el mismo origen, destino y que posean un cierto FEC (*Forward Equivalence Class*). Éste es creado por el Edge-LSR utilizando las técnicas de enrutamiento, como RIPv2, IS-IS o OSPF, pero reservando recursos, con Int-Serv o DiffServ, para este canal y distribuyendo de manera óptima la carga a

³¹ Referencia: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:MPLS_packet.png

través de la red, no tomando como criterio primordial el camino más corto, como en el protocolo LDP.

7.2. Tecnologías de redes de comunicaciones móviles

7.2.1. GSM

GSM (*Global System for Mobiles communications*) es una tecnología identificada por el estándar europeo de comunicaciones móviles de segunda generación. Este sistema digital fue pensado inicialmente para ofrecer servicios de voz y transmisión de datos a baja velocidad sustituyendo así a la anterior generación de telefonía móvil analógica.

Este sistema fue ideado para unificar las tecnologías de comunicaciones móviles en Europa, ya que antes de su aparición existían más de diez tecnologías de comunicaciones móviles diferentes e incompatibles entre sí en ese continente.

Para desplegar el servicio, el sistema GSM utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*), como método de acceso al medio y también la banda de frecuencia de 900MHz. Además posee la capacidad de seguimiento automático de los teléfonos móviles en su desplazamiento por todos los países (*Roaming*).

Con esta tecnología de segunda generación se ofrece las siguientes características:

- Mayor calidad de las transmisiones de voz
- Mayor capacidad de usuarios
- Mayor confiabilidad de las conversaciones
- La posibilidad de transmitir mensajes alfanuméricos. Este servicio permite enviar y recibir cortos mensajes que puedan tener hasta 160 caracteres alfanuméricos desde un teléfono móvil.
- Navegar por Internet mediante WAP (*Wireless Access Protocol*).

Sin embargo fenómenos como la globalización, la convergencia tecnológica o el crecimiento de Internet han propiciado que las necesidades de comunicación de los usuarios

cambien, desbordando la capacidad de GSM. Para poder ofrecer nuevos servicios, se necesita aumentar la capacidad del sistema.

Para esto se ideó un sistema llamado GPRS (*General Packet Radio Services*) que utiliza la mayor parte de la infraestructura de GSM pero de manera más optimizada.

7.2.2. GPRS

Este nuevo sistema, es una evolución de GSM, estandarizado por ETSI dentro de GSM fase 2+ (2.5G), y permite aumentar la velocidad de transmisión y recepción de datos, incorporando la tecnología de conmutación de paquetes en la red de transporte de éste.

GPRS es un servicio paquetizado diseñado para la transmisión frecuente de pequeños volúmenes de datos (navegación por Internet), transmisión infrecuente de volúmenes moderados de datos (acceso a archivos), servicios de transmisión punto a punto y punto a multipunto. Aunque no está diseñado para transmisión de voz paquetizada.

Sin embargo, con esto se logró cubrir las necesidades de servicios de los usuarios en el corto plazo, por lo que GPRS sirve como una transición entre la segunda y la tercera generación de comunicaciones móviles.

Con esta tecnología se puede, por ejemplo, cambiar el método de tarificación de los servicios de acceso móvil a Internet, pasando del cobro por tiempo de conexión al cobro dependiente de la información o las aplicaciones utilizadas y además con una velocidad mayor de navegación.

7.2.3. EDGE

EDGE es un estándar 3G aprobado por la ITU, y está respaldado por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI).

EDGE ofrece servicios de Internet Móvil con una velocidad en la transmisión de datos a tres veces superior a la de GPRS. Además los equipos utilizados en los sistemas EDGE también operan automáticamente en modo GSM.

Mejorar la infraestructura de GSM con EDGE es una manera eficiente de lograr una cobertura de 3G complementaria en la red consistente al volver a emplear lo invertido en la tecnología de 2G.

EDGE se puede desplegar en múltiples bandas del espectro existente 800, 900, 1800 y 1900 MHz, no teniendo la necesidad de negociar con nuevas licencias de frecuencia.

Las principales estrategias y características de EDGE son:

- Incrementar las tasas de bit de GSM.
- Introducir un nuevo esquema de modulación y codificación de canal
- Re-usar tanto de la capa física de GSM como sea posible.

Usa codificación de canal adaptativa y Modulación (GMSK y 8-PSK), soportando tasas de bits de hasta 384 Kbps usando hasta 8 ranuras GSM.

También emplea redundancia incremental a fin de mejorar la eficiencia en el uso del canal apropiado para aplicaciones con requerimientos de retardo relajados.

7.2.4. Transición a la 3era Generación

Existen dos posibles caminos para llegar al sistema UMTS. El primero de ellos consiste en realizar un cambio drástico en la red para pasar directamente de GSM a UMTS. La otra alternativa prevé diferentes etapas de transición de forma que se produzca una evolución gradual.

Desde la tecnología GPRS existen otras dos posibles soluciones hacia UMTS. Una de ellas consistiría en implantar UMTS, cuando la tecnología estuviese suficientemente madura, sustituyendo a GPRS. La otra posibilidad contempla la migración hacia un nuevo sistema, EDGE, con capacidades superiores a las de GPRS, ya muy próximo a los sistemas de tercera generación. El sistema EDGE no se puede desplegar directamente a partir de GSM si previamente no se han introducido cambios en la red de transporte y de acceso para adaptarlas a la conmutación de paquetes.

Aunque las dos vías son posibles, la implantación de EDGE supondría un nuevo cambio en los terminales de usuario, además de una adaptación de la propia red de acceso. En cambio la posibilidad de prolongar la vida de GPRS no supondría una inversión adicio-

nal. La decisión final dependerá de que como se comporte el mercado y de si la capacidad de GPRS es suficiente para dar soporte a las necesidades de los usuarios hasta la llegada de la tercera generación de comunicaciones móviles.

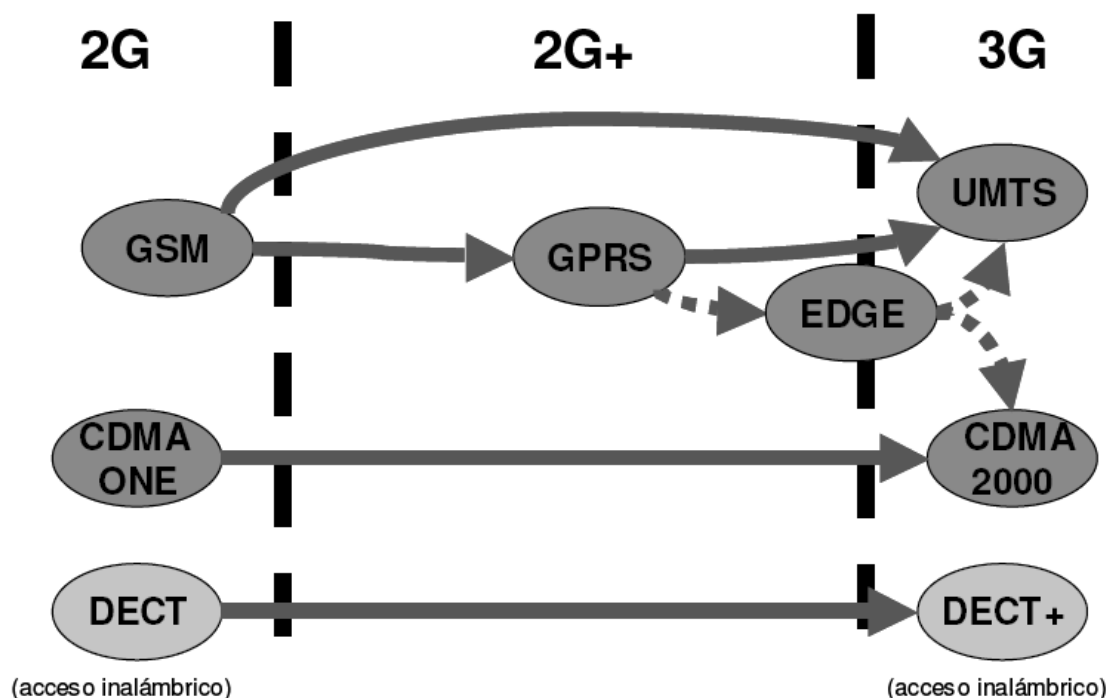


Figura 33: Transiciones posibles entre 2G y 3G.

La Figura 1 muestra las transiciones posibles entre los sistemas de segunda generación y tercera generación con los pasos intermedios mencionados.

La Tabla 2 muestra las velocidades máximas de diferentes sistemas de comunicaciones móviles y ejemplos de servicios para los usuarios.

Tecnología	Velocidad de transmisión	Ejemplos de servicios
GSM	9600 bps	Voz, acceso a Internet a baja velocidad
GPRS	172 kbps (Max)	Voz, acceso a Internet a velocidad media, difusión interactiva de audio comprimido, vídeo interactivo de calidad baja
UMTS	Domestico: 2 Mbps (Max)	Voz, acceso a Internet de alta velocidad, ser-

	Peatonal: 348 Kbps En vehículos: 144 Kbps	vicios audiovisuales interactivos, servicios personalizados dependientes de la ubicación
--	--	--

Tabla 2: Características básicas de los sistemas GSM, GPRS y UMTS

7.2.5. IMT-2000 (3G)

IMT-2000 (Internacional Mobile Telecommunication-2000) es una norma de la ITU creada con el objetivo de valorar y especificar los requisitos que deben tener las normas de las comunicaciones celulares de tercera generación.

Estos sistemas se idean como una solución global de comunicaciones móviles con la capacidad de ofrecer servicios multimedia y de datos a alta velocidad, además de los servicios de voz habituales.

Los objetivos, requisitos y aplicaciones principales que deben tener y soportar los sistemas celulares de tercera generación se presentan a continuación.

7.2.5.1. Objetivos de un sistema de tercera generación

Los objetivos principales según lo expuesto por la ITU para IMT-2000 son:

- Que las tecnologías sean eficaces al momento de entregar servicios de datos y multimedia.
- Que los sistemas desplegados por todo el mundo sean flexibles y transparentes, de modo que se puedan usar en cualquier lugar.
- Utilizar tecnologías convenientes para que los equipos tengan un costo accesible a millones de personas que todavía no poseen teléfono fijo, ni móvil.
- Que los equipos posean la capacidad de utilizar variados sistemas al mismo tiempo.
- En cada lugar del mundo se utilicen y diseñen el mismo tipo de redes móviles.
- Que la calidad de la red se compare con la de la red fija.
- Disponibilidad de servicio de un terminal de bolsillo en cualquier parte del mundo.

7.2.5.2. Requisitos de un sistema de tercera generación

La ITU planteó los siguientes requisitos para los sistemas IMT-2000:

- Alta velocidad en transmisión de datos:
 - Hasta 144 Kb/s de velocidad de datos para terminales en movimiento vehicular.
 - Hasta 384 Kb/s de velocidad de datos para terminales en movimiento peatonal
 - Hasta 2 Mb/s de velocidad de datos para terminales que permanezcan fijos.
- Soporte de transmisión de datos simétrica y asimétrica.
- Aceptar servicios de conmutación de paquetes y de circuito, tales como tráfico Internet (IP) y video en tiempo real.
- Calidad de voz comparable con la calidad ofrecida por sistemas cableados.
- Mayor capacidad y mejor eficiencia del espectro con respecto a los sistemas de segunda generación.
- Soportar sistemas de segunda generación y posibilidad de coexistencia e interconexión con servicios móviles por satélite y con sistemas WiFi.
- Compatibilidad internacional de los sistemas implementados por distintos operadores (Roaming internacional).

7.2.5.3. Aplicaciones soportadas por los sistemas de tercera Generación

Los sistemas de tercera generación deberán proveer soporte para aplicaciones como:

- Voz en banda estrecha a servicios multimedia en tiempo real y banda ancha.
- Apoyo para datos a alta velocidad para navegar por la *world wide web*, entregar información como noticias, tráfico y finanzas por técnicas de empuje y acceso remoto inalámbrico a Internet e intranets.
- Servicios unificados de mensajes como correo electrónico multimedia.
- Aplicaciones de comercio electrónico móvil, que incluye operaciones bancarias y compras móviles.

- Aplicaciones audio/video en tiempo real como videoteléfono, videoconferencia interactiva, audio y música, aplicaciones multimedia especializadas como telemedicina y supervisión remota de seguridad.

7.3. Metodología IDEF-0.

La traducción literal de las siglas IDEF es *Integration Definition for Function Modeling* (Definición de la integración para la modelación de las funciones). IDEF consiste en una serie de normas que definen la metodología para la representación de funciones modeladas.

La metodología IDEF-0 proporciona un marco de trabajo para poder representar y entender los procesos, determinando el impacto de los diferentes sucesos y definiendo como los procesos interactúan unos con otros permitiéndonos identificar actividades poco eficientes o redundantes.

Estos modelos consisten en una serie de diagramas jerárquicos junto con textos y referencias cruzadas entre ambos. Los procesos se representan mediante rectángulos o cajas y una serie de flechas que indican algún tipo relación entre dos procesos. La descripción de cada proceso es considerado como la combinación de cinco magnitudes básicas que se representan gráficamente como:

- Procesos o actividades.
- Entradas (*inputs*)
- Controles
- Mecanismos o recursos para la realización de tareas
- Salidas (*outputs*) o resultados conseguidos en el proceso (que podrán ser a su vez entradas, mecanismos o controles de otros procesos)

Procesos: Se representa por una caja en la cual se encierran todas las actividades que forman parte del proceso.

Entradas: representa el material o la información que es consumida o transformada por el proceso con el objetivo de producir las salidas. Es posible que algunos procesos no tengan entrada.

Salidas: material o información producida por el proceso. Cada proceso, para ser considerado como tal, debe tener al menos una salida.

Controles: reglamentan, limitan o establecen la forma en que los procesos desarrollan sus actividades para producir las salidas a partir de las entradas. Cada proceso debe tener por lo menos un control. Los más comunes son leyes, decretos, normativas, directrices, procedimientos

Mecanismos: aquellos recursos que el proceso necesita y que generalmente no son consumidos durante el mismo. Ejemplo de mecanismo: personal cuantitativa y cualitativa-mente adecuado, máquinas, equipamiento de informática, copiadoras, etc.

Uno de los aspectos de IDEF-0 más importantes es que como concepto de modelación va introduciendo gradualmente más y más niveles de detalle a través de la estructura del modelo. De esta manera, la comunicación se produce dando al lector un tema bien definido con una cantidad de información detallada disponible para profundizar en el modelo.

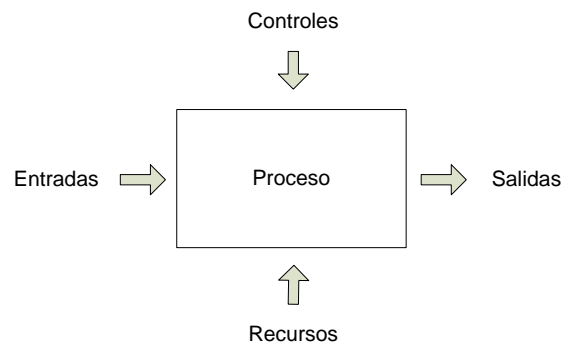


Figura 34: Esquema básico de un sistema IDEF-0

7.4. Teoría de pronóstico

7.4.1. Requisitos básicos de un pronóstico

Hay dos requisitos principales para realizar un pronóstico:

- Debe disponerse de una adecuada provisión de información exacta y relevante del pasado. Esto consistirá generalmente en registros de mediciones de equipos existentes, complementados con información general.

- Debe contarse con una razonable conjetura acerca del desarrollo futuro. Este estimado del desarrollo futuro puede ser una extrapolación del desarrollo pasado, ajustado a veces para tomar en cuenta la información básica disponible. El planificador necesita información histórica precisa para mejorar su pronóstico.

Consecuentemente, la base del pronóstico es el estudio del pasado. Mientras mejor se entienda y se describa matemáticamente el desarrollo pasado, mejores serán nuestras probabilidades de realizar un pronóstico correcto.

También hay que destacar que debe proporcionarse el grado de incertidumbre del pronóstico a fin de que aquéllos que van a utilizar los datos la tomen en cuenta.

7.4.2. Cómo comenzar con un pronóstico

El proceso de pronóstico puede dividirse en las siguientes partes:

- Definición del problema

Debe determinarse el propósito y los supuestos de los pronósticos.

- Recolección de información básica

Se deben investigar varias fuentes para obtener datos básicos. Hay que estudiar el crecimiento poblacional y económico. También son esenciales los resultados de los pronósticos más recientes.

- Selección del método de pronóstico

El método debe escogerse de acuerdo a la información disponible y a la exactitud requerida. La exactitud de un pronóstico puede depender de la precisión estadística de la información histórica y del método de extrapolación usado.

- Análisis y establecimiento de los pronósticos

El análisis consiste en la preparación de la metodología de la información básica y en la evaluación de los resultados obtenidos.

- Documentación

El pronóstico debe presentarse en un formato de fácil entendimiento. El resultado debe contener pronósticos alternativos. Además del pronóstico más probable, debe existir también un pronóstico optimista y otro pesimista, para indicar a la persona que elaborará el plan dónde pueden encontrarse los límites superior e inferior.

7.5. Tráfico MGC - MGW

Para las tareas de control y direccionamiento que realizan los MGC no es necesario que estos reciban la totalidad de la información traficada. De hecho, la comunicación MGW – MSC solo es utilizada para el direccionamiento, inicio y termino de sesión, y control. Para estas tareas se utiliza el protocolo MEGACO.

Este protocolo inicia el canal de comunicación, lo mantiene y finalmente lo desenzala. Un ejemplo de iniciación de una llamada es mostrado en la Figura 35.

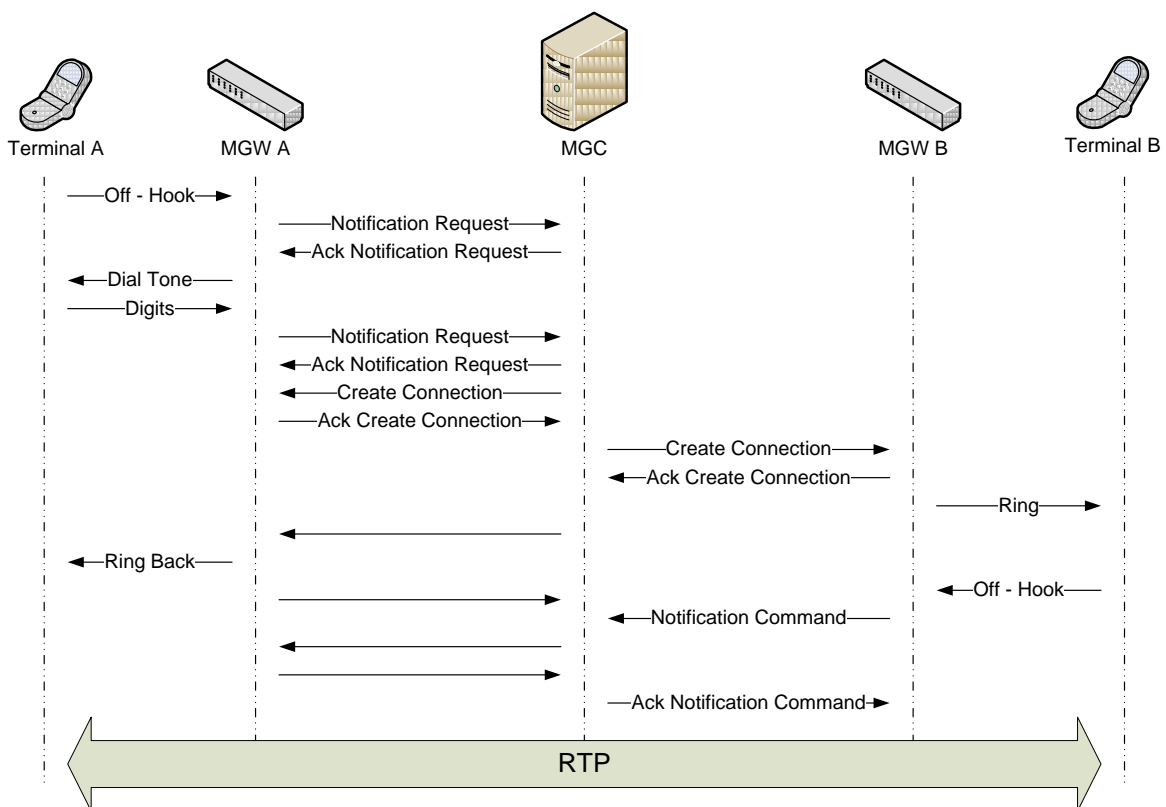


Figura 35: Iniciación de llamada MEGACO

En el tráfico BSC – MGW la voz pasa por algún protocolo de transporte y luego es entregada a los MGW. Con respecto a este tráfico, se ha medido que el tráfico de información MEGACO, entre MGW – MGC, corresponde al 19% del primero. Dos empresas móviles en el último proceso de fijación de cargos de acceso a redes móviles han utilizado este parámetro (aún lo utilizan) y este ha sido aceptado por la Subtel.

APÉNDICE A: LISTA DE ACRÓNIMOS

AN	Access Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AuC	Authentication Center
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station System
BTS	Base Transceiver Station
CCS	Common Channel Signaling
CDMA	Code Division Multiple Access
CE	Customer Equipment / Customer Edge (En contexto de VPN-MPLS)
CN	Core Network
CODEC	Codificador-Decodificador
CPE	Customer Premises Equipment
CS	Circuit Switch
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DiffServ	Differential Services
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIR	Equipment Identity Register

ETSI	European Telecommunications Standardization Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GIS	Geographic Information System
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
H.248	Media Gateway Control Protocol
H.323	ITU Standard for multimedia communications over packet networks
HLR	Home Location Register
IDEF	Integration DEFinition
IETF	Internet Engineering Task Force
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
IPSec	IP Security
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network

LER	Label Edge Router
LSP	Label Switched Paths
LSR	Label Switch Router
MC	Multipoint Controller
MCU	Multipoint Control Unit
ME	Mobile Equipment
MGC	Media Gateway Controller
MGCP	Media Gateway Control Protocol
MGW	Media Gateway
MP	Multipoint Processor
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Centre
NGN	Next Generation Networking
OSI	Open System Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PBX	Private Branch Exchange
PDN	Public Domain Network
PDP	Packet Data Protocol
PLMN	Public Land Mobile Network
PS	Packet Switching

PSK	Phase-Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RTP	Real-time Transport Protocol
SG	Signaling Gateway
SGSN	Service GPRS Support Node
SIGTRAN	Signal Transport
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SS7	Signaling System No 7
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTL	Time To Live
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network

VLR	Visitor Location Register
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide Area Network
WAP	Wireless Application Protocol

APÉNDICE B: TABLAS DE DATOS

Tráficos	año 0	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5
T. Intrad	2,684,402,931	2,979,638,078	3,364,058,684	3,520,640,139	3,659,192,809	3,809,078,391
T. Entrante	1,717,567,218	1,844,174,877	1,931,118,378	1,849,885,992	1,758,339,483	1,693,548,034
T. Saliente	2,044,590,206	2,203,231,861	2,304,327,012	2,194,191,713	2,068,625,921	1,974,926,366
Total	6,446,560,355	7,027,044,816	7,599,504,074	7,564,717,844	7,486,158,213	7,477,552,791

Tabla 3: Tráficos totales en minutos por año

47.076399%	Santiago
0.6215863%	Arica
2.6551272%	Iquique
5.1831975%	Antofagasta
1.9267179%	Copiapó
2.3629502%	La Serena
1.0073652%	Ovalle
4.9372884%	Valparaíso
1.1971591%	Los Andes
1.4122524%	San Antonio
2.2978426%	Quillota
3.5407917%	Rancagua
1.6398885%	Curicó
1.7698809%	Talca
2.0526229%	Linares
2.0318081%	Chillán
5.6540981%	Concepción
1.4996228%	Los Ángeles
3.2648778%	Temuco
3.5152734%	Valdivia
0.8055654%	Osorno
2.1585847%	Puerto Montt
0.6191953%	Coyhaique
0.7699042%	Punta Arenas

Tabla 4: Distribución de tráfico por zona geográfica

Quillota	Valparaíso	Santiago
125	119	0
59	0	119
0	59	125
98	140	80
170	112	119.1
644	633	513
532	529	399
708	634	514
812	793	674
378	442	475
710	744	807
314	378	414
1280	1344	1377
1764	1828	1861
1981	2042	2074
3215	3210	3090
996	960	840
1048	1041	922
1131	1144	1024
1775	1770	1649
392	372	252
222	207	88
445	424	304
316	395	196

Iquique	Antofagasta	Ovalle	Copiapó	La Serena	Temuco	Los Angeles	Chillán	Concepción	San Antonio	Los Andes
1861	1377	414	807	475	674	514	399	513	119.1	80
1828	1344	378	744	442	793	634	529	633	112	140
1764	1280	314	710	378	812	708	532	644	170	98
1818	1334	368	764	432	757	597	487	599	189	0
1969	1485	519	915	583	735	440	447	559	0	189
2374	1890	924	1320	988	333	127	104	0	559	599
2270	1786	820	1216	884	265	105	0	104	447	487
2375	1891	925	1321	989	168	0	105	127	440	597
2535	2051	1085	1481	1149	0	168	265	333	735	757
1390	906	88	336	0	1149	989	884	988	583	432
1054	570	473	0	336	1481	1321	1216	1320	915	764
1527	1043	0	473	88	1085	925	820	924	519	368
493	0	1043	570	906	2051	1891	1786	1890	1485	1334
0	493	1527	1054	1390	2535	2375	2270	2374	1969	1818
307	723	1744	1267	1603	2748	2588	2486	2588	2182	2031
4943	4451	3502	3890	3564	2413	2575	2677	2700	3138	3170
2701	2217	1251	1647	1315	166	334	431	499	899	921
2783	2299	1333	1729	1397	248	416	513	581	971	993
2885	2401	1435	1831	1499	350	518	615	683	1074	1096
3503	3011	2064	2451	2124	973	1135	1243	1260	1698	1730
2113	1629	663	1134	727	422	262	157	261	317	337
1949	1465	499	895	563	590	430	325	429	145	167
2165	1681	715	1111	779	370	210	111	209	372	390
2057	1573	607	1003	671	492	332	227	331	228	271

Curicó	Linares	Rancagua	Talca	Coyhaique	Puerto Montt	Osorno	Valdivia	Punta Arenas	Arica
196	304	88	252	1649	1024	922	840	3090	2074
395	424	207	372	1770	1144	1041	960	3210	2042
316	445	222	392	1775	1131	1048	996	3215	1981
271	390	167	337	1730	1096	993	921	3170	2031
228	372	145	317	1698	1074	971	899	3138	2182
331	209	429	261	1260	683	581	499	2700	2588
227	111	325	157	1243	615	513	431	2677	2486
332	210	430	262	1135	518	416	334	2575	2588
492	370	590	422	973	350	248	166	2413	2748
671	779	563	727	2124	1499	1397	1315	3564	1603
1003	1111	895	1134	2451	1831	1729	1647	3890	1267
607	715	499	663	2064	1435	1333	1251	3502	1744
1573	1681	1465	1629	3011	2401	2299	2217	4451	723
2057	2165	1949	2113	3503	2885	2783	2701	4943	307
2270	2378	2162	2326	3712	3098	2996	2914	5152	0
2899	2786	3003	2833	1580	2286	2177	2284	0	5152
658	536	756	588	844	210	107	0	2284	2914
740	624	838	670	743	108	0	107	2177	2996
842	720	940	772	634	0	108	210	2286	3098
1459	1346	1563	1393	0	634	743	844	1580	3712
70	52	164	0	1393	772	670	588	2833	2326
113	220	0	164	1563	940	838	756	3003	2162
122	0	220	52	1346	720	624	536	2786	2378
0	122	113	70	1459	842	740	658	2899	2270

Tabla 5: Distancias camineras entre zonas primarias [Km]

Tasa de costo de capital	10.89%
\$/US\$	500
64kbps/Erlang	1
E1/Erlang	30
2Mbps/Erlang	30
Vida Útil [años]	9

Tabla 6: Tasas y razones de conversión

Tipo de enlace	Zona de aplicación	Costo	
Fibra óptica	Entre conmutadores	$683 \left[\frac{\$}{\text{Km}-2\text{Mbps}-\text{Mes}} \right]$	
Microondas	Entre un conmutador y una central de demanda	Santiago	$102153 \left[\frac{\$}{\text{E1}-\text{Mes}} \right]$
		Resto del país	$61292 \left[\frac{\$}{\text{E1}-\text{Mes}} \right]$
Enlace satelital (Coyhaique y Punta Arenas)	Entre conmutadores	$671.895308 \left[\frac{\text{US\$}}{64\text{kbps}-\text{Mes}} \right]$	

Tabla 7: Costos de enlaces

Equipo	Costo [US\$]	Capacidad [Erlangs]
SNSE 500	3592134.8	500
SNSE 1000	3595740.9	1000
SNSE 1500	3623010.2	1500
SupNode 2000	3855149.2	2000
SupNode 6000	4087644.4	6000
SupNode 12000	4760396.1	12000

Puerta	2474.8	1
--------	--------	---

Tabla 8: Características de equipos de telecomunicaciones caso centralizado

Equipo	Costo [US\$]	Capacidad [Erlangs]
MGW 3900 scc	932873	390
MGW 7800 scc	1679901	7800
MGW 18000 scc	3257725	18000
MSC 8864 scc	3501468	8864
MSC 12600 scc	5272100	12600
MSC 33447 scc	11721223	33447

Tabla 9: Características de equipos de telecomunicaciones caso distribuido