



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA

PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE UNA RED DE  
TELECOMUNICACIONES DE TERCERA GENERACIÓN BASADA  
EN COSTO - BENEFICIO PARA DAR COBERTURA DE INTERIOR  
AL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LOS CABOS BCS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA (INGENIERÍA EN SISTEMAS)  
ORIENTACIÓN: INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

P R E S E N T A

AIDA HUERTA BARRIENTOS



DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTES

MEXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## Resumen

Se desarrolla el presente trabajo de investigación para obtener el grado de Maestría en Ingeniería de Sistemas en el área de Investigación de Operaciones.

Se aborda el problema de la planificación óptima de la red radio con base en costo-beneficio de una red móvil de telecomunicaciones de tercera generación (3G) para dar cobertura al interior del aeropuerto internacional de Los Cabos Baja California Sur utilizando tecnología UMTS.

El objetivo general de la investigación es determinar el radio de celda que maximice la relación costo-beneficio de la red.

El procedimiento de solución al problema abordado está basado en el desarrollo de dos modelos, uno de generación de tráfico UMTS y otro de costo –beneficio de la configuración de red propuesta. El modelo de generación de tráfico UMTS se diseña con base en una demanda especificada de servicios y aplicaciones y de acuerdo a parámetros teóricos propuestos para cada elemento de la red radio y se simula con el simulador ARENA™. El modelo de costo-beneficio se diseña con base en la inversión inicial, en los costos de operación anuales de la red propuesta y en los ingresos obtenidos por el tráfico cursado por la red.

El resultado final es el análisis económico de los costos e ingresos netos de la red en función del radio de cobertura de las celdas, de éste análisis se selecciona el radio de celda que maximiza la relación costo-beneficio y satisface la demanda de servicios y aplicaciones requeridos por el usuario.

## Abstract

This document is the research thesis for the degree of Master in Engineering of Systems in the area of Operations Research.

The problem to solve is the optimum radio network planning based on cost-revenue of the telecommunications mobile network of third generation in order to obtain the indoor coverage in Los Cabos Baja California Sur airport using UMTS technology.

The general objective is to obtain the cell range which maximizes the relation cost-revenue.

The proceeding to solve the problem is based on the development of two models, one is traffic generation model and another is cost-revenue model for the network proposed. The traffic model is based on the services and the applications demand and it is according to the theoretical parameters proposed of the radio network elements and the simulation is developed with the simulator ARENA™. The cost-revenue model is based on the investment, on the operation and maintenance annual costs and on the revenues due to the traffic on the network.

The result is the analysis of the economic impact on network costs and revenues as function of the range cell. Finally, the range cell which maximizes the relation cost-revenue is selected.

## Agradecimientos

A Dios, por permitirme iniciar y terminar este proyecto en mi vida profesional y académica.

A mis padres, por darme la vida, por su apoyo a lo largo de todos mis estudios y por entender mis proyectos profesionales.

A CONACYT, por creer en mí y haberme otorgado la beca durante mis estudios de maestría en México.

A la Dra. Mayra Elizondo Cortés, por su paciencia y apoyo en la dirección de este trabajo de tesis, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible la conclusión de este trabajo.

A Dr. Ricardo Aceves, Dr. Benito Lara, Dra. Cozumel Monroy y a la Dra. María Elena Lárraga, por su paciencia en la revisión de este trabajo de tesis y su contribución en la mejora del contenido.

A Benjamin Elvira, por la motivación que me brindó a lo largo de los estudios de maestría y desarrollo del trabajo de tesis.

Al Departamento de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, por todo el apoyo y compañerismo que he recibido de todos sus miembros, en especial del Dr. Víctor García Garduño.

Al Departamento de Posgrado de Ing. en Sistemas, Facultad de Ingeniería, por haber creído en mi capacidad, profesionalismo y haberme aceptado en el programa de Maestría en Investigación de Operaciones. Por el valioso aprendizaje que he recibido de todos los profesores.

A la UNAM, por haberme abierto una vez más sus puertas y contribuir de forma muy positiva a mi crecimiento personal y profesional.

*Por mi raza hablará el espíritu,*

*UNAM*

Tabla de Contenido	Página
Agradecimientos.....	III
Tabla de contenido.....	IV
Lista de Gráficos.....	VI
Lista de Figuras.....	VII
Lista de Tablas.....	VIII
Glosario de Acrónimos.....	X
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
i. Planteamiento del problema.....	4
ii. Formulación de los objetivos.....	6
iii. Estrategia de solución al problema.....	6
iv. Resumen del contenido.....	7
<b>Capítulo 1. El problema de la planificación de redes móviles de telecomunicaciones y conceptos relacionados.....</b>	<b>8</b>
1.1. Redes móviles de telecomunicaciones.....	8
1.1.1. Arquitectura de una red móvil de telecomunicaciones.....	9
1.1.2. Planificación de una red móvil de telecomunicaciones.....	11
1.1.3. Servicios y aplicaciones en una red móvil de telecomunicaciones.....	13
1.1.4. Modelo de movilidad de usuarios.....	17
1.1.5. Modelo de pérdida por trayectoria en interiores.....	18
1.1.6. Modelo de generación de tráfico en redes móviles de telecomunicaciones.....	19
1.1.7. Modelo costo-beneficio de la red radio.....	22
1.2. Uso de la simulación en la planificación de redes móviles de telecomunicaciones.....	24
1.2.1. Casos de aplicación en los que se ha utilizado la simulación en la planificación de redes móviles de telecomunicaciones.....	24
<b>Capítulo 2. Un modelo para la simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones.....</b>	<b>26</b>
2.1. Descripción del modelo de simulación.....	27
2.1.1. Generalidades del modelo.....	27
2.2. Elaboración del modelo conceptual.....	30
2.3. Información numérica del modelo.....	31
2.4. Selección del software de simulación.....	32
2.5. Descripción del software ARENA™.....	34
2.6. Desarrollo del modelo de simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones.....	35
2.7. Verificación y validación del modelo de simulación.....	36

	Página
<b>Capítulo 3. Diseño de experimentos y análisis de resultados</b> .....	42
3.1. El diseño de experimentos.....	42
3.2. Ejecución y análisis de experimentos.....	43
3.3. Análisis de resultados.....	55
<b>Capítulo 4. Análisis de relación costo-beneficio</b> .....	57
4.1. Análisis costo- beneficio.....	57
4.1.1. Costo anual de la red radio.....	57
4.1.2. Ingreso anual de la red radio.....	60
4.1.3. Beneficio neto anual de la red radio.....	68
<b>Capítulo 5. Conclusiones generales y recomendaciones</b> .....	71
Conclusiones generales.....	71
Recomendaciones.....	71
Matriz de oportunidades en investigaciones futuras.....	72
<b>Referencias</b> .....	73
<b>Anexos</b> .....	75
Anexo 1. Función de distribución de Poisson.....	75

## Lista de Gráficos

Página

Gráfico 1.	Suscriptores de servicios de telecomunicaciones en el mundo, por segmento, 1997-2007, y proyecciones, 2008-2011 .....	2
Gráfico 2.	Mercado mundial de servicios de telecomunicaciones, ingresos por segmento, 2002-2007 y proyección para 2011.....	2
Gráfico 3.	Suscriptores de telefonía móvil de tercera generación en el mundo, por tecnología 2003-2007, y proyecciones para 2008-2012.....	3
Gráfico 4.	Suscriptores de telefonía móvil de tercera generación en el mundo, por tecnología 1995-2007.....	3
Gráfico 5.	Crecimiento de tráfico global.....	19
Gráfico 6.	Distribución de llamadas generadas.....	31
Gráfico 7.	Resultados de simulación capacidad de red variable.....	37
Gráfico 8.	Porcentaje de utilización de llamadas procesadas.....	38
Gráfico 9.	Llamadas procesadas 1 día – 1 canal.....	40
Gráfico 10.	Llamadas procesadas 80 días- 1 canal .....	40
Gráfico 11.	Llamadas procesadas 1 día – 300 canales .....	41
Gráfico 12.	Llamadas procesadas 80 días – 300 canales .....	41
Gráfico 13.	Llamadas procesadas, capacidad en red 21 canales .....	49
Gráfico 14.	Llamadas procesadas, capacidad en red 42 canales .....	50
Gráfico 15.	Llamadas procesadas, capacidad en red 48 canales .....	51
Gráfico 16.	Llamadas procesadas, capacidad en red 70 canales .....	52
Gráfico 17.	Llamadas procesadas, capacidad en red 84 canales .....	53
Gráfico 18.	Llamadas procesadas, capacidad en red 98 canales .....	54
Gráfico 19.	Resumen de llamadas procesadas promedio por tipo para diferentes capacidades de red.....	55
Gráfico 20.	Resumen de llamadas procesadas promedio para diferentes capacidades de red.....	56
Gráfico 21.	Costos anuales totales para diferentes capacidades de red.....	60
Gráfico 22.	Ingresos anuales totales para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.....	67
Gráfico 23.	Beneficio neto anual para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.....	68
Gráfico 24.	Beneficio anual en porcentaje para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.....	69

Lista de Figuras	Página
Figura 1. Evolución de tecnologías de comunicaciones móviles.....	4
Figura 2. Elementos de la red UMTS.....	4
Figura 3. Metodología de resolución de la problemática.....	5
Figura 4. Estrategia de solución al problema.....	6
Figura 5. Arquitectura de red UMTS.....	9
Figura 6. Diferentes tipos de celdas en redes UMTS.....	10
Figura 7. Organización de un proyecto de planificación de la red radio.....	11
Figura 8. Diferentes posibilidades de desplazamiento de usuarios.....	17
Figura 9. Aspectos económicos de una red celular de telecomunicaciones.....	22
Figura 10. Pasos de la metodología de simulación.....	26
Figura 11. Aeropuerto Internacional de Los Cabos, BCS.....	27
Figura 12. Terminal del aeropuerto internacional de Los Cabos, BCS.....	28
Figura 13. Diagrama de flujo de la generación de tráfico.....	30
Figura 14. Estructura jerárquica de ARENA™.....	35
Figura 15. Modelo en ARENA™.....	36
Figura 16. Matriz de escenarios extremos.....	39
Figura 17. Matriz de oportunidades en investigaciones futuras.....	72



## Lista de Tablas

## Página

Tabla 1.	Criterios que afectan la planificación de la red radio.....	12
Tabla 2.	Jerarquías de servicios.....	14
Tabla 3.	Aplicaciones más utilizadas.....	15
Tabla 4.	Correspondencia entre servicios y aplicaciones.....	16
Tabla 5.	Requerimientos de distribución de aplicaciones.....	16
Tabla 6.	Parámetros de movilidad.....	18
Tabla 7.	Parámetros de tráfico para aplicaciones.....	20
Tabla 8.	Tasa de transmisión para servicios y aplicaciones.....	21
Tabla 9.	Porcentaje de utilización para servicios y aplicaciones.....	21
Tabla 10.	Especificaciones de duración y tasa de transmisión para cada aplicación.....	22
Tabla 11.	Especificaciones de la terminal del aeropuerto internacional de Los cabos.....	28
Tabla 12.	Relación teórica de número de celdas y radio de cobertura.....	32
Tabla 13.	Ventajas y desventajas de los paquetes de propósito específico.....	33
Tabla 14.	Resultados de simulación para casos extremos .....	39
Tabla 15.	Número, radio y capacidad de celda.....	42
Tabla 16.	Resultados de experimentos de simulación.....	43
Tabla 17.	Resumen de llamadas procesadas para diferentes capacidades de red .....	55
Tabla 18.	Costos de equipos, instalación y O&M.....	58
Tabla 19.	Costos anuales totales para diferentes configuraciones de red.....	59
Tabla 20.	Carga [kb/s] en la red generada por cada tipo de llamada.....	61
Tabla 21.	Carga [kb/s] en la red total generada en un día con hora pico.....	61
Tabla 22.	Tarifas de servicios 3G tecnología UMTS TELCEL.....	62
Tabla 23.	Tarifas de servicios 3G con tasa de transmisión de 128 [kb/s].....	62
Tabla 24.	Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 2MB.....	63
Tabla 25.	Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 10MB.....	63

	<b>Página</b>
<b>Tabla 26.</b> Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 20MB.....	64
<b>Tabla 27.</b> Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 50MB.....	64
<b>Tabla 28.</b> Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 150MB.....	65
<b>Tabla 29.</b> Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 500MB.....	65
<b>Tabla 30.</b> Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete 1 GB.....	66

## Glosario de Acrónimos

**AI**, Air Interface

**ATM**, Asynchronous Transfer Mode

**BTS**, Base Transceiver Stations

**CDMA**, Code Division Multiple Access

**ETSI**, European Telecommunications Standards Institute

**FTP**, Data File Transfer

**GRAN**, Generic Radio Access Network

**GSM**, Global Mobile System

**HSDPA**, High Speed Downlink Packet

**IP**, Internet Protocol

**ISDN**, Integrated Services Digital Network

**ITU**, International Telecommunication Union

**QoS**, Quality of Service

**RNC**, Resources Network Controller

**TDMA**, Time Division Multiple Access

**UMTS**, Universal Mobile Telecommunication System

**UTRA**, UMTS Terrestrial Radio Access

**2 G**, Segunda Generación de redes de telecomunicaciones móviles

**2.5 G**, Segunda y Media Generación de redes de telecomunicaciones móviles

**3 G**, Tercera Generación de redes de telecomunicaciones móviles

**W-CDMA**, Wideband-Code Division Multiple Access

## Introducción

Mi trabajo de tesis tiene su origen en la aplicación del área de Investigación de Operaciones en el área de las telecomunicaciones.

Por un lado, mis estudios de licenciatura en conjunto con mi trabajo profesional en el área de telecomunicaciones móviles me han permitido conocer de cerca el proceso de planificación de redes móviles de telecomunicaciones.

Por otro lado, mis estudios de maestría en el área de sistemas me han permitido conocer y aplicar las herramientas de optimización y simulación de redes, por lo que en su conjunto, mis conocimientos en estas dos grandes áreas de la ingeniería me han permitido desarrollar un modelo que simula el tráfico de una red móvil de telecomunicaciones y con base en el tráfico simulado se estima la configuración óptima de la red móvil a instalar con base en el costo beneficio de la misma configuración.

El criterio de una planificación de una red móvil de telecomunicaciones con base en costo beneficio surge del actual estado de desarrollo de las telecomunicaciones a nivel mundial. En el siglo pasado, el criterio que se utilizaba para la planificación de una red móvil de telecomunicaciones era la cobertura y de esta forma se logró que muchas ciudades, poblaciones y carreteras tuvieran el servicio que actualmente poseen. En el presente siglo y de acuerdo a las condiciones económicas mundiales, interesa que cualquier red móvil de telecomunicaciones que se diseñe, construya y opere sea lo suficientemente rentable para la compañía operadora, es por eso que personalmente me ha resultado de suma importancia presentar en mi tesis de maestría la planificación de una red de telecomunicaciones basada en costo-beneficio.

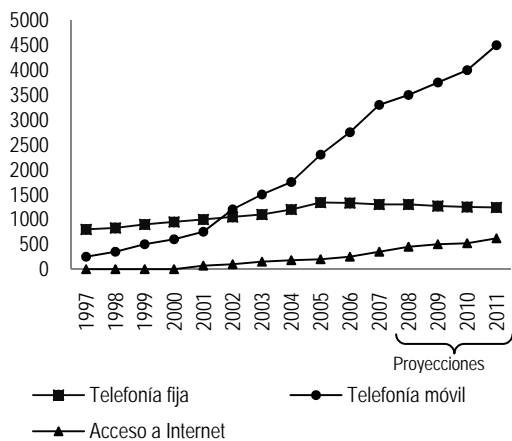
En el desarrollo de la tesis se presentan tecnicismos de telecomunicaciones y sistemas con los cuales posiblemente el lector no esté familiarizado y por lo mismo se han incluido un glosario de acrónimos y las referencias que el lector puede consultar para ampliar su conocimiento de lo que se menciona en este trabajo de tesis.

## Antecedentes

En los años noventa, la industria de las telecomunicaciones sufrió profundos cambios, provocados por la innovación tecnológica, el incremento de la competencia, la privatización de las empresas estatales y la expansión internacional de los principales operadores de telefonía. Con la rápida irrupción de Internet, el sector registró un auge sin precedentes. No obstante, al inicio de la presente década, la tendencia a la sobrevaloración irracional de la industria bruscamente se invirtió, lo que afectó a la gran mayoría de los agentes vinculados a las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC). A partir de ese momento, el sector de las telecomunicaciones entró en un intenso proceso de transformación. Los cambios tecnológicos y el desarrollo de nuevos servicios están repercutiendo en las actividades centrales de los operadores de telecomunicaciones. El gran desafío para las empresas de la industria es reorientarse hacia aquellos servicios de alto valor agregado que están emergiendo, para los cuales se requieren significativas inversiones en nuevas tecnologías de redes.

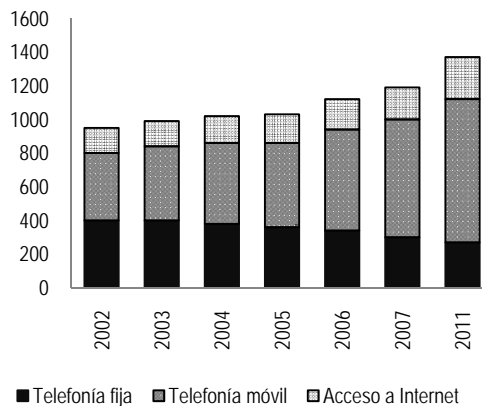
En la actualidad, los servicios de voz continúan siendo el principal impulsor del mercado de las telecomunicaciones. Sin embargo, este segmento y la estructura de los ingresos de la industria están cambiando, primero con el espectacular crecimiento de la telefonía móvil y más recientemente, como resultado del desarrollo del acceso a Internet de banda ancha. De hecho, la telefonía móvil superó rápidamente a la telefonía fija en términos de usuarios e ingresos como se muestra en el Gráfico 1. En 2006, los servicios de telefonía móvil representaron cerca de la mitad de los ingresos de la industria mundial de las telecomunicaciones y los suscriptores de esos servicios duplicaron con creces a los de telefonía fija como se muestra en el Gráfico 2.

**Gráfico 1. Suscriptores de servicios de telecomunicaciones en el mundo, por segmento, 1997-2007, y proyecciones, 2008-2011**  
(En millones de suscriptores)



**Fuente:** Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de información del Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe (IDATE).

**Gráfico 2. Mercado mundial de servicios de telecomunicaciones, ingresos por segmento, 2002-2007 y proyección para 2011**  
(En miles de millones de dólares)

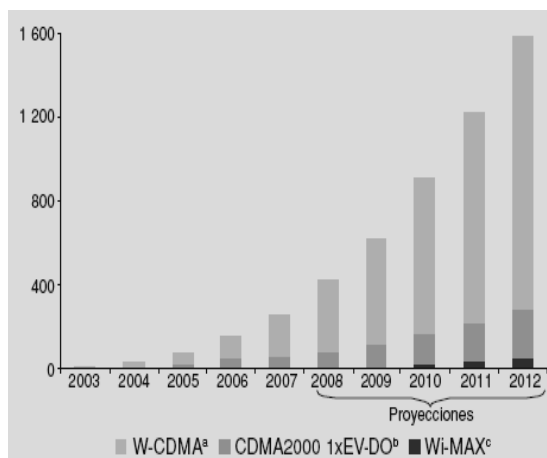


**Fuente:** Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de información del Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe (IDATE).

Las empresas de telecomunicaciones han procurado mejorar sus plataformas inalámbricas y avanzar hacia nuevas soluciones para la prestación de servicios convergentes. Entre las alternativas tecnológicas disponibles, las redes para comunicaciones móviles avanzadas, más conocidas como redes de tercera generación o 3G, en primer lugar, estarían transformándose en una buena opción ante la incertidumbre que enfrentan los operadores de redes fijas. En segundo lugar, permitirían crear nuevas aplicaciones que podrían complementar los servicios inalámbricos de voz, cuyos beneficios comienzan a registrar un retroceso significativo. Por último, las comunicaciones móviles, al haber funcionado desde sus comienzos en entornos competitivos, tendrían menor incertidumbre regulatoria que las opciones fijas.

A partir de los estándares más difundidos de segunda generación, GSM(Global Mobile System) y CDMA(Code Division Multiple Access), los principales operadores comenzaron a definir su trayectoria tecnológica para obtener mejores prestaciones en el ámbito inalámbrico y móvil. A principios de la presente década, Japón y República de Corea tuvieron experiencias comerciales pioneras en telefonía móvil de tercera generación. En octubre de 2000, el operador coreano SK Telecom lanzó un servicio que permitía transmitir datos a mayor velocidad que a través de las redes de telefonía fija, utilizando la tecnología CDMA2000 1x, la cual es considerada como la primera tecnología oficial de tercera generación. Al año siguiente, el operador japonés NTT DoCoMo lanzó la primera red comercial de la familia de GSM (W-CDMA). En 2001, la introducción de la tecnología de tercera generación dio un nuevo dinamismo al mercado japonés de telefonía móvil. NTT DoCoMo, Softbank Telecom y KDDI comenzaron a prestar servicios de tercera generación, mediante licencias gratuitas, con la obligación de ofrecer cobertura a la mitad de la población en un plazo de cinco años. A fines de 2007, cerca de 300 millones de usuarios de todo el mundo utilizaban la versión más antigua de la tecnología de tercera generación, CDMA2000 1x; mientras que las tecnologías más modernas, W-CDMA y CDMA2000 1x EV-DO, tenían más de 190 y 62 millones de suscriptores, respectivamente como lo indica el Gráfico 3 y 4.

**Gráfico 3. Suscriptores de telefonía móvil de tercera generación en el mundo, por tecnología 2003-2007, y proyecciones para 2008-2012**  
(En millones de suscriptores)



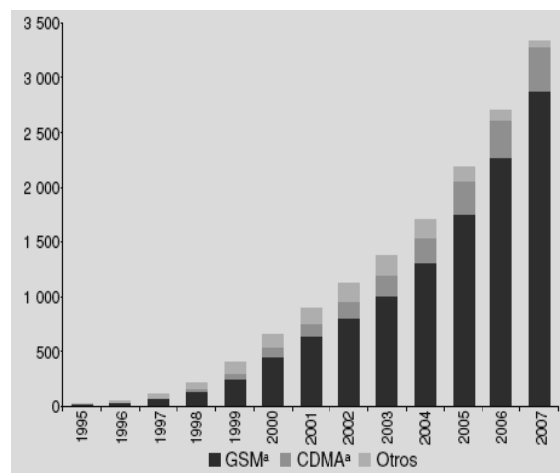
**Fuente:** Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de 3G Americas [en línea] <http://www.3gamericas.com>; Informa Telecoms & Media, World Cellular Information Service (WCIS) y Senza Fili Consulting LLC.

<sup>a</sup> Acceso múltiple por división de códigos de banda ancha.

<sup>b</sup> CDMA 200 1x con tecnología de evolución de datos.

<sup>c</sup> Interoperabilidad mundial para acceso por microonda.

**Gráfico 4. Suscriptores de telefonía móvil en el mundo por tecnología, 1995-2007**  
(En millones de suscriptores)

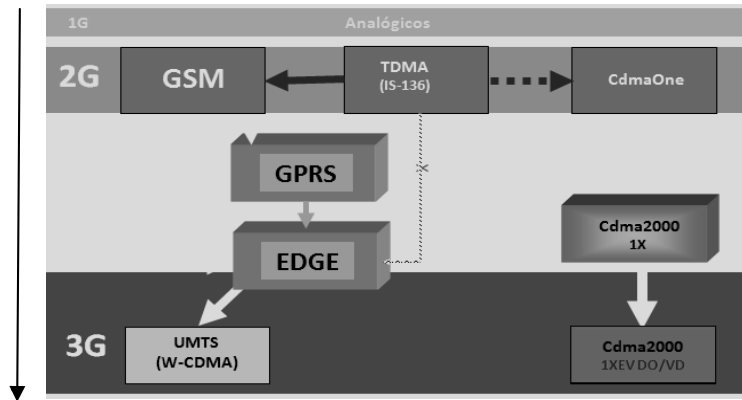


**Fuente:** Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de GSM World [en línea] <http://www.gsmworld.com>

<sup>a</sup> Incluye actualizaciones de tercera generación.

Los operadores más importantes del mundo se han inclinado por la familia de tecnologías GSM/W-CDMA y posteriores actualizaciones UMTS(Universal Mobile Telecommunication System) (HSDPA/ HSUPA). Las más fieles han sido las empresas europeas, cuya gran mayoría ha adoptado desde un comienzo esta trayectoria tecnológica. La masiva adopción de la tecnología UMTS HSDPA ha permitido aumentar el ancho de banda de la tecnología de tercera generación, y la estandarización de las plataformas de servicios IP deberían favorecer la aparición de una oferta más variada de servicios en Europa de acuerdo a la CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2008).

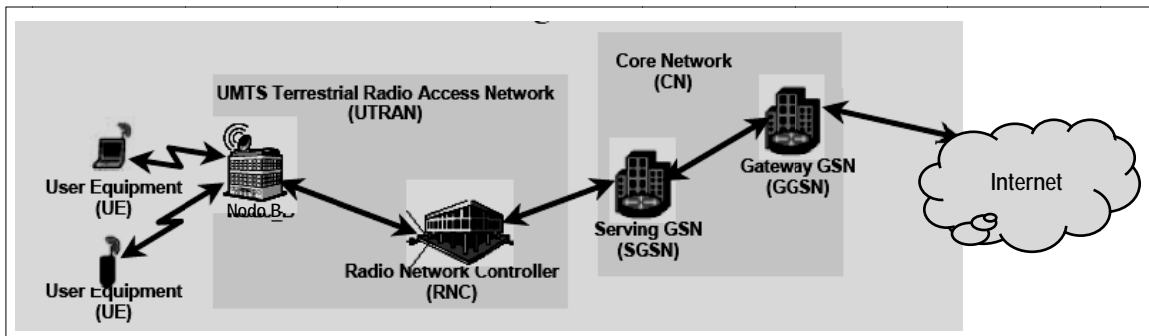
Figura 1. Evolución de tecnologías de comunicaciones móviles



Fuente: Elaboración propia con base en la información de operadores de redes.

Técnicamente, el desarrollo de la tecnología de tercera generación (UMTS) no solamente introduce una nueva interfaz radio (interfaz entre terminales móviles y los controladores propios de la red), sino también, la posibilidad de distribuir una gran variedad de servicios móviles, situación que afecta directamente la planificación de la red.

Figura 2. Elementos de la red UMTS



Fuente: Elaboración propia con base en la información técnica de redes UMTS.

#### i. Planteamiento del problema

##### Problema concreto por resolver

El problema teórico del área de Investigación de Operaciones que se aborda es la planificación óptima de redes bajo el criterio de costo-beneficio. De esta forma en este trabajo de tesis se determinará la configuración de red que optimiza la relación costo-beneficio para dar cobertura al aeropuerto internacional de Los Cabos Baja California Sur.

##### Importancia del problema

El proceso de la planificación de una red móvil de telecomunicaciones es el proceso de mayor importancia en el diseño, despliegue y operación de una red ya que en este proceso se determina la configuración óptima que tendrá una red bajo el criterio de utilización de los recursos de la misma.

### Aportaciones y conocimiento que se agrega al área de investigación

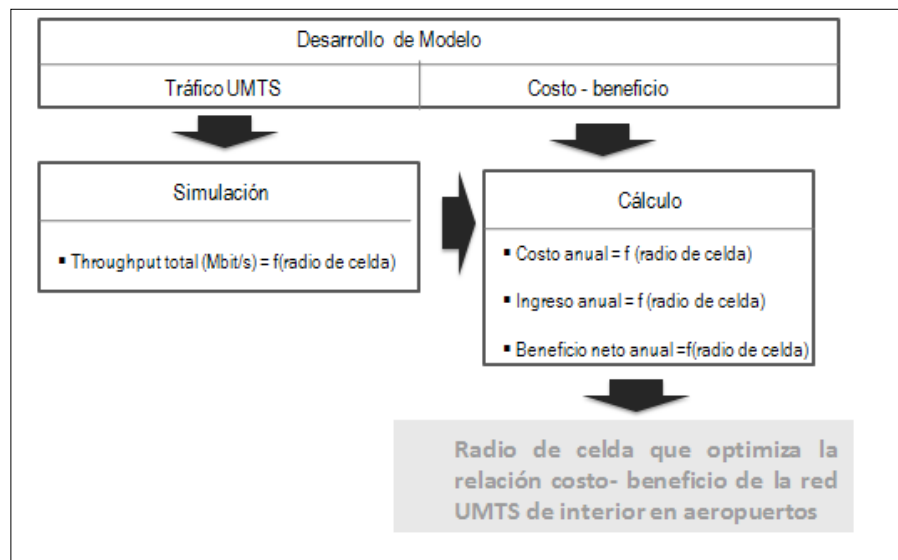
La contribución que se hace al área de Investigación de Operaciones es un procedimiento para la planificación óptima de redes móviles de telecomunicaciones de tercera generación que incluye el desarrollo de dos modelos, uno de tráfico y otro de costo-beneficio así como la simulación del modelo de tráfico cuyos resultados se utilizan para determinar el radio de celda correspondiente a la configuración de red óptima bajo el criterio de costo-beneficio.

### ¿Cómo se pretende resolver?

Se propone el siguiente procedimiento para resolver el problema de la planificación óptima de redes móviles de telecomunicaciones bajo el criterio de costo-beneficio y se describe en la Figura 3.

- Desarrollar un modelo de simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones.
- Simular el modelo de tráfico con ayuda del software ARENA™.
- De la simulación, obtener la demanda de capacidad de la red radio medida en Mbits/s como función del radio de celda.
- Proponer un modelo de costo-beneficio anual de la red, el cual también queda en función del radio de celda.
- De éste último modelo y con base en la demanda de tráfico que debe satisfacerse, obtener el radio de celda que maximiza la relación de costo-beneficio de la red de telecomunicaciones diseñada.

Figura 3. Procedimiento para la planificación óptima de una red de telecomunicaciones.



Fuente: Elaboración propia.



## ii. Formulación de los objetivos

### Objetivo general

Determinar la configuración de red que optimiza la relación costo – beneficio de los recursos de la misma en el escenario del aeropuerto internacional de Los Cabos.

### Objetivos específicos

1. Caracterizar los escenarios de simulación de tráfico de red en ambientes de aeropuertos.
2. Establecer los parámetros teóricos de la red radio de telecomunicaciones.
3. Desarrollar el modelo de costo-beneficio de una red de telecomunicaciones.
4. Desarrollar el modelo de simulación de tráfico de red, utilizando el simulador ARENA™.
5. Determinar el tráfico y el costo-beneficio para distintas configuraciones de la red de telecomunicaciones que dará cobertura de interior al aeropuerto internacional de Los Cabos BCS.

## iii. Estrategia de solución al problema

La estrategia de solución que se propone en el presente trabajo de investigación es el que se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Estrategia de solución al problema



Fuente: Elaboración propia.

Se inicia con una revisión bibliográfica de fuentes, principalmente libros sobre redes de tercera generación que operan con la tecnología de tercera generación y artículos publicados como resultado de la investigación ya realizada en proyectos europeos principalmente. Con base en la información obtenida de la revisión bibliográfica, se diseñan dos modelos, uno de tráfico y el otro, de costo-beneficio de la red.

El modelo de tráfico se simula con ayuda del simulador ARENA™ y los resultados obtenidos de forma gráfica, junto con el modelo de costo-beneficio, se utilizan para analizar el impacto económico de la

planificación en función del radio de las celdas planificadas. Con base en el análisis, se selecciona el radio de cobertura de las celdas planificadas que maximiza la relación costo-beneficio de la red.

La justificación de la utilización de la herramienta de simulación para la estimación del tráfico cursado en la red UMTS radica principalmente en dos hechos, el primero, es el proceso de arribo de las llamadas a una red y el segundo, la duración de las llamadas dentro la red, que se traduce en la utilización de los recursos de la red.

En relación al proceso de arribo de las llamadas a la red, éste se caracteriza por ser un Proceso de Poisson, en el cual, las llamadas arriban a la red conforme a una tasa especificada en la unidad de tiempo.

En relación a la duración de las llamadas dentro de la red de telecomunicaciones de tercera generación, éstas tienen la particularidad de que su duración está determinada por una función probabilística, específicamente, funciones exponenciales con una duración media.

Por todo lo anterior, no sería posible realizar las estimaciones del tráfico con métodos determinísticos, por ejemplo.

#### **iv. Resumen del contenido**

El contenido del trabajo de investigación presentado en esta tesis, se ha dividido en 4 capítulos.

En el capítulo 1, se hace una breve descripción de las redes de tercera generación así como del uso de la simulación en el proceso de su planificación. Se analizan los conceptos básicos del proceso de planificación de redes móviles. Se enuncian los servicios y aplicaciones que son posibles transmitir a través de una red móvil de telecomunicaciones. Se desarrollan el modelo de generación de tráfico y el modelo de costo-beneficio de la red radio y se indican los casos en que se ha utilizado la simulación en la planificación de la red radio.

En el capítulo 2, se describe el modelo de simulación y se elabora el modelo conceptual. Se recaba la información numérica del sistema, se describe el software a utilizar se desarrolla el modelo de simulación el cual se verifica y se valida.

En el capítulo 3, se lleva a cabo el diseño de experimentos, su ejecución y análisis de los resultados.

En el capítulo 4, se analiza la relación costo-beneficio correspondiente a la planificación de la red radio y se determina el radio de cobertura de las celdas que maximiza dicha relación.

En el capítulo 5, se enuncian las conclusiones generales del trabajo de tesis, se emiten recomendaciones y se elabora una matriz de oportunidades para investigaciones futuras.

Por último, se presentan las referencias y anexos utilizados en la elaboración de la tesis.

## Capítulo 1. El problema de la planificación de redes móviles de telecomunicaciones y conceptos relacionados

### Objetivos

- Describir la arquitectura de una red móvil de telecomunicaciones.
- Caracterizar los servicios y las aplicaciones en una red móvil de telecomunicaciones.
- Desarrollar el modelo de tráfico y el modelo costo-beneficio de una red móvil de telecomunicaciones.
- Describir el uso de la simulación en la planificación de redes móviles de telecomunicaciones.

En el Capítulo 1 se describe la arquitectura de una red móvil de telecomunicaciones, se caracterizan los servicios y aplicaciones que pueden ser distribuidos sobre dicha red y se desarrolla el modelo de tráfico y el modelo costo-beneficio de la red con base en los parámetros técnicos y económicos característicos de las redes móviles de telecomunicaciones. Finalmente se describe el uso de la simulación en la planificación de redes móviles de telecomunicaciones.

### 1.1 Redes móviles de telecomunicaciones

La telefonía móvil, como sucede en otros ámbitos de la tecnología, ha seguido un proceso de innovación que ha dado lugar a la definición y posterior implantación de sucesivas generaciones de sistemas de comunicación. Los sistemas móviles de tercera generación comienzan su especificación a principios de los años noventa, y su culminación como estándar se da a finales de la década. Una década de consolidación del estándar tiene la ventaja de poder observar la evolución de los sistemas de una generación anterior. Esto resulta de gran utilidad para acotar las limitaciones de funcionamiento de los sistemas actuales para la previsión de demanda de servicios que se pueden entrever en el futuro próximo. En este sentido, la especificación y posterior diseño de los sistemas móviles de tercera generación se fue orientando poco a poco hacia la confección de un abanico de servicios que potencian las comunicaciones para la transmisión de datos frente a los servicios de transmisión de voz de uso mayoritario en sistemas anteriores. La orientación de esta tendencia se debe en gran medida a la propia evolución de internet y a la proliferación de gran número de servicios telemáticos de soporte al funcionamiento de muchas empresas, principalmente de servicios. Esta evolución está haciendo que las comunicaciones de datos sobre red fija se conviertan en algo tan importante o más que las propias comunicaciones de voz para muchas empresas, y la telefonía móvil, por su parte, no quiere y no debe permanecer ajena a esta tendencia.

La aparición de una nueva generación en los sistemas de comunicación, se justifica si esto aporta beneficios o mejoras claramente contrastadas sobre la generación anterior. La mejora entre los sistemas de primera y segunda generación vino marcada por una importante innovación tecnológica, donde los sistemas analógicos de primera generación fueron sustituidos por los sistemas digitales de segunda generación. Ésto dio lugar a unos sistemas con una eficiencia espectral superior, redundando en un incremento de la capacidad del sistema. Para los sistemas de tercera generación, la utilización de un acceso CDMA frente al acceso TDMA usado en GSM, podría considerarse la mejora tecnológica que distingue a unos sistemas de otros. Sin embargo, en esta ocasión, no se trata de una mejora tecnológica que incrementa la capacidad del sistema, sino que se trata del diseño de un sistema capaz de soportar un amplio abanico de servicios portadores en previsión de las nuevas necesidades de comunicación del mercado.

Las características de funcionamiento para los nuevos servicios a diseñar son de diferente índole, aunque los parámetros básicos siempre están relacionados con la disponibilidad de diferentes velocidades de transmisión y la acotación de los retardos de operación. Por otra parte, la complejidad de las aplicaciones a las que los sistemas de tercera generación dan servicio, obliga a definir otros requerimientos como la flexibilidad en la caracterización del servicio a ofrecer o bien, el comportamiento de la calidad de servicio durante el traspaso de una comunicación.

### 1.1.1. Arquitectura de una red móvil de telecomunicaciones

De acuerdo a ETSI (1997), los sistemas de tercera generación deben soportar un determinado rango de velocidades de transmisión dependiendo del entorno de operación del sistema, así se contemplan los siguientes casos como parte de la especificación UMTS 97:

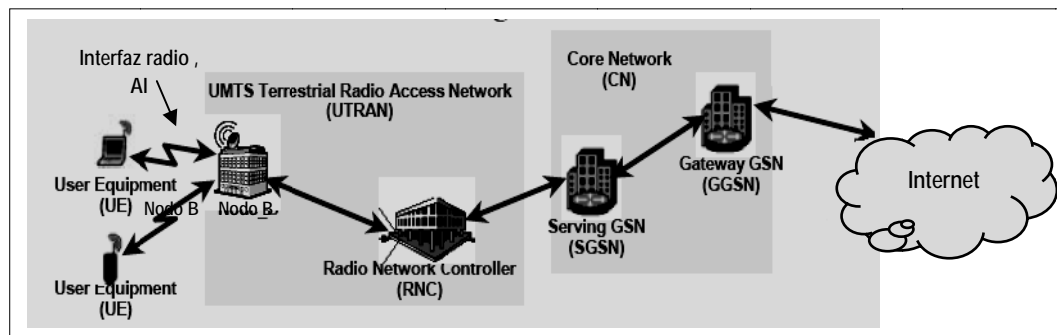
- Entorno rural, transmisiones de 144 kb/s - 384 kb/s
- Entorno suburbano, transmisiones de 384 kb/s – 512 kb/s
- Entorno de interiores o exteriores de corto alcance, superiores a 2Mb/s

Para cada uno de estos casos, se impone una velocidad máxima de desplazamiento del terminal móvil acorde con la velocidad mínima de transmisión exigible. En promedio, para el entorno de interiores se considera una velocidad de desplazamiento del terminal móvil de 3km/h y para el entorno suburbano y rural se considera una velocidad de desplazamiento del terminal móvil de 36 – 81 km/h.

La flexibilidad en la caracterización del servicio a ofrecer hace referencia a la posibilidad de negociar los atributos del servicio portador a contratar para esa transmisión. Es decir, existe la capacidad de negociar aspectos tales como la velocidad de transmisión, el retardo asociado, la tasa de error máxima permitida o la posible asimetría en el caudal de transmisión entre los enlaces ascendente y descendente, entre otros.

El diseño de la red debe ofrecer servicios portadores basados en conmutación de circuitos y en conmutación de paquetes, modos de comunicación en tiempo real y en tiempo no real, la posibilidad de operar con un único servicio portador o mantener simultáneamente varios servicios portadores sobre una misma comunicación. Todo ello, incluyendo la capacidad de poder variar los atributos de un servicio a lo largo del tiempo, además de añadir esquemas de control de admisión y prioridades en la gestión de la modificación de los atributos de diferentes comunicaciones.

Figura 5. Arquitectura de red UMTS



Fuente: Elaboración propia con base en la información técnica de redes UMTS.

La arquitectura de red de tercera generación que se estudia es el que se muestra en la Figura 5: los nodos *B* y *RNC* se suponen conectados mediante una infraestructura de transporte, basada en tecnología ATM (Asynchronous Transfer Mode). Con esta tecnología, a fin de aprovechar al máximo la capacidad de los sistemas de transmisión, sean éstos de cable o radioeléctricos, la información es transmitida en forma de cortos paquetes (celdas ATM) de longitud constante y que pueden ser enrutados individualmente mediante el uso de los denominados *canales virtuales* y *trayectos virtuales*. La interfaz radio, AI, se supone basada en la tecnología W-CDMA (Wideband-Code Division Multiple Access). En esta tecnología es posible operar bajo dos modos distintos:

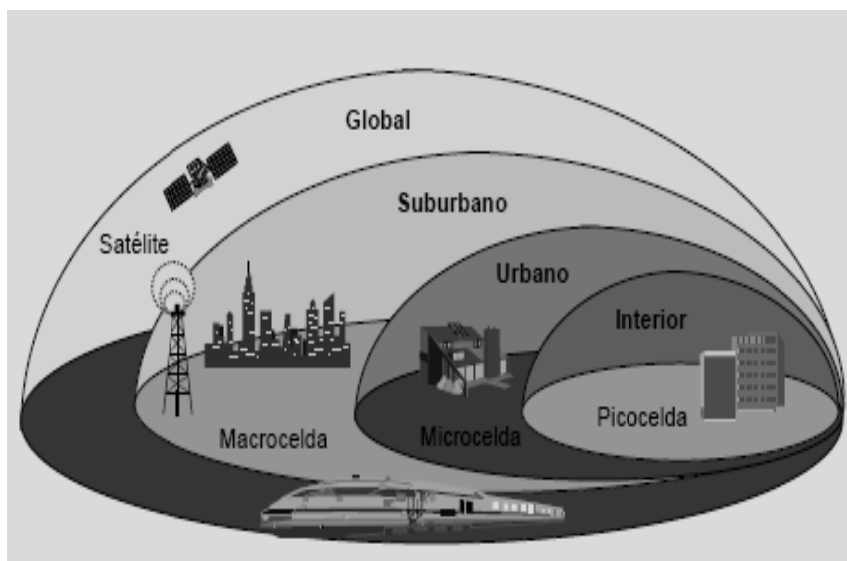
- TDD: En este método bidireccional, las transmisiones del enlace ascendente y del descendente son transportadas en la misma banda de frecuencia usando intervalos de tiempo (slots de trama) de

forma sincrónica. Así las ranuras de tiempo en un canal físico se asignan para los flujos de datos de transmisión y de recepción.

- FDD: Los enlaces de las transmisiones ascendentes y descendentes emplean dos bandas de frecuencia separadas para este método a dos caras. Un par de bandas de frecuencia con una separación especificada se asigna para cada enlace. Puesto que diversas regiones tienen diversos esquemas de asignación de la frecuencia, la capacidad de funcionar en modo de FDD o TDD permite la utilización eficiente del espectro disponible.

El modo FDD se utiliza generalmente en macro y micro celdas públicas en donde el tráfico es simétrico. Mientras que el modo TDD se utiliza en micro y pico-celdas públicas cuyo tráfico es asimétrico. La Figura 6, ilustra los distintos tipos de celdas en una red UMTS, macro, micro y pico celdas

Figura 6. Diferentes tipos de celdas en redes UMTS



Fuente: Elaboración propia con base en la información de planificación de redes de telecomunicaciones.

Los ambientes de pico-celdas están caracterizados por celdas pequeñas y potencias de transmisión bajas, tanto los usuarios como las estaciones base están localizadas en interiores. Ejemplos de ambientes físicos que corresponden a la categoría pico-celular son: casas, oficinas, aeropuertos, estaciones de trenes, centros comerciales, teatros, estadios y estacionamientos. Los ambientes de micro-celdas están caracterizados por celdas pequeñas y potencias de transmisión pequeñas. Sin embargo, sólo se consideran los usuarios ubicados en el exterior. Algunos ejemplos de ambientes micro-celulares son: estacionamientos abiertos, zonas comerciales abiertas, centros de negocios, etc. Los ambientes macro-celulares están caracterizados por grandes celdas y potencias de transmisión. Los radios de las celdas alcanzan los 2000 metros para servicios con tasa de transmisión menor a 144 kb/s y 500 metros para tasas de transmisión superiores a 144 kb/s. Las distancias entre las estaciones base varían de 1-6 km. Ejemplos de estos ambientes son: áreas urbanas, áreas rurales y carreteras.

Como parte de la evolución de la tecnología UMTS, se reconocen las siguientes versiones:

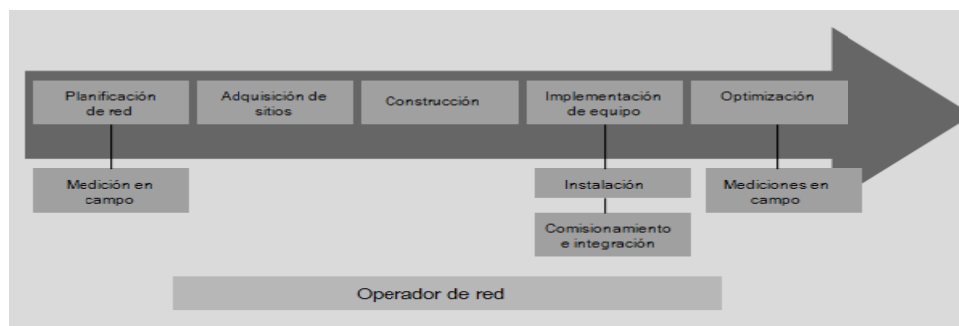
- **Versión 97**
  - Acceso Radio UMTS (UTRA); Evaluación del concepto de acuerdo a ETSI (1997).

- **Versión 99**
  - Especificaciones técnicas de servicios y aspectos de sistemas: Arquitectura de red de acuerdo a 3GPP (2002). Mejora a datos GSM (EDGE). Provee soporte para GSM/EDGE/GPRS/WCDMA.
- **Versión 4**
  - Liberada en 2004 de acuerdo a Mecklenbrauker (2008). Soporte para mensajes multimedia. Interconexión eficiente a la infraestructura del núcleo de red sobre troncales de red IP.
- **Versión 5**
  - Como se indica en Mecklenbrauker (2008), se tiene como opción la arquitectura IP en toda la red. En marzo de 2006 se libera comercialmente la alta velocidad de paquetes en el sentido descendente, paquetes que van desde la ubicación del proveedor del servicio hacia el usuario, mediante el acceso HSDPA, en el cual se comparte el acceso al medio, lo que permite optimizar la entrada a la red de múltiples usuarios.
- **Versión 6**
  - Se propone la arquitectura IP en toda la red de acuerdo a Mecklenbrauker (2008). Mejoras en el soporte de multimedia a través de servicios broadcast/multicast.
- **Versión 7**
  - De acuerdo a Mecklenbrauker (2008), se manejan antenas de 4 portadoras. Provee mejoras en la funcionalidad de datos GSM. También incluye mejoras sobre características de versiones anteriores. Mejora en el desempeño, mejora en la eficiencia del espectro, incremento de la capacidad y mejor resistencia a la interferencia.
- **Versión 8**
  - De acuerdo a Mecklenbrauker (2008), el esquema de codificación que se maneja es 64-QAM.

### 1.1.2. Planificación de una red móvil de telecomunicaciones

Como se indica en Mishra (2007), de forma general, la organización de un proyecto de planificación de la red radio consiste de alrededor de 10 actividades que tienen que realizar diferentes equipos de trabajo. La Figura 7 indica las actividades que se consideran fundamentales para un operador en la administración de un proyecto de planificación de la red radio. Evidentemente, este número de actividades varía de un operador a otro, dependiendo de la situación de su red al momento de iniciar el proyecto.

Figura 7. Organización de un proyecto de planificación de la red radio



Fuente: Mishra (2007).

En el presente trabajo de investigación nos enfocaremos en la primera actividad, la planificación de la red, no se llevarán a cabo mediciones en campo puesto que se considera que actualmente, en el escenario que se simulará no hay una red existente de tercera generación y por lo mismo se propondrá el diseño de una.

Como paso inicial y antes de realizar cualquier cosa, en el proceso de la planificación de la red, es necesario analizar la situación del mercado actual en relación a la demanda de los servicios y aplicaciones de la red que se pretende diseñar. El estudio de mercado incluye a los operadores competidores, área de cobertura, demanda de servicios y aplicaciones, tarifas, etc. Con base en la situación de mercado es posible crear una estrategia de despliegue para el nuevo operador y/o la nueva red. Adicionalmente, es necesario, que el operador decida el tipo de servicios y aplicaciones que ofrecerá así como estimar la utilización que harán de ellos los usuarios potenciales.

Los requerimientos básicos de una red celular son la cobertura y la calidad de servicio. Estos requerimientos están relacionados con la experiencia de los usuarios al utilizar la red. La cobertura de una red se refiere al área geográfica dentro de la cual un usuario tiene acceso a la red. La calidad de servicio está relacionada a factores como porcentaje de llamadas exitosas, de llamadas caídas, de traspasos de una celda a otra y de establecimiento de llamadas, por ejemplo, los cuales no deben exceder un valor especificado por el operador.

Los factores ambientales afectan enormemente a la planificación de red. La propagación de ondas varía de acuerdo a la morfología del área que se pretende dar cobertura. La atenuación de la señal varía, por ejemplo, con el número de obstrucciones existentes en el entorno de estudio, y de mayor importancia es el impacto que tiene la frecuencia de operación del sistema sobre la propagación.

Todos los factores antes mencionados ayudan a definir los parámetros de planificación de la red. El objetivo principal de una planificación de red es proporcionar los servicios con la mayor calidad de red posible, sujeto a la inversión que los operadores de redes estén dispuestos a realizar. Ambos factores – calidad de red e inversión – están directamente relacionados con las ganancias netas de la operación de la red, esto explica la complejidad de la planificación de la red, donde se necesita proporcionar suficiente cobertura y capacidad con la menor inversión posible.

La Tabla 1, resume los principales criterios que afectan la planificación de la red radio.

Tabla 1. Criterios que afectan la planificación de la red radio

Actividad	Factor
Análisis de mercado	Análisis de competidores
	Usuarios potenciales
	Utilización de servicios y aplicaciones
Requerimientos de clientes	Requerimientos de cobertura
	Requerimientos de capacidad
	Calidad de red
	Limitaciones financieras del operador
	Planes futuros de despliegue
Factores ambientales	Morfología del área
	Topografía del área
	Banda de frecuencias disponible
	Localización de las radio bases (nodo B en UMTS)

Fuente: Mishra (2007).

### 1.1.3. Servicios y aplicaciones en una red móvil de telecomunicaciones

#### Servicios

De acuerdo a la Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones con siglas en inglés ITU-T I.21, los servicios y las aplicaciones de redes diseñadas con base en la tecnología de tercera generación están divididos en dos grupos:

- Interactivos (categorías: conversación, mensajes y descarga de información)
- De distribución (categorías: emisión y cíclicos)

Los servicios interactivos son aquellos en los cuales existe un intercambio de información por dos vías entre dos suscriptores o bien un suscriptor y un proveedor de servicio. Se incluyen tres categorías:

- Servicios de conversación proveen comunicación bidireccional, en tiempo real y la transferencia de información entre dos usuarios o bien entre un usuario y un proveedor de servicio. El flujo de la información puede ser simétrico bidireccional, asimétrico bidireccional y en casos específicos, unidireccional.
- Servicios de mensajes ofrecen comunicación entre usuarios individuales. No son en tiempo real.
- Servicios de descarga de información proveen al usuario de la capacidad para descargar información almacenada en centros de información, que generalmente son de uso público.

Los servicios de distribución son aquellos cuya transferencia de información es primero en una vía, desde el proveedor del servicio hacia el usuario de la red de banda ancha, se incluye el caso de los servicios de emisión en el cual los usuarios no tienen control sobre la presentación de la información, y el caso de los servicios cíclicos, los cuales permiten a los usuarios tener control sobre la presentación de la información.

- Servicio de emisión proveen un flujo continuo de información, distribuida desde una fuente central a un número ilimitado de usuarios autorizados conectados a la red. Cada usuario puede tener acceso al flujo de información pero sin control sobre el mismo.
- Servicios cíclicos permiten la distribución de información desde una fuente central a un gran número de usuarios. La información se provee como una secuencia de entidades de información con una repetición cíclica. El usuario puede controlar el inicio y orden de la presentación.

Los servicios también pueden ser clasificados de acuerdo a sus características tales como dependencia intrínseca con el tiempo, requerimientos de distribución, direccionalidad, simetría de la conexión, interactividad y número de partes.

En la recomendación ITU-T I.211 se identifican 7 tipos de información, a saber:

- Sonido
- Video
- Documentos (multimedia)
- Datos
- Texto
- Gráficas
- Imágenes



De esta forma, los servicios agrupados con base en el tipo de información que contienen, conforman las jerarquías de servicios mostrados en la Tabla 2. El video, sonido, datos y documentos multimedia corresponden a la jerarquía de servicios interactivos de conversación, mientras que los documentos multimedia mezclados corresponden a los servicios interactivos de mensajes. Luego, los archivos con gráficas, sonido, imágenes y vídeo corresponden a los servicios interactivos de descarga mientras que los archivos de gráficas, sonido, e imágenes también pueden corresponder a los servicios de distribución cíclicos.

Tabla 2. Jerarquías de servicios

Jerarquía de Servicio	Tipo de información	Ejemplos de servicios de banda ancha
Servicios interactivos, Conversación	Video y sonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Video teléfono</li> <li>• Video teléfono de alta definición</li> <li>• Videoconferencia</li> <li>• Videoconferencia de banda ancha</li> </ul>
	Datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia de archivos de alto volumen</li> </ul>
	Documentos (multimedia)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicación de documentos mezclados</li> </ul>
Servicios interactivos, Mensajes	Multimedia; Documentos mezclados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Correo electrónico con multimedia</li> </ul>
Servicios interactivos, Descarga	Texto, datos, gráficas, sonido, imágenes y vídeo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Video texto de banda ancha</li> <li>• Descarga de datos</li> <li>• Descarga multimedia</li> </ul>
Servicios de distribución, Cíclicos	Texto, gráficas, sonido e imágenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de video en canal completo</li> </ul>

Fuente: San José y Velez (2003).

## Aplicaciones

De acuerdo a Ferreira y Velez (2005), una aplicación está definida como una tarea que requiere la comunicación de uno o más flujos de información, entre dos o más partes que se encuentran geográficamente separadas. Las aplicaciones están caracterizadas por los atributos de los servicios, las características de comunicación y las características del tráfico. Un conjunto de aplicaciones con características similares, puede estar clasificado como un servicio si y solo si las aplicaciones que lo conforman tienen características comunes. Un dato que es esencial para propósitos de análisis en ingeniería de red y tráfico es la utilización de cada aplicación, la cual puede considerarse como la proporción de la duración de las conexiones de una aplicación a la duración de todas las conexiones de dicha aplicación. En términos de utilización, las aplicaciones que presentan los valores más altos son las que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Aplicaciones más utilizadas

Aplicación	Descripción
Video teléfono	Comunicación de video-teléfono uno a uno en tiempo real.
Tele-educación	Educación a distancia basada en información audiovisual.
Videoconferencia	Videoconferencia de alta calidad en tiempo real.
Tele-anuncios	Publicidad interactiva basada en el intercambio de información audio visual.
Video vigilancia	Localización y comunicación entre las personas y el objeto monitoreado. Puede ser: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Detección de alarmas en la industria</li> <li>b. Vigilancia de la seguridad en propiedades particulares</li> </ul>
Transferencia de archivos de datos (FTP)	Transferencia de cualquier tipo de archivos de datos entre diferentes tipos de equipos y redes.
Multimedia	Intercambio de documentos multimedia.
Grupos de trabajo	El usuario establece una sesión de trabajo por medio de un proveedor del servicio, activa y controla aplicaciones locales y remotas y se comunica con sus colaboradores a través del audio, video y datos.
Tele-trabajo	Ejecución del trabajo desde cualquier ubicación geográfica por medio de sesiones. Su principal ventaja es la flexibilidad y bajo costo.
Correo electrónico multimedia	Transmisión y almacenamiento de documentos que contienen texto, gráficas, voz y/o video.
Información turística	El sistema provee información en la forma de documentos multimedia a los turistas. Tanto eventos especiales como lugares particulares pueden ser desplegados en la información de tal forma que los usuarios sean capaces de seleccionar el de su preferencia. Se pueden realizar reservaciones a hoteles y restaurantes.
Llamadas remotas	Ejecución remota de programas computacionales para distintos propósitos.
Guías urbanas (Información sobre transporte público)	Información multimedia sobre el tráfico vehicular, horarios de llegadas y salidas de transporte público como trenes y autobuses y la mejor ruta para llegar a una determinada localización.
Asistencia de viaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Guía turística</li> <li>b. Información sobre las condiciones de vías y medios de transporte</li> </ul>
Emisión de video en canal completo	Las noticias están organizadas de acuerdo a los propios intereses de los usuarios.

Fuente: San José y Velez, (2003).

De la Tabla 3, podemos concluir que la aplicación de los distintos servicios es extensa y abarca diferentes actividades tales como laborales, de ocio y diversión, de seguridad, convivencia, educación, y que gracias a su avance tecnológico, ha sido posible facilitar el desarrollo de dichas actividades y mejorarlo en muchos casos.

#### Relaciones entre servicios y aplicaciones

La Tabla 4 muestra las correspondencias que existen entre los servicios y aplicaciones antes descritos. Se observa que para algunos servicios corresponde más de una aplicación y tal es el caso de la comunicación de documentos mezclados, el video texto de banda ancha y la descarga multimedia. El servicio de video se utiliza principalmente en las aplicaciones de tele-educación, tele-anuncios y vigilancia, mientras que el

servicio de multimedia se utiliza principalmente en las aplicaciones de correo electrónico, guías urbanas y asistencia de viajes.

Tabla 4. Correspondencia entre servicios y aplicaciones

Servicios	Aplicación
Video teléfono	Varios propósitos
Video teléfono de alta definición	Tele-educación
Videoconferencia	Varios propósitos
Videoconferencia de banda ancha	Tele-anuncios
Video vigilancia	Video vigilancia
Transferencia de archivos de alto volumen	Transferencia de archivos de datos (FTP)
Comunicación de documentos mezclados	Multimedia
	Grupos de trabajo
	Tele-trabajo
Correo multimedia	Correo electrónico multimedia
Video texto de banda ancha	Información turística
	Comercio electrónico
Descarga de datos	Llamadas remotas
Descarga multimedia	Guías urbanas (Información sobre transporte público)
	Asistencia de viaje
Diario de noticias en formato electrónico	Diario de noticias en formato electrónico

Fuente: San José y Velez (2003).

#### Requerimientos de distribución

Los requerimientos de distribución de los servicios y aplicaciones pueden ser de dos tipos: en tiempo real y en tiempo no real. Las aplicaciones en tiempo real, requieren que la información sea distribuida para su consumo inmediato y se utiliza para ello la conmutación de circuitos en la configuración de la red, mientras que las aplicaciones en tiempo no real la información se almacena en los puntos receptores para su consumo posterior, no inmediato y se utiliza para ello la conmutación de paquetes en la configuración de la red.

Tabla 5. Requerimientos de distribución de aplicaciones

Aplicación	Requerimientos de distribución	
Voz	En tiempo real	
Voz sobre IP		
Video teléfono		
Video teléfono de alta definición (Tele educación)		
Videoconferencia		
Tele-anuncios		
Video vigilancia		
Transferencia de archivos de datos (FTP)		
Multimedia		
Grupos de trabajo		
Video juegos interactivos		
Mensajes multimedia instantáneos		En tiempo no real
Comercio electrónico		
Información turística	En tiempo real	
Llamadas remotas		
Guías urbanas (Información sobre transporte público)	En tiempo real/ en tiempo no real	
Portal en internet de contenidos		
Asistencia de viaje	En tiempo real/ en tiempo no real	
Video clips		
Diario de noticias en formato electrónico	En tiempo no real	

Fuente: Ferreira y Velez (2005).

#### 1.1.4. Modelo de movilidad de usuarios

De acuerdo a Ferreira et al. (2003), la movilidad de los terminales tiene una gran influencia en la mayoría de los aspectos de comunicación de las redes UMTS que involucran el desempeño de red o bien la generación de tráfico como resultado de los traspasos de una celda a otra. Los temas como la gestión de recursos radio, la gestión de la localización, la calidad de servicio (QoS) y la capacidad de gestión de tráfico están directamente afectadas por la movilidad de los terminales.

Existen dos modelos de movilidad que engloban las posibilidades en que un usuario de una red UMTS puede desplazarse.

- Modelo individual. Utilizado para describir la movilidad de usuarios en ambientes de interior tales como oficinas, aeropuertos y centros de negocios.
- Modelo de tele-tráfico. Conforme a una configuración de parámetros adecuada, este modelo puede ser utilizado para describir la movilidad en cualquier tipo de ambiente, por ejemplo, desde aquellos en donde un usuario se desplace a pie, hasta aquellos en los cuales los usuarios se desplacen a grandes velocidades como podría ser sobre una autopista.

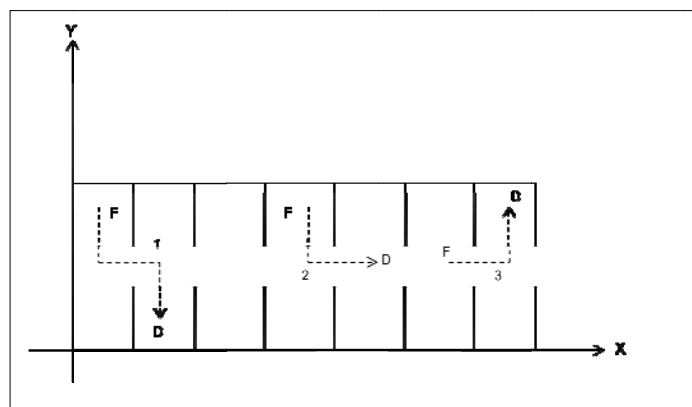
Desde un punto de vista de movilidad, los ambientes de interior están caracterizados por el desplazamiento a bajas velocidades a través de rutas de movilidad relativamente bien definidas, las cuales a su vez están determinadas por la topología de la arquitectura del lugar así como por los patrones de las actividades que ahí se desarrollan.

Como ya se ha mencionado, en la presente investigación, se estudiarán los ambientes de aeropuertos, los cuales están caracterizados de forma general por poseer una topología denominada de "caja", se excluyen los diseños de reconocidos arquitectos que no tiene nada en común con una "caja".

En una topología de "caja", las áreas están interconectadas por un pasillo o corredores. Los usuarios pasan tiempo considerable dentro de estas áreas, por ejemplo salas de espera y restaurantes, y cuando se desplazan, lo hacen hacia destinos muy particulares utilizando una ruta bien definida, por ejemplo hacia el registro, puerta de embarque, sanitarios, tabaquería, entre otros.

Considerando el plano bidimensional X- Y, las posibilidades de desplazamientos de los usuarios desde una posición fuente, F, hacia una posición destino, D, se ilustran en la Figura 8.

Figura 8. Diferentes posibilidades de desplazamientos de usuarios



Fuente: Ferreira et al. (2003).

Considerando la naturaleza de los movimientos se derivan dos posibles casos:

- El primer caso, representado en la Figura 8 por el número 1, tanto la fuente F como el destino D se localizan dentro de un área, no necesariamente la misma.
- El segundo caso, representado en la Figura 8 por los números 2 y 3, la fuente F o el destino D se localizan en el pasillo.

Los parámetros más importantes que caracterizan la movilidad de los usuarios son la relación de permanencia promedio área/pasillo, el tiempo promedio de permanencia dentro de un área y la velocidad de desplazamiento, cuyos símbolos se enuncian en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de movilidad

Parámetro	Símbolo
Relación de permanencia promedio área/pasillo	$r$
Tiempo promedio de permanencia dentro de un área	$Tr$
Velocidad de desplazamiento	$Vm$

Fuente: Ferreira et al. (2003).

Existe una gran variedad de modelos de movilidad utilizados en la simulación de redes de telecomunicaciones. Estos modelos describen los desplazamientos de los usuarios de acuerdo al ambiente en que se encuentren y son utilizados de acuerdo a la red de telecomunicaciones que se esté simulando.

### 1.1.5. Modelo de pérdida por trayectoria en interiores

De acuerdo a l Reporte Técnico emitido por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones, ETSI por sus siglas en inglés, TR 101 112 V3.2.0 (1998) el modelo de pérdida por trayectoria en interiores, expresada en dB, queda como sigue:

$$L = 37 + 30\text{Log}_{10}(R) + 18.3n\left(\frac{n+2}{n+1}\right)^{-0.46}$$

Ecuación (1)

donde:

$R$ , representa la distancia transmisor-receptor en metros.

$n$ , representa el número de pisos en la ruta de propagación.

### 1.1.6. Modelo de generación de tráfico en redes de telecomunicaciones

#### Parámetros de tráfico

En los últimos años, el tráfico en las redes de telecomunicaciones ha sufrido un incremento vertiginoso debido a un mayor número de usuarios que demandan un mayor número de aplicaciones y servicios con requerimientos de mayor ancho de banda como se observa en el Gráfico 5.

Gráfico 5. Crecimiento de tráfico global  
(En petabytes por mes)<sup>a</sup>



Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de Mark Wegleitner (de Verizon), presentación en la decimotercera Conferencia anual de tecnología, comunicaciones e Internet, Nueva York, junio de 2007.

<sup>a</sup> Un petabyte es una unidad de almacenamiento de información que equivale a  $10^{15}$  bytes.

Como parte de un estudio de ingeniería de red, los parámetros de tráfico que se consideran fundamentales son: tasa de transmisión (kb/s), duración promedio (minutos), latencia o retardos temporales en la red y retraso (ms). A continuación se incluye una breve descripción de cada parámetro.

La tasa de transmisión es un promedio del número de bits, caracteres o bloques, que se transfieren entre dos dispositivos, por una unidad de tiempo. Una posible unidad de medida es kb/s. La duración promedio representa la duración promedio que cada usuario utiliza una determinada aplicación para propósitos específicos. La latencia en redes informáticas de datos, representa la suma de retardos temporales dentro de una red. El retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red. En la Tabla 7, se muestran los valores de los parámetros de tráfico correspondientes a cada una de las aplicaciones de la Tabla 5.

Tabla 7. Parámetros de tráfico para aplicaciones

Aplicación	Tasa de transmisión [kb/s]	Duración promedio[minutos]	Latencia/retraso[ms]
Voz	4-25	3	150
Voz sobre IP	4-25	3	150
Video teléfono	32-384	5	200
Video teléfono de alta definición (Tele educación)	2000	30	200
Videoconferencia	32-384	30	200
Tele-anuncios	32-384	30	200
Video vigilancia	32-384	10-120	200
Transferencia de archivos de datos (FTP)	64-2000	1-5 s	10 s
Multimedia	384-2000	1-15	Pocos segundos
Grupos de trabajo	384-2000	15-50	200
Video juegos interactivos	64-1000	10-30	50
Mensajes multimedia instantáneos	1000-4000	0.1-3	15 s
Comercio electrónico	64-1000	5	500
Información turística	64-1000	10-15	500
Llamadas remotas	64-1000	5	250
Guías urbanas (Información sobre transporte público)	128-4000	5-10	1-5 s
Portal en internet de contenidos	64-2000	5-15	1-5 s
Asistencia de viaje	128-4000	20-360	500
Video clips	64-384	3-5	10 s
Diario de noticias en formato electrónico	1000-2000	20	500

Fuente: Ferreira y Velez (2005).

De acuerdo a Ferreira et al. (2003), un modelo de generación de tráfico UMTS en ambientes de aeropuerto se utiliza para cuantificar y describir el tráfico cursado en la red, si está basado en la densidad de la población y penetración de servicios, permite determinar la tasa de llamadas generadas en cada servicio ofrecido.

Las posibles categorías de servicios, conformadas de acuerdo a la tasa de transmisión de sus aplicaciones distribuidas sobre la red son:

- Sonido
- Multimedia de alta interacción
- Banda angosta
- Banda ancha

A cada categoría de servicio le corresponde un grupo de aplicaciones. La Tabla 8 muestra las aplicaciones, con su correspondiente tasa de transmisión, pertenecientes a cada categoría de servicio.

Tabla 8. Tasa de transmisión para servicios y sus aplicaciones

Aplicación	Tasa de transmisión [kb/s]
<b>Sonido</b>	
Voz	12
Voz sobre IP	12
Audio	64
<b>Multimedia de alta interacción</b>	
Video juegos interactivos	128
Comunicación por imágenes	128
Portales móviles	128
Micro-películas	128
Video-teléfono	128
Videokonferencia, varios propósitos	128
Trabajo en grupos	128
<b>Banda angosta</b>	
Videokonferencia (tele-anuncios)	384
Transferencia de archivos (FTP)	384
Navegación en internet	384
Comercio electrónico	384
<b>Banda ancha</b>	
Monitoreo	480
Correo electrónico multimedia	1024
Llamadas remotas	1024
Tele-trabajo	1536
Asistencia de viaje	1536
Guías urbanas	1536
Información turística	1536
Diario de noticias en formato electrónico	1536
Video-teléfono de alta definición	1920

Fuente: Ferreira et al. (2003).

De cada categoría se ha seleccionado una aplicación para conformar el modelo de generación de tráfico. La Tabla 9 indica el porcentaje de utilización estimado/propuesto para cada servicio en ambientes de aeropuertos de acuerdo a Cabral et al.(2005).

Tabla 9. Porcentaje de utilización para servicios y sus aplicaciones

Servicio	Aplicación	Porcentaje de utilización
Sonido	Voz sobre IP	50%
Multimedia de alta interacción	Video-teléfono	22%
Banda angosta	FTP (Transferencia de archivos)	16%
Banda ancha	Video-teléfono de alta definición.	12%

Fuente: Cabral et al. (2005).

Adicionalmente al porcentaje de utilización, para describir mejor lo que sucede en la red debido a la distribución de los servicios, es necesario incluir la tasa de transmisión y la distribución estadística de la duración. En la Tabla 10 se indican los valores para cada parámetro mencionado.



Tabla 10. Especificaciones de duración y tasa de transmisión para cada aplicación

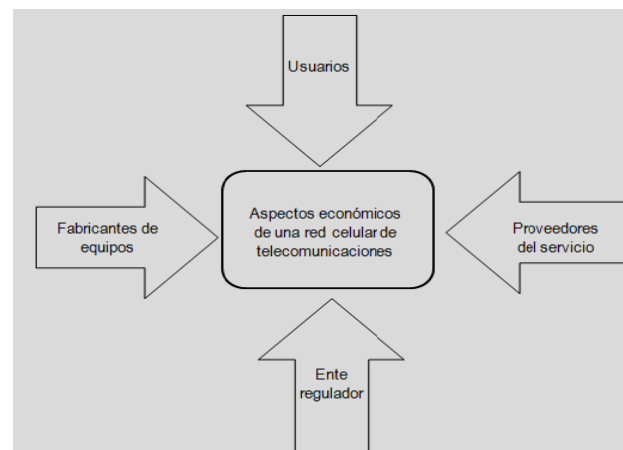
Aplicación	Duración [Distribución/media]	Tasa de transmisión [Kb/s]
Voz sobre IP	EXP/3 min	12
Video-teléfono	EXP/3 min	128
FTP (Transferencia de archivos)	EXP/ 0.1 min	384
Video-teléfono de alta definición.	EXP/30 min	1920

Fuente: Antoniou et al. (2003).

### 1.1.7. Modelo de costo beneficio de la red radio

De acuerdo a Gavish et al. (1995), el aspecto económico de una red celular de telecomunicaciones puede ser analizado desde cuatro perspectivas diferentes: desde la perspectiva de los usuarios, de los proveedores del servicio, del ente regulador o desde la perspectiva de los fabricantes de equipos como se observa en la Figura 9.

Figura 9. Aspectos económicos de una red celular de telecomunicaciones



Fuente: Gavish et al. (1995).

Por una parte, para los usuarios lo más importante es la calidad del servicio percibida y el costo del servicio, mientras que para los proveedores del servicio, lo más importante es determinar la configuración de la red que maximice sus ingresos esperados. Por otra parte, para un regulador lo más importante es el bienestar social, promover la competencia entre los proveedores del servicio y administrar el espectro de frecuencias mientras que para los fabricantes de equipos, lo más importante es el precio de cada uno de los equipos. La presente investigación se centra en el punto de vista de los proveedores de servicio, por lo mismo, se encontrará la configuración de la red que optimice la relación costo-beneficio del operador de la red sobre una base anual.

### Costo anual de la red radio

De acuerdo a lo indicado en Cabral et al.(2005), el costo anual total de una red radio queda determinado por un costo fijo y un costo proporcional al número de celdas y/o radio bases instaladas, necesarias para dar cobertura al área especificada, denominadas nodos  $B$  en la arquitectura de una red UMTS.

$$\text{Costo anual total } [\$] = \text{Costo fijo } [\$] + (\text{Costo anual de nodo } B [\$]) * (\text{Número de nodos } B)$$

Ecuación (2)

De donde, específicamente para el problema que se desea resolver en el presente trabajo,

$$\text{Costo fijo } [\$] = \text{Costo de una licencia UMTS para dar cobertura en un aeropuerto } [\$]$$

Ecuación (3)

Considerando el mismo costo de operación y mantenimiento en el período de vida de la radio base:

$$\text{Costo anual nodo } B [\$] = \frac{\text{Costo radio base } [\$] + \text{costo instalación } [\$]}{\text{Años de vida de radio base}} + \text{Costo Operación y mantenimiento} [\$]$$

Ecuación (4)

$$\text{Número de nodos } B = \frac{\text{Área de cobertura total en aeropuerto } [m^2]}{\pi * (\text{radio de cobertura de nodo } B)^2 [m^2]}$$

Ecuación (5)

Se considera que las antenas que se utilizarán en el nodo  $B$  son omnidireccionales (patrón de radiación circular) con un área de cobertura teórica equivalente a

$$\text{Área de cobertura de nodo } B [m^2] = \pi * (\text{radio de cobertura de nodo } B)^2 [m^2]$$

Ecuación (6)

### Ingreso anual de la red radio

De acuerdo a lo indicado en Cabral et al.(2005), el ingreso diario por cada configuración de red se obtiene como función de la carga en los nodos  $B$  [kb/s], de los ingresos de las portadoras (los nodos  $B$  se configurarán solo con 1 portadora) con una tasa de transmisión específica y de las horas pico diarias.

$$\text{Ingreso diario red } [\$] = \frac{\text{Carga en nodos } B \left[ \frac{kb}{s} \right] * \text{Horas pico diarias} [hr] * \text{Ingreso portadora} \left[ \frac{\$}{min} \right]}{\text{Tasa de transmisión de portadora} \left[ \frac{kb}{s} \right]}$$

Ecuación (7)

Por tanto, el ingreso anual total de la red radio es equivalente al ingreso diario de red multiplicado por el número de días con carga considerados.

$$\text{Ingreso anual total } [\$] = \text{Ingreso diario de configuración de red } [\$] * \text{Número de días con carga}$$

Ecuación (8)

### Beneficio neto anual de la red radio

El beneficio neto anual de la red radio, queda como función del costo anual total e ingreso anual total.

$$\text{Beneficio neto anual total [\$]} = \text{Ingreso anual total [\$]} - \text{Costo anual total [\$]}$$

Ecuación (9)

Y en porcentaje se expresa:

$$\text{Beneficio anual [\%]} = \frac{\text{Beneficio neto anual total [\$]}}{\text{Costo anual total [\$]}}$$

Ecuación (10)

Una vez que se han introducido los conceptos básicos de planificación de redes móviles de telecomunicaciones técnicos y económicos se hará una introducción al uso de la simulación en el proceso de planificación de redes móviles de telecomunicaciones.

## 1.2. Uso de la simulación en la planificación de redes móviles de telecomunicaciones

El origen moderno de la palabra "simulación", se remonta al trabajo de John Von Newman y Stanislaw Ulam, a finales de 1940, cuando construyeron el término "Análisis de Montecarlo" aplicado a una técnica matemática utilizada para resolver problemas nucleares que eran o muy caros para una solución experimental, o demasiado complicados para un tratamiento analítico.

Históricamente, el término Montecarlo fue un nombre en código usado en la Segunda Guerra Mundial para cálculos secretos que se realizaban con el fin de predecir el flujo de neutrones en una bomba atómica. El flujo de millones de neutrones siguiendo caminos aleatorios a través de una masa de moléculas de uranio, sólo puede ser modelado en una computadora, no es posible pronosticarlo de manera teórica. Como los caminos de los neutrones varían al azar y como la construcción de la bomba atómica era una gigantesca apuesta, se dio a los cálculos el nombre en código de Monte Carlo, por el hecho de que ésta es la capital del principado de Mónaco, el centro mundial de las apuestas.

Con el advenimiento de las computadoras en los años cincuenta, la simulación toma un nuevo significado, ya que se hace posible experimentar con modelos matemáticos, que representan un sistema en una computadora. Esto resuelve rápidamente problemas, cuya solución de manera manual llevaría mucho tiempo. Por primera vez los científicos de áreas sociales y administrativas encontraron que, como los técnicos, también podían realizar experimentos de laboratorio controlados. Se desencadenaron entonces una serie de nuevas aplicaciones en todos los campos. Una definición actual y adecuada de simulación puede ser la siguiente:

De acuerdo a Elizondo y flores (2006), la simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, haciendo uso de gráficos, animación y otros dispositivos tecnológicos; lo cual involucra ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos, que describen el comportamiento de un sistema (o algún componente de éste) durante cierto tiempo.

### 1.2.1. Casos de aplicación en los que se ha utilizado la simulación en la planificación de redes de telecomunicaciones

El desarrollo vertiginoso actual de las tecnologías de comunicación, así como la competencia creciente en el sector, hace imprescindible el uso de herramientas que en definitiva permitan abaratar costos de diseño así

como mejorar la calidad y reducir el time-to-market de estos productos y tecnologías. Esta necesidad se comprende aún más si pensamos en la complejidad actual de las redes de telecomunicaciones, donde los resultados analíticos no son viables o bien sólo sirven para dar una idea aproximada como punto de partida.

Entre estas herramientas, juegan un papel fundamental los simuladores, que nos permiten realizar pruebas a distintos niveles en modelos simplificados de la realidad y reducir así los tiempos de desarrollo y aumentar la fiabilidad de los resultados. Por no hablar de lo complicado y costoso que resulta en ocasiones probar nuevos protocolos o productos en sistemas reales y los problemas que causaría un malfuncionamiento en un sistema real. Por otro lado, el principal objetivo de una red UMTS es:

- Proporcionar un amplio rango de servicios con una calidad suficiente, al máximo número de usuarios con el mínimo costo de red.

Estos puntos dependen de una óptima configuración de los protocolos y algoritmos. La complejidad de la red UMTS implica que una optimización eficiente, difícilmente puede ser realizada en una red real en funcionamiento.

Entre las ventajas de los simuladores de redes UMTS podemos encontrar el aumento de productividad en el desarrollo de redes, menor tiempo de desarrollo reduciendo costos al proporcionar a los desarrolladores especializados, herramientas de análisis y modelos para que se centren en las partes del proyecto más específicas, mejora en la calidad del producto, ya que permite probar el producto o servicio en escenarios realistas antes de pasar al sistema real, reducción del time-to-market, desarrollo y validación de los diseños antes que la competencia, estudio de sistemas complejos, en los cuales no es posible obtener resultados analíticos o bien éstos son sólo una referencia debido a las simplificaciones efectuadas.

De acuerdo a Alonso y López (2005), existen diversos tipos de simuladores, el tipo de simulador depende de los parámetros que deseamos modelar y analizar. Así, se pueden mencionar algunos:

**Simulador de Red (System Level):** analiza el tráfico generado en la red, QoS, trasposos, control de admisión, gestión de carga. Utiliza resultados del simulador de nivel de enlace.

**Simulador nivel de Enlace (Link level):** protocolos nivel enlace, control de errores. Por ejemplo, muy usados en UMTS para evaluar el rendimiento del uso de W-CDMA o TD-CDMA en la interfaz radio UTRA. Utiliza resultados del simulador de capa física o lo incluyen.

**Simulador capa física:** cobertura, potencia, células, análisis de obstáculos. Ejemplo: UMTSProbe.

**Simulador de protocolos:** verifica, analiza y optimiza protocolos. Ejemplo: UMTSProSIM (Ascom), protocolos de la red de acceso (AN).

**Simulador de terminal:** simulador de aplicaciones.

**Específicos:** gestión carga, gestión de recursos.

**Generadores de escenarios:** Ejemplo: BonnMotion.

**Simuladores integrados:** con varias funciones de las anteriores. Ejemplo: OPNET™: permite simular la red UMTS, protocolos, parámetros de capa física, etc.

Una vez que se ha analizado el problema de la planificación de redes móviles de telecomunicaciones en conjunto con sus conceptos asociados y el uso de la simulación en el proceso de la planificación, es posible describir y desarrollar el modelo de simulación de tráfico de la red como se observará en el Capítulo 2.

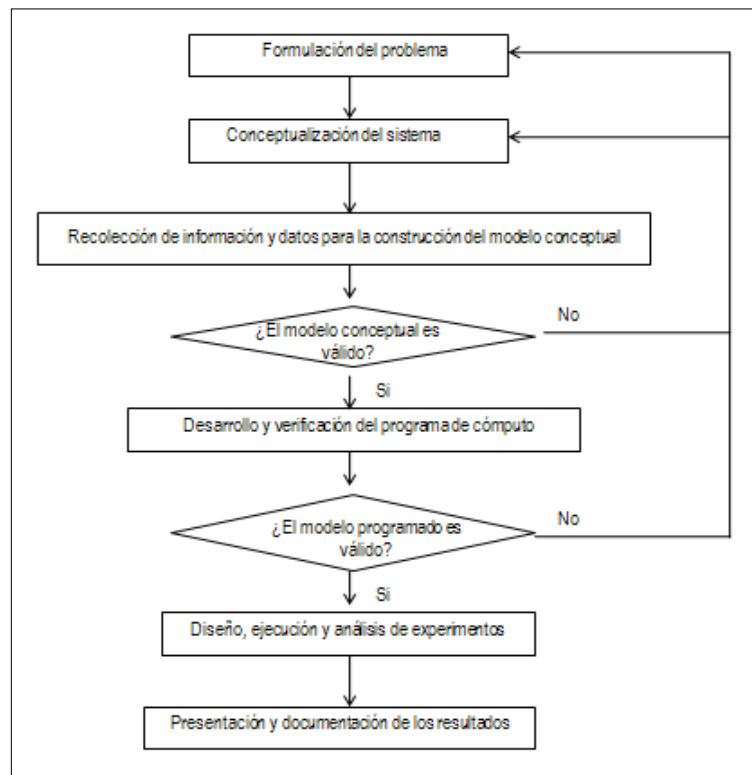
## Capítulo 2. Un modelo para la simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones

### Objetivos

- Describir el objetivo del modelo para la simulación de tráfico de una red de telecomunicaciones
- Describir el modelo para la simulación de tráfico de una red de telecomunicaciones, indicando sus antecedentes y generalidades.
- Elaborar el modelo conceptual del modelo para la generación de tráfico.
- Recolectar los datos numéricos que se emplearán en el modelo de simulación.
- Desarrollar el modelo para la simulación utilizando el software ARENA™.
- Verificar y validar el modelo de simulación.

En el Capítulo 2 se describe la construcción del modelo para la simulación de tráfico y su validación, se emplea la metodología propuesta en Elizondo y Flores (2006) y que es el resultado de la experiencia personal de distintos autores. Está constituida de ocho procesos: formulación del problema, conceptualización del sistema, recolección de información y datos para la construcción del modelo conceptual, validación del modelo conceptual, desarrollo y verificación del programa de cómputo, validación del modelo, diseño, ejecución y análisis de experimentos y, finalmente, la presentación y documentación de los resultados de simulación. En la Figura 10, se muestran los pasos de la metodología para la construcción y validación de un modelo de simulación.

Figura 10. Pasos de la metodología para la construcción y validación de un modelo de simulación



Fuente: Elizondo y Flores (2006).

En primer lugar se describe el sistema, su funcionamiento y los elementos que lo componen, así como la problemática a la que está sujeto. En segundo lugar se elabora un modelo conceptual del sistema, en el cual se apoya la problemática. Enseguida, se indican los datos numéricos que se emplearán en el modelo. Con base en toda la información anteriormente mencionada y en el manejo del software ARENA™ se desarrolla el modelo de simulación de tráfico, para finalmente, verificarlo y validarlo.

## 2.1. Descripción del modelo de simulación

El objetivo del modelo de simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones es analizar la variación del tráfico total generado por los usuarios potenciales en función de la capacidad de la red y de acuerdo a las aplicaciones que dichos usuarios utilizan.

El tráfico que se estudia mediante la simulación es el generado en una red móvil de telecomunicaciones que opera con tecnología de tercera generación. Al utilizar esta tecnología en una red móvil de telecomunicaciones es posible transmitir voz, datos y video a altas velocidades. Es importante recordar la problemática del sistema. La necesidad de los operadores de redes móviles de telecomunicaciones de proveer sus servicios con la mayor calidad de red posible en lugares de alta concentración de usuarios potenciales como son los aeropuertos, hace imperante que el proceso de planificación de la red sobre la cual proveerán dichos servicios sea optimizado de acuerdo a un criterio de costo-beneficio. Tanto la calidad de red como la inversión que los operadores están dispuestos a realizar, están directamente relacionados con las ganancias netas de la operación de la red, esto explica la complejidad de la planificación de la red, proceso que debe proporcionar suficiente cobertura y capacidad para los usuarios con la menor inversión posible de los operadores. De acuerdo a Mishra (2007), los principales factores que afectan la planificación de la red radio y dentro de este proceso, al tráfico generado, son los requerimientos de los usuarios potenciales en relación a la utilización de servicios y aplicaciones, zonas de cobertura, calidad de la red, morfología del área de servicio y movilidad. Esto implica costos elevados para los operadores por la instalación de equipos y su correspondiente operación y mantenimiento, por lo que se busca determinar el radio de celda (nodo B) y consecuentemente el número de equipos que se deberán instalar con los objetivos de maximizar la relación costo beneficio de la red radio y de satisfacer los requerimientos de los usuarios potenciales. Todo en un ambiente de aeropuerto.

### 2.1.1. Generalidades del modelo

El lugar físico para el cual se desea llevar a cabo la planificación de la red móvil de telecomunicaciones con el objetivo de dar cobertura de interior es el aeropuerto internacional de los Cabos en Baja California Sur, México. Cabe destacar que el aeropuerto internacional de Los Cabos está clasificado como el séptimo más importante del país. En el año 2005, el aeropuerto recibió un total de 2,466,733 pasajeros, de los cuales 431,724 fueron nacionales y 2,035,009 internacionales, según datos de la operadora, Grupo Aeroportuario del Pacífico (GAP). Este aeropuerto puede realizar alrededor de 22 operaciones por hora; en el año 2005, registró una cantidad de 414,722 operaciones, 6.2% más que el 2004.

Figura 11. Aeropuerto internacional de Los Cabos, BCS.



Fuente: Grupo Aeroportuario del Pacífico.

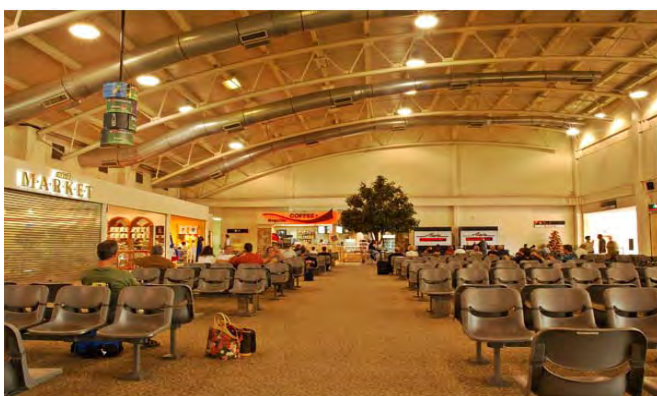
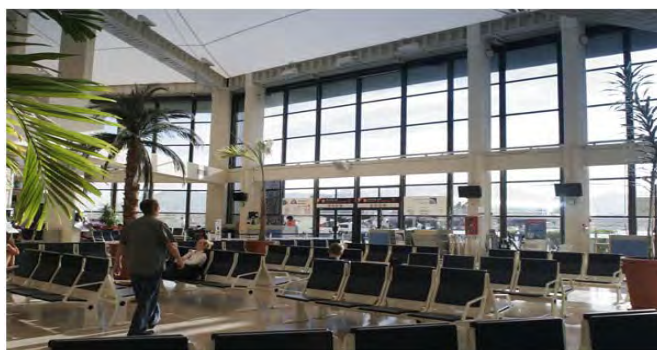
La Tabla 11 indica las dimensiones y el número de usuarios por hora<sup>1</sup> en el aeropuerto internacional de Los Cabos Baja California Sur.

Tabla 11. Especificaciones de la terminal del aeropuerto internacional de Los Cabos

Ciudad	Dimensiones de la Terminal [m <sup>2</sup> ]	Usuarios/hora
Los Cabos, BCS	8440	730

Fuente: Elaboración propia con base en la información de los aeropuertos de México.

Figura 12. Terminal del aeropuerto internacional de Los Cabos, BCS.



Fuente: Grupo Aeroportuario del Pacífico.

<sup>1</sup><http://www.aeropuertosmexico.com>.



## Procedimiento

En Kelton et al. (2007) se indica que, los arribos de llamadas a un centro de atención telefónica se generan mediante una distribución de Poisson. En teoría de probabilidad y estadística, la distribución de Poisson es una distribución de probabilidad discreta. Expresa la probabilidad de un número  $k$  de eventos ocurriendo en un tiempo fijo si estos eventos ocurren con una tasa media conocida, y son independientes del tiempo desde el último evento.

La distribución fue descubierta por Siméon – Denis Poisson (1781-1840) que publicó, junto con su teoría de probabilidad, en 1833 en su trabajo *Recherches sur laprobabilité des jugements en matières criminelles et matière civile* ("Investigación sobre la probabilidad de los juicios en materias criminales y civiles"). El trabajo estaba enfocado en ciertas variables aleatorias  $N$  que cuentan, entre otras cosas, un número de ocurrencias discretas (muchas veces llamadas "arribos") que tienen lugar durante un intervalo de tiempo de duración determinada.

La distribución Poisson se aplica a varios fenómenos discretos de la naturaleza (esto es, aquellos fenómenos que ocurren 0,1,2,3,... veces durante un período definido de tiempo o en un área determinada) cuando la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es constante en el tiempo o en el espacio.

Ejemplos de estos eventos que pueden ser modelados por la distribución Poisson incluyen:

- El número de automóviles que pasan a través de un cierto punto en una ruta (suficientemente distantes de los semáforos) durante un período definido de tiempo.
- El número de errores de ortografía que uno comete al escribir una única página.
- El número de servidores web accedidos por minuto.

En el Anexo 1, se describe la función de distribución de Poisson, con mayor referencia para el lector.

Para el caso específico de la presente investigación, se presenta un número de ocurrencias ("arribos") de llamadas, de forma discreta, en cada hora pico a tomar en cuenta. Los arribos de llamadas de una hora pico específica son independientes de los arribos de llamadas en el resto de horas picos.

Una vez que la llamada llega a la red, se verifica si existen circuitos disponibles para atender la llamada, en caso positivo, se acepta la llamada y se determina el tipo de llamada de acuerdo al porcentaje de utilización considerado para cada aplicación. Se consideran cuatro tipos de llamadas que corresponden a las cuatro aplicaciones, a saber, Voz sobre IP, Video-teléfono, Transferencia de archivos FTP y Video-teléfono de alta definición.

Una vez que se ha determinado el tipo de llamada, ésta se procesa de acuerdo a su función de distribución probabilística y a su duración media. Cuando el procesamiento de la llamada termina, se libera el circuito utilizado, para dar oportunidad a que sea utilizado por otra llamada entrante. Como resultado del procesamiento de cada tipo de llamada, se genera el tráfico parcial medido en Mbits/s.

El tráfico generado total medido en Mbits/s, será la suma de los tráficos parciales generados por cada tipo de aplicación.

En el caso de que no haya canales disponibles para procesar una llamada entrante, se rechaza la llamada.

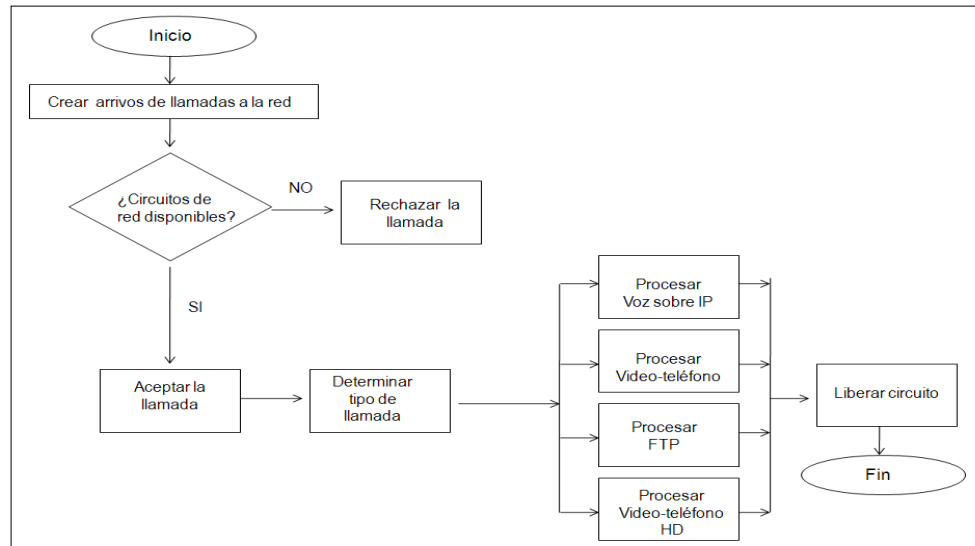


## 2.2. Elaboración del modelo conceptual

El modelo conceptual para la generación de tráfico propuesto se describe en el diagrama de flujo de la Figura 13. Tiene un inicio después del cual se crean los arribo de llamadas a la red y se verifica si hay circuitos disponibles en caso negativo se rechaza la llamada y se incrementa el contador de llamadas rechazadas mientras que en caso positivo se acepta la llamada y se determina el tipo de llamada. Se procesa la llamada de acuerdo al tipo que sea, Voz-IP, FTP, Video-teléfono o bien Video-teléfono HD, una vez que se procesa cada llamada, se incrementa el contador de llamadas procesadas y se libera el circuito.

### Diagrama de flujo

Figura 13. Diagrama de flujo de la generación de tráfico



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo conceptual.

Con base en el diagrama, los componentes del modelo se describen a continuación:

### Entidades

Para este caso, se pueden definir las llamadas como entidades. Existen cuatro tipos de llamadas.

### Atributos

Se definen como atributos, el tiempo de procesamiento de cada tipo de llamada que arriba a la red de acuerdo a su distribución de probabilidad de duración.

### Variables (Globales)

Tráfico total generado en la red como función del radio de cobertura de los nodos B y llamadas rechazadas. A estas dos variables se les define como globales, ya que caracterizarán el proceso y servirán como punto de comparación al realizar cambios en el mismo.

### Recursos

Para este caso, se utilizarán los siguientes recursos: la capacidad de procesamiento de llamadas en la red (canales disponibles) y que dependerá del radio de cobertura, la capacidad de procesamiento para cada tipo de llamadas. Debido a que el la capacidad de la red determina la capacidad del sistema, se asume que la capacidad de procesamiento para cada tipo de llamadas es muy grande.

### Estadísticas acumuladas

Para obtener las medidas de la simulación, es necesario tener almacenadas varias variables de estadísticas acumuladas. En este caso, se definen las estadísticas de llamadas totales procesadas para cada tipo de llamada así como las llamadas totales rechazadas. Todos estos acumulados se inicializan en cero para cada simulación.

### Eventos

Los diferentes eventos que se pueden definir para hacer la simulación dentro de un calendario de eventos son las horas pico. Se consideran 7 horas pico a lo largo del día.

### Reloj de la simulación

El reloj de la simulación para este caso es un calendario de eventos, en períodos de media hora, para cada período se tiene un número de llamadas que arriban a la red.

### Inicio y fin de la simulación

Cómo empezar y terminar la simulación es muy importante, en este caso se inicia la simulación en la hora cero del día. Se simula un día completo, por lo tanto, la simulación termina a las 24 horas.

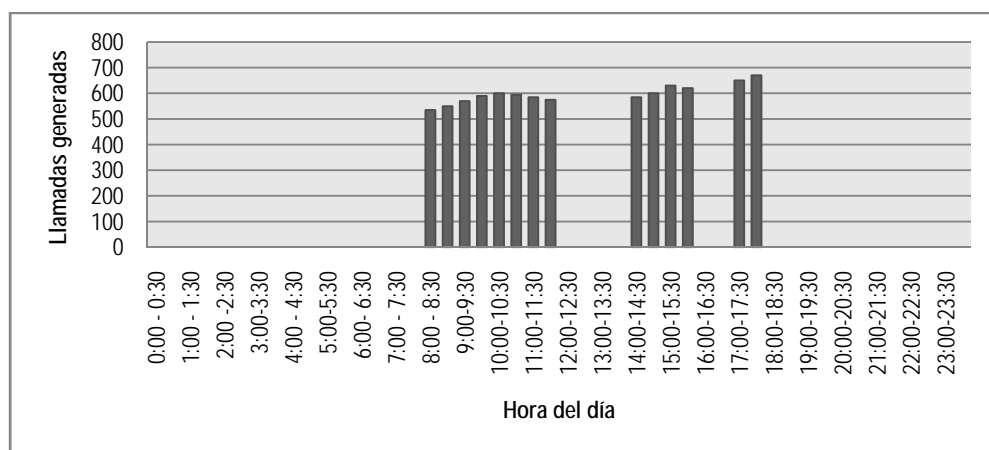
## 2.3. Información numérica del modelo

En lo referente a los datos de entrada del modelo, éstos quedan determinados por las llamadas entrantes, la capacidad de la red así como las horas pico de la red.

- **Generación de llamadas entrantes**

La generación de llamadas propuesta, para períodos de media hora, queda expresada en el Gráfico 6. Es decir, se generan llamadas solamente en los períodos de 8:00 – 12:00 hrs, 14:00 – 16:00 hrs y de 17:00 – 18:00 hrs. En el resto del día se consideran que no existen llamadas, es decir, los usuarios de la red no generan ninguna llamada.

Gráfico 6. Distribución de llamadas generadas.



Fuente: Elaboración propia con base en la propuesta de generación de llamadas entrantes.

- **Capacidad de la red**

Se considera que cada nodo  $B$  sólo tendrá capacidad de 1 portadora (TRX), lo que equivale a 7 canales de tráfico y 1 de señalización. La capacidad de la red en función del radio de cobertura teórico queda

expresada en la Tabla 12. El área total para dar cobertura es 8440 [m<sup>2</sup>] y se considera el área teórica de una antena omnidireccional,  $\pi r^2$ .

Tabla 12. Relación teórica de número de celdas y radio de cobertura.

Configuración de la red [Número de celdas]	Radio de celda[m]	Capacidad de celda [Canales]
3	30	21
6	21	42
8	18	48
10	16	70
12	15	84
14	14	98
16	13	112
18	12	126
20	12	140
22	11	154

Fuente: Elaboración propia con base en el área de cobertura teórica de celdas.

- **Horas pico diarias en la red.**

De acuerdo al Gráfico 6, se considerará, para propósitos de la simulación y de acuerdo a lo observado en la visita al aeropuerto internacional de Los Cabos, que en la red existen 7 horas pico distribuidas a lo largo del día, en las ventanas de 8–12 hrs, 14-16 hrs y de 17-18 hrs. Para el resto de las horas del día se considera que los usuarios no generan llamadas.

Se considera también, que un día a la semana se presenta el tráfico propuesto en el aeropuerto internacional de Los Cabos, por lo tanto, en un año, se presentarían 52 días de tráfico pico en dicho aeropuerto.

#### 2.4. Selección del software de simulación

Las simulaciones de sistemas utilizando sistemas informáticos son de gran aplicación en el ámbito de la ingeniería. En ellas se puede observar la evolución del sistema, sus características, propiedades, etc., existiendo únicamente en la memoria de un ordenador.

De acuerdo a Elizondo y Flores (2006), una de las decisiones más importantes para quien está desarrollando un modelo de simulación se refiere a la selección del software. Si el software seleccionado no es suficientemente flexible o es muy difícil de usar, entonces el proyecto de simulación puede producir resultados erróneos o quedar incompleto. En forma natural, cuando se elabora un modelo de simulación, se busca que todo el esfuerzo computacional realizado trascienda al modelo mismo, que podamos utilizarlo de nuevo y si es posible, que otras personas puedan hacerlo también. Este es el origen de los lenguajes de simulación, de ahí que no resulte extraño que cada día aparezcan nuevos lenguajes de este tipo. Además dada la amplia gama de aplicaciones, los paquetes tienden a especializarse de acuerdo con el tipo de aplicación de que se trate.

Actualmente se encuentra en el mercado un número considerable de paquetes creados para diferentes tipos de aplicaciones. En Elizondo y Flores (2006) podemos encontrar algunas de las ventajas y desventajas de los paquetes de propósito específico, y se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Ventajas y desventajas de los paquetes de propósito específico

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proporcionan una mejor detección de errores debido a que muchos errores potenciales se revisan en forma automática.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El analista debe apegarse a los requerimientos del formato de salida del lenguaje.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Suministran una plataforma natural para hacer un modelo de simulación. La estructura de su modelo básico es más cercano a los modelos de simulación que la de los lenguajes de programación de propósito general.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Si no se cuenta con la documentación necesaria para nuevas versiones del paquete, puede suceder que el usuario cometa errores que le sean difíciles de detectar y de esta manera el uso del paquete es incorrecto.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tienen la habilidad para construir en forma sencilla las subrutinas que el usuario proponga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Que el usuario desconozca el paquete.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Generan automáticamente ciertos datos que se necesitan en las corridas de simulación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Que el paquete no sea el adecuado o tener deficiencias, para el sistema que se está modelando. De ahí la importancia de la validación.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facilitan la recopilación y el despliegue de los datos producidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los términos y resultados arrojados en las corridas son en ocasiones complicados y sólo comprensibles para quienes tienen ya conocimiento teórico de los procesos que se desean simular.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Controlan la administración y la asignación del almacenamiento de la computadora, durante la corrida de la simulación.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los modelos de simulación son más fáciles de modificar y mantener cuando están escritos en un paquete de simulación.</li> </ul>	

Fuente: (Elizondo y Flores, 2006).

Elizondo y Flores (2006) propone, de forma general, dividir en dos fases el proceso de selección del software. Éste proceso se tomó como base para la selección del software Arena™ a utilizar en la tesis, en lo siguiente se describe el procedimiento utilizado.

#### Primera fase

Esta fase se refiere a cuestiones relacionadas con referencias, documentación y compatibilidad. De esta forma, se respondió a las siguientes preguntas teniendo en cuenta que se ha seleccionado el software ARENA™.

- ¿Existe un manual de usuario inteligible? **Afirmativo.**
- ¿El código del lenguaje es compatible con las computadoras existentes? **Afirmativo.**
- ¿Puede usarse el lenguaje en otras computadoras? **Afirmativo.**
- ¿Tiene documentación suficiente y diagnóstico adecuados de errores? **Afirmativo.**
- ¿Cuál es el costo de la instalación, mantenimiento y actualización? El costo de instalación y mantenimiento asciende al costo de adquisición del paquete y es de \$300.00 pesos (moneda nacional). El costo de actualización equivale a una nueva adquisición ya que no se tienen actualizaciones gratuitas.
- ¿Es conocido el lenguaje y fácil de aprender? **Afirmativo.**
- ¿Hay estudios suficientes que justifiquen el costo de instalar y aprender un nuevo lenguaje? **Afirmativo.**
- ¿Es compatible con otro tipo de software? **Afirmativo.**

## Segunda fase

Esta fase considera las características del problema que se investiga. De esta forma, se respondió a las siguientes preguntas teniendo en cuenta que el problema planteado se enfoca en una red de telecomunicaciones de tercera generación.

- ¿Para qué tipos de problemas reales es adecuado el lenguaje? **Simulación de procesos para negocios, simulación de centros de llamadas, simulación de manufactura, simulación de canales de suministro, logística y almacén.**
- ¿Qué tan fácil pueden almacenarse y modificarse los datos del sistema? **Es muy fácil, a través de módulos.**
- ¿Cómo es la flexibilidad y la capacidad del lenguaje para realizar cambios en el sistema? **Gran flexibilidad al ser totalmente jerárquico.**
- ¿Cómo son los reportes de salida y qué análisis estadístico puede realizarse con los datos? **Los reportes de salida pueden ser tres: Resumen de categorías, Categoría por réplicas y Recursos. El software posee dos analizadores, un Analizador de resultados (Output Analyzer) para comparar dos versiones alternativas de los modelos y un Analizador de procesos (Process Analyzer) para ejecutar varios escenarios en forma conveniente y medir los efectos de las entradas en los resultados.**
- ¿Qué tan sencillo es incluir subrutinas elaboradas por el usuario? **Los módulos de ARENA™ están compuestos por componentes en lenguaje de simulación SIMAN por lo que se pueden crear módulos propios y reunirlos en las plantillas propias para varias clases de sistemas.**

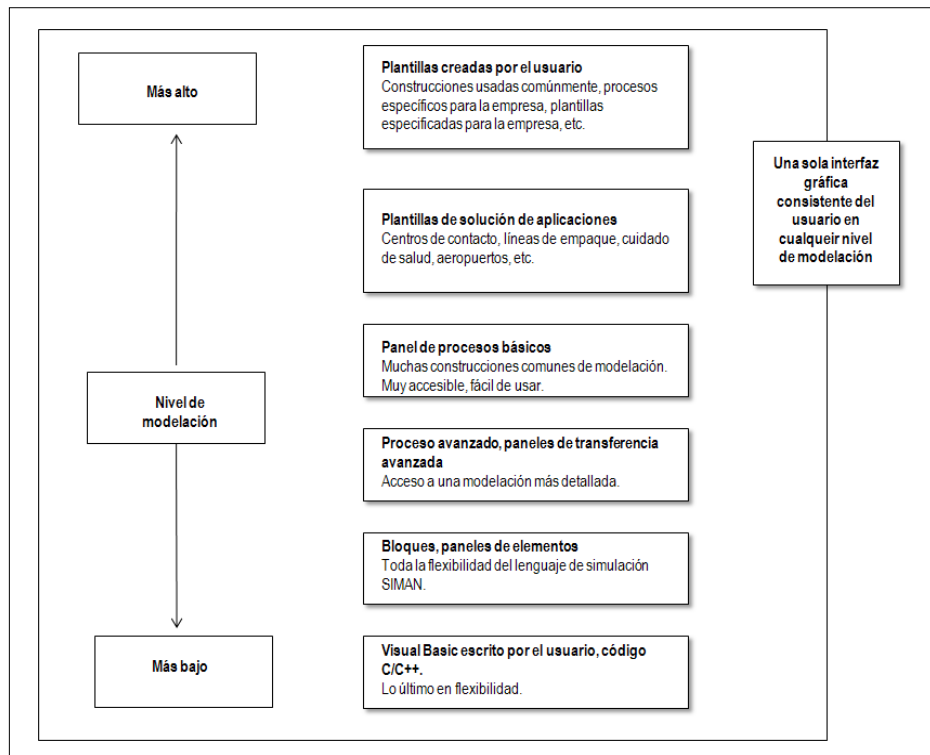
Con la finalidad de que el lector tenga un mejor entendimiento del software ARENA™, en la siguiente sección se hace una breve descripción del mismo.

### 2.5. Descripción del software ARENA™

El software ARENA™ de acuerdo a Kelton et al. (2007), combina la facilidad de uso de los simuladores de alto nivel, los cuales operan mediante interfases intuitivas del usuario, gráficas, menús y diálogos, con la flexibilidad de los lenguajes de simulación y recorre todo el camino de los lenguajes de procesamiento de propósito general como el sistema de programación Microsoft® Visual Basic® o C si realmente lo requiere. Lo hace así al proporcionar plantillas alternativas e intercambiables de modelación de simulación gráfica y módulos de análisis que se pueden combinar para desarrollar una amplia variedad de modelos de simulación. Para una mayor visualización y organización, los módulos están por lo general agrupados en paneles para componer una plantilla. Al cambiar los paneles se obtiene acceso a un conjunto completamente diferente de construcciones y capacidades de modelado de simulación. En la mayoría de los casos, los módulos de diferentes paneles pueden mezclarse en el mismo modelo. El software ARENA™ mantiene su flexibilidad de modelación al ser totalmente jerárquico, como se demuestra en la Figura 14. En cualquier momento pueden utilizar los módulos de bajo nivel del panel de Bloques y elementos, y tener acceso a la flexibilidad del lenguaje de simulación y mezclar las construcciones de SIMAN con módulos de más alto nivel de otras plantillas (ARENA™ se basa en el lenguaje de simulación SIMAN y lo incluye).

Para necesidades especializadas, como algoritmos complejos de decisión o datos de acceso desde una aplicación externa, se pueden escribir partes del modelo en un lenguaje de procesamiento como Visual Basic o C/C++. Todo esto, a pesar de cuán alto o bajo se quiera ir en la jerarquía, tiene lugar en la misma interfaz gráfica consistente del usuario. De hecho, los módulos de ARENA™ están compuestos por componentes SIMAN: se pueden crear módulos propios y reunirlos en las plantillas propias para varias clases de sistemas. El software también incluye animación dinámica en el mismo ambiente de trabajo, proporciona apoyo integrado y gráficas para algunos de los temas de diseño y análisis estadísticos que son parte y componente de un buen estudio de simulación.

Figura 14. Estructura jerárquica de ARENA™.



Fuente: Kelton et al.(2007).

Una vez introducido brevemente el software ARENA™, se presenta el desarrollo del modelo de simulación de tráfico utilizando el software ARENA™.

## 2.6. Desarrollo del modelo de simulación de tráfico de redes de telecomunicaciones

Cabe mencionar que para este trabajo, se realiza la modelación con el software de simulación ARENA™ v.10 académico, debido a que es el software que está al alcance. ARENA™ como software de simulación orientado a procesos, cuenta con un conjunto de modelos que permiten describir el sistema en forma gráfica.

En la Figura 15 se indica el diagrama correspondiente al modelo propuesto de simulación de tráfico de una red móvil de telecomunicaciones en ARENA™.

El modelo se construyó con los siguientes módulos: Create, Record, Decide, Seize, Dispose, Assign, Process y Release.

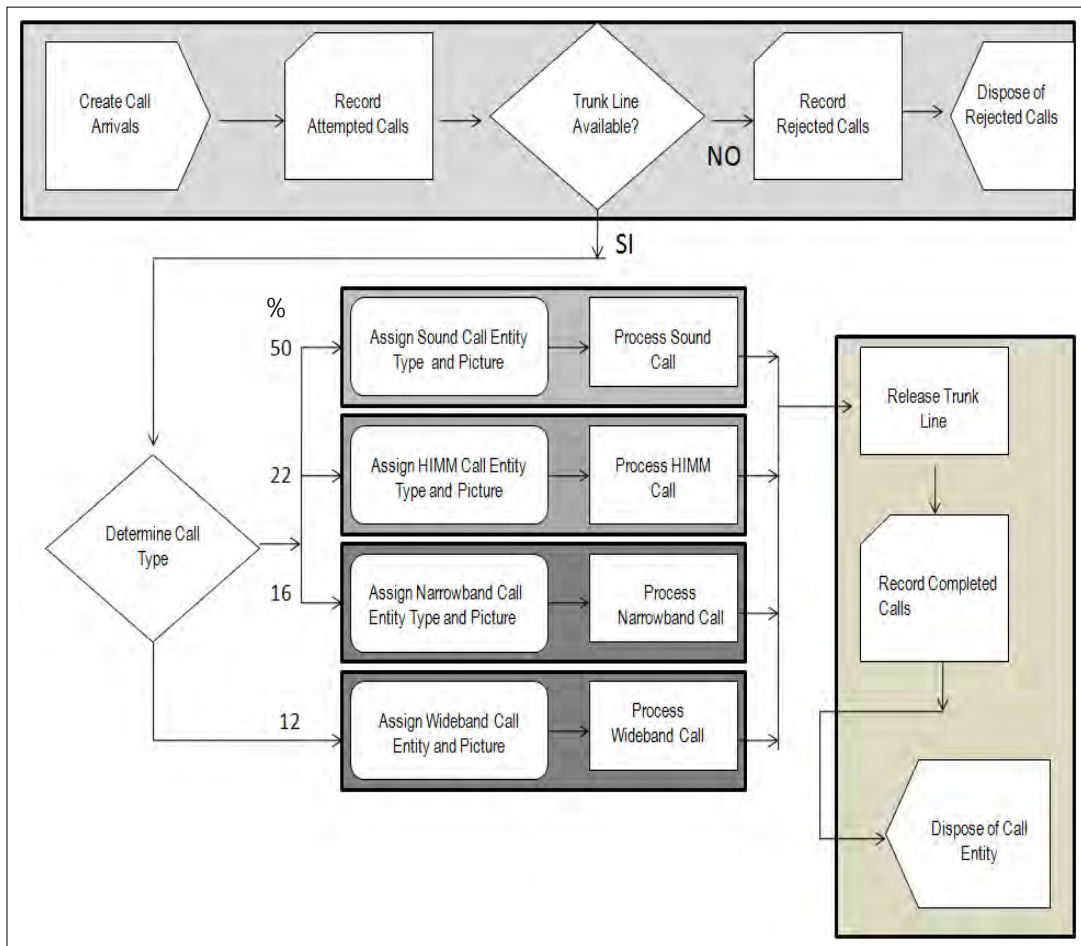
**Create:** crea los arriros de las llamadas de acuerdo a una distribución especificada en el programa de arriros.

**Record:** graba los arriros de llamadas, llamadas rechazadas y llamadas completadas.

**Seize:** cuando existe alguna unidad del recurso Trunk Line, se toma el recurso mediante este módulo.

**Decide:** se utiliza para dos casos: el primero de ellos es para revisar si hay disponible alguna unidad del recurso Trunk Line que representa a los canales de la red, el segundo caso de uso es para determinar el tipo de llamada de acuerdo a los porcentajes de utilización dados.

Figura 15. Modelo en ARENA™



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo de simulación en ARENA.

**Dispose:** cuando finaliza el procesamiento de las entidades o llamadas, se envían a éste módulo, en donde salen del sistema.

**Assign:** se utiliza para asignar el tipo de llamada.

**Process:** Toma los recursos de la red para cada tipo de llamada. En este módulo se definen las duraciones de las llamadas con su correspondiente distribución probabilística.

**Release:** Este módulo libera los recursos utilizados una vez que ha terminado el proceso.

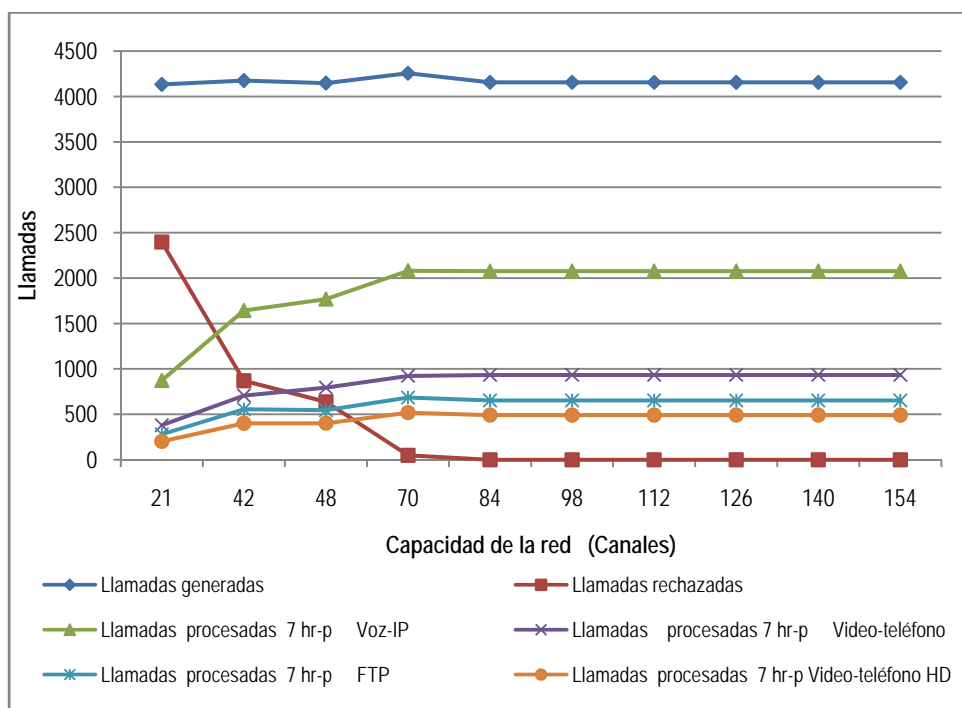
## 2.7. Verificación y validación del modelo de simulación

Una vez implementado el modelo, se requiere realizar la verificación de su funcionamiento. En esta etapa se analiza si el modelo programado se comporta adecuadamente tal y como fue diseñado inicialmente. Para este propósito, se utiliza la Técnica 4 para la verificación del programa de cómputo descrita en Elizondo y Flores (2006).

**Técnica 4.** En esta técnica se recomienda correr la simulación para varios escenarios, haciendo cambios en los parámetros del programa y revisar que los resultados sean razonables.

De esta forma, se ejecutó la simulación para 1 día y se varía la capacidad de la red, medida en canales: 21, 42, 48, 70, 84, 98, 112, 126, 140 y 154 canales disponibles. Los resultados de la simulación se muestran en el Gráfico 7.

Gráfico 7. Resultados de simulación capacidad de red variable.



Fuente: Elaboración propia con base en la información de la simulación.

Se observa del Gráfico 7 que cuando la capacidad de la red es mínima, 21 canales, se obtiene el valor máximo de llamadas rechazadas, 2398, y el mínimo número de llamadas procesadas, 873 llamadas de Voz-IP, 380 llamadas de Videoteléfono, 280 llamadas de FTP y 202 llamadas de Videoteléfono HD.

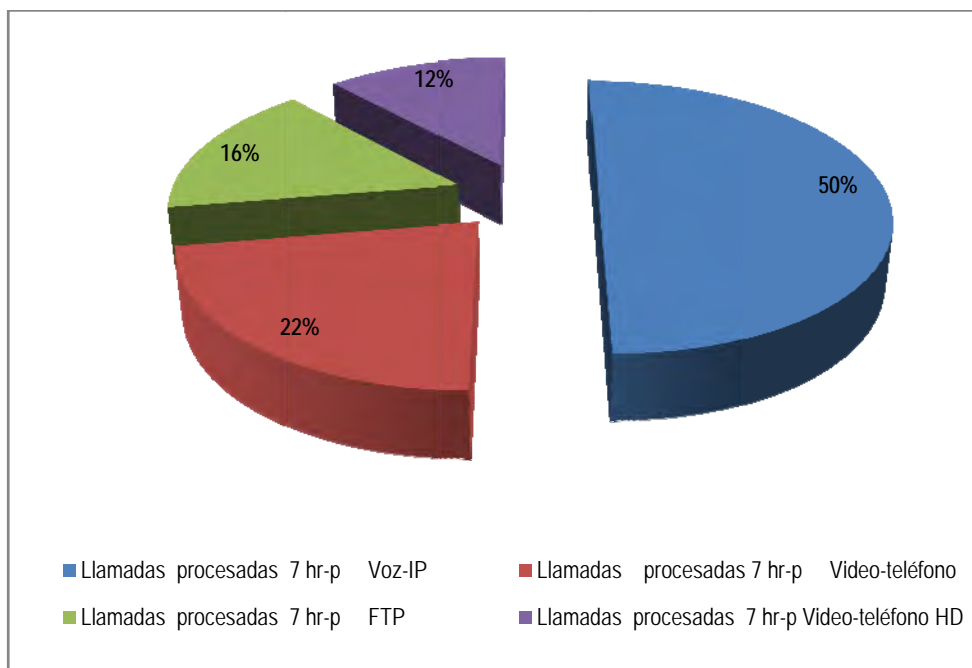
A medida que la capacidad de la red se incrementa, el número de llamadas rechazadas disminuye y el número de llamadas procesadas se incrementa, lo que responde a una lógica de cualquier red de telecomunicaciones, a mayor capacidad de red, mayor procesamiento de llamadas.

Así, se llega a una capacidad de la red en que ya no existen llamadas rechazadas, correspondiente a 84 canales, y en donde se procesan todas las llamadas generadas, 4156, distribuidas en 2077 llamadas de Voz-IP, 934 llamadas de Videoteléfono, 654 llamadas de FTP y 491 llamadas de Videoteléfono HD. El porcentaje de utilización de las llamadas procesadas, corresponde con el porcentaje de utilización inicialmente planteado para los servicios y aplicaciones y mostrado en la Tabla 9, a saber, 50% Voz-IP, 22% Video-teléfono, 16% FTP y 12% Videoteléfono HD.

El Gráfico 8 muestra la distribución de las llamadas procesadas por tipo de aplicación.



Gráfico 8. Distribución de llamadas procesadas por tipo de aplicación.



Fuente: Elaboración propia con base en la información de simulación.

Con base en todo lo anterior, se concluye que los datos obtenidos al simular en ARENA™ el procesamiento de llamadas en la red son razonables y se verifica el modelo programado.

De acuerdo a Elizondo y Flores (2006), una vez realizado el proceso de verificación se procede con el proceso de validación. La validación es la evaluación del modelo en cuanto a que sea una representación precisa de la realidad; la validación normalmente se realiza por la calibración del mismo, un proceso interactivo para comparar el comportamiento del modelo con el comportamiento real del sistema, y hacer uso de la discrepancia entre los dos, para mejorar el comportamiento del modelo, este proceso se efectúa hasta que se considera que el modelo es una representación aceptable del sistema, generalmente se logra afinando la construcción del modelo.

Para el caso de estudio, la validación del programa de cómputo se realiza mediante la prueba de *Conducta de casos extremos* descrita en Elizondo y Flores (2006).

Esta prueba consiste en llevar el modelo a los casos extremos, casos donde las condiciones se exageran al máximo; donde las situaciones reales serían fácilmente previsible. Si los resultados son consistentes con la manera en que se percibe cómo debería operar el sistema, entonces se dice que el programa de simulación tiene *validez confrontada*.

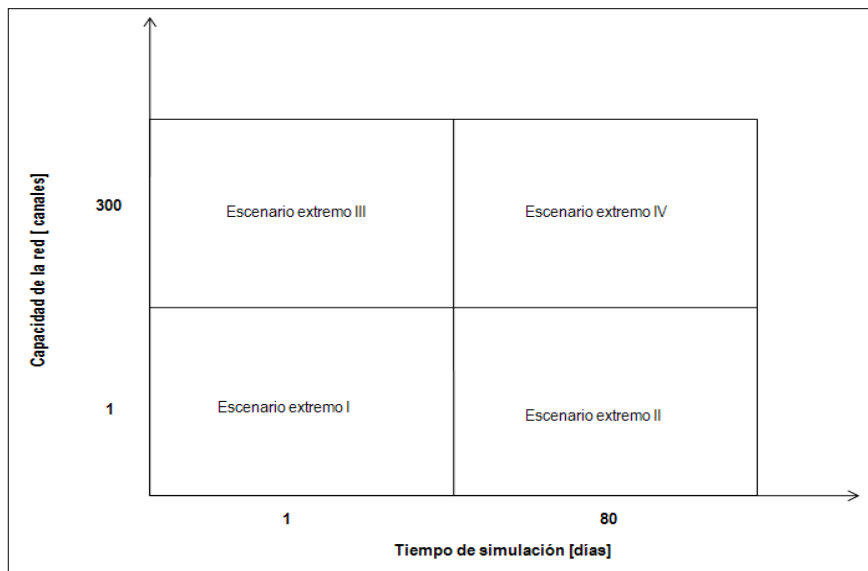
De esta forma, los casos extremos a los que se somete el programa de cómputo realizados en este trabajo son:

- Capacidad en la red medida en canales. Mínima: 1 canal - Máxima: 300 canales.
- Tiempo de simulación medido en días. Mínimo: 1 día - Máximo 80 días

De los casos extremos se obtiene la matriz de escenarios extremos mostrada en la Figura 16. Así, en el escenario extremo I se simula el tráfico de la red durante 1 día con capacidad de red 1 canal, en el escenario extremo II se

simula el tráfico de la red durante 80 días con capacidad de red de 1 canal, en el escenario extremo III se simula el tráfico de la red durante 1 día con capacidad de red de 300 canales y finalmente en el escenario extremo IV se simula el tráfico de la red durante 80 días con capacidad de red de 300 canales.

Figura 16. Matriz de escenarios extremos.



Fuente: Elaboración propia con base en la propuesta de validación del programa de cómputo.

La Tabla 14 y el Gráfico 9, Gráfico10, Gráfico 11 y Gráfico 12 muestran los resultados de las simulaciones para los casos extremos.

Tabla 14. Resultados de simulación para casos extremos.

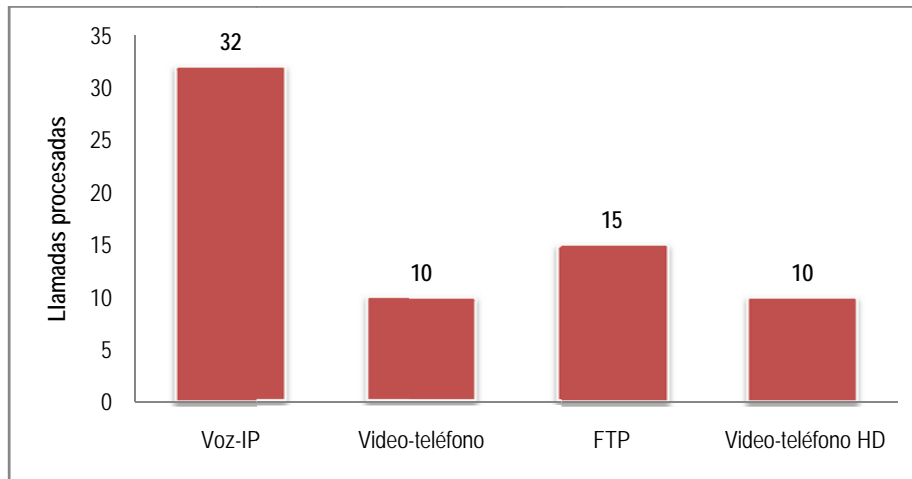
Días	Canales	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
1	1	4233	4166	32	10	15	10
80	1	332906	326075	3422	1583	1043	783
1	300	4156	0	2077	934	654	491
80	300	333755	0	166539	74176	53193	39847

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

En el caso en que se ejecuta la simulación con duración de 1 día y capacidad de la red de 1 canal, se generan 4233 llamadas, de las cuales 4166 son rechazadas, procesándose únicamente 67 llamadas, distribuidas de acuerdo al Gráfico 9. Este primer caso extremo, en donde se expone una mínima capacidad de la red, capacidad de un solo canal, es claro que el número de llamadas rechazadas sea muy grande, hecho que coincide con lo que pasa en

realidad en una red de telecomunicaciones con una capacidad mínima superada por la demanda de llamadas. Técnicamente se habla de la existencia de sobreutilización de la red.

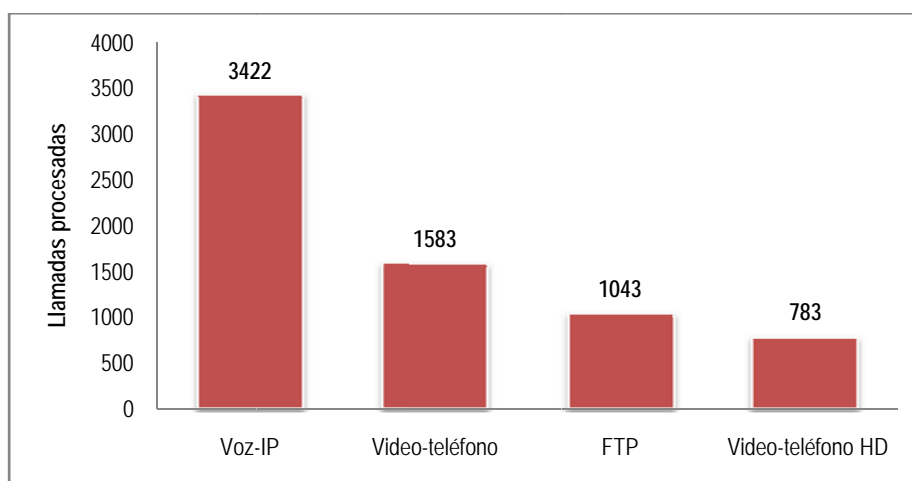
Gráfico 9. Llamadas procesadas 1 día - 1 canal.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

En el caso en que se ejecuta la simulación con duración de 80 días y capacidad de la red de 1 canal, se generan 332906 llamadas, de las cuales 326075 son rechazadas, procesándose únicamente 6831 llamadas, distribuidas de acuerdo al Gráfico 10. Este segundo caso extremo, en donde se expone una mínima capacidad de la red, capacidad de un solo canal, es claro que el número de llamadas rechazadas sea muy grande, hecho que coincide con lo que pasa en realidad en una red de telecomunicaciones con una capacidad mínima superada por la demanda de llamadas. Técnicamente se habla de la existencia de sobreutilización de la red.

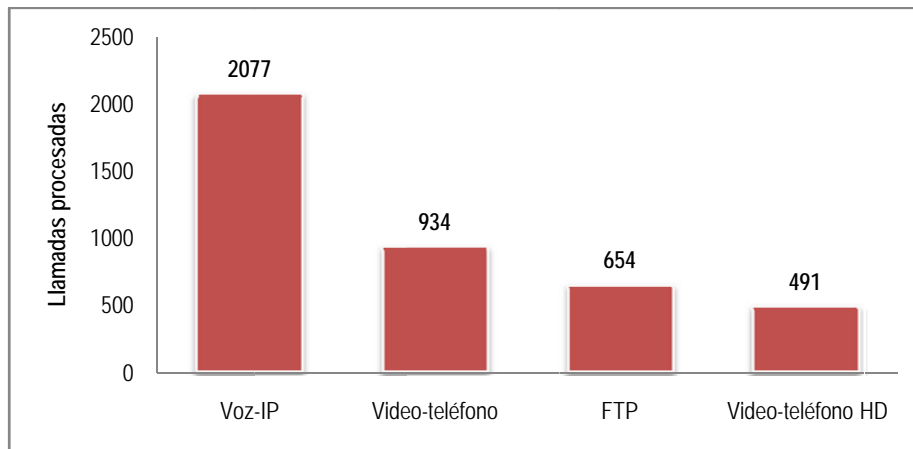
Gráfico 10. Llamadas procesadas 80 días - 1 canal.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Por otra parte, en el caso en que se ejecuta la simulación con duración de 1 día y capacidad de la red de 300 canales, se generan 4156 llamadas, de las cuales no existen rechazadas, procesándose todas las llamadas generadas, distribuidas de acuerdo al Gráfico 11. Este tercer caso extremo, en donde se expone una máxima capacidad de la red, 300 canales, es evidente que el número de llamadas rechazadas sea cero a lo largo del tiempo, hecho que coincide con lo que pasa en realidad en una red de telecomunicaciones. Técnicamente se habla de la existencia de subutilización de la red.

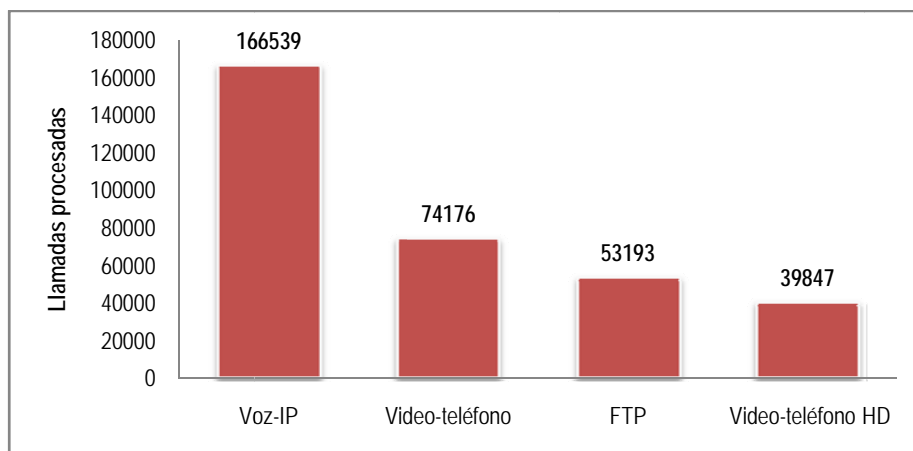
Gráfico 11. Llamadas procesadas 1 día – 300 canales.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Mientras que, en el caso en que se ejecuta la simulación con duración de 80 días y capacidad de la red de 300 canales, se generan 333755 llamadas, de las cuales no existen rechazadas, procesándose todas las llamadas generadas, distribuidas de acuerdo al Gráfico 12. Este tercer caso extremo, en donde se expone una máxima capacidad de la red, 300 canales, es evidente que el número de llamadas rechazadas sea cero a lo largo del tiempo, hecho que coincide con lo que pasa en realidad en una red de telecomunicaciones. Técnicamente se habla de la existencia de subutilización de la red.

Gráfico 12. Llamadas procesadas 80 días – 300 canales.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Con base en todo lo anterior, se puede decir que el programa de simulación tiene validez confrontada.

## Capítulo 3. Diseño de experimentos y análisis de resultados

### Objetivos

- Diseñar el conjunto de experimentos a ser simulados, estableciendo el tiempo de simulación para cada experimento.
- Analizar los resultados obtenidos en cada experimento.

En el Capítulo 3 se lleva a cabo el diseño de experimentos a simular así como el análisis de los resultados. Los experimentos se realizan con el software ARENA™ versión académica (10.0). Ésta versión permite la simulación de 1 hasta 80 días debido principalmente al número de registros que se generan en el proceso de simulación. Por esta razón la simulación se realiza de 1 hasta 80 días. A pesar de tener esta limitación en el software, es posible llevar a cabo el estudio de simulación, ya que los resultados obtenidos se estabilizan a partir de los 40 días en la mayoría de los experimentos. Para cada experimento se varía el número de celdas que conforman cada configuración de la red móvil de telecomunicaciones a analizar. Como resultado se obtienen las llamadas procesadas totales diarias en función de la capacidad de la red. Esta capacidad de red queda determinada directamente por el número de celdas a utilizar en cada configuración. Los resultados que se espera obtener de llamadas procesadas totales diarias se clasifican por tipo de llamada, a saber, llamadas de Voz-IP, llamadas de Video-Teléfono, llamadas FTP y llamadas de Video-Teléfono HD. Cuando la capacidad de la red no es suficiente para procesar todas las llamadas generadas en un determinado momento de la simulación, las llamadas se rechazan y se asume que es una llamada perdida para la red.

### 3.1. El diseño de experimentos

En la Tabla 15 se observan 10 configuraciones de red distintas en función del número de celdas que conforman a cada una, como hemos mencionado, el área total para dar cobertura es 8440 [m<sup>2</sup>], área del aeropuerto internacional de Los Cabos Baja California Sur, y considerando el área teórica de una antena omnidireccional,  $\pi r^2$ , resulta que cada configuración de red queda determinada por un radio de celda específica ya que se considera que todas las celdas en cada configuración tienen las mismas dimensiones. En relación a la capacidad de la red, medida en canales, recordemos que cada celda tiene la capacidad de 7 canales de tráfico, de esta forma la capacidad de red en cada configuración es directamente proporcional al número de celdas multiplicada por 7.

Tabla 15. Número, radio y capacidad de celda.

Configuración de la red [Número de celdas]	Radio de celda [m]	Capacidad de celda [Canales]
3	30	21
6	21	42
8	18	48
10	16	70
12	15	84
14	14	98
16	13	112
18	12	126
20	12	140
22	11	154

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se indicó, el software nos permite simular hasta 80 días, por lo que se propone llevar a cabo la simulación a través de experimentos en incrementos de 5 días. Se comprobó al realizar las corridas que en incrementos de 5 días se notaba diferencia entre los valores de los resultados obtenidos, mientras que en los pasos de 1 día, no existía diferencia entre los valores de los resultados obtenidos. Por todo lo anterior, los experimentos que se realizan son 17 y se listan a continuación.

De esta forma, tenemos:

- i. **Experimento 1:** 1 día
- ii. **Experimento 2:** Período de 1 - 5 días
- iii. **Experimento 3:** Período de 1 - 10 días
- iv. **Experimento 4:** Período de 1 - 15 días
- v. **Experimento 5:** Período de 1 - 20 días
- vi. **Experimento 6:** Período de 1 - 25 días
- vii. **Experimento 7:** Período de 1 - 30 días
- viii. **Experimento 8:** Período de 1 - 35 días
- ix. **Experimento 9:** Período de 1 - 40 días
- x. **Experimento 10:** Período de 1 - 45 días
- xi. **Experimento 11:** Período de 1 - 50 días
- xii. **Experimento 12:** Período de 1 - 55 días
- xiii. **Experimento 13:** Período de 1 - 60 días
- xiv. **Experimento 14:** Período de 1 - 65 días
- xv. **Experimento 15:** Período de 1 - 70 días
- xvi. **Experimento 16:** Período de 1 - 75 días
- xvii. **Experimento 17:** Período de 1 - 80 días.

### 3.2. Ejecución y análisis de experimentos

Con base en el modelo de simulación desarrollado en el Capítulo 2 de esta tesis, se ejecutan los 17 experimentos propuestos de 1 a 80 días, en incrementos de 5 días. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 16, se clasifican en llamadas generadas, llamadas rechazadas y llamadas procesadas.

Tabla 16. Resultados de experimentos de simulación.

Días	Radio de celda [m]	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
1	30	4133	2398	873	380	280	202
	21	4176	870	1643	706	556	401
	18	4148	637	1769	794	546	402
	16	4257	49	2081	924	685	518
	15	4156	0	2077	934	654	491
	14	4156	0	2077	934	654	491
	13	4156	0	2077	934	654	491
	12	4156	0	2077	934	654	491
	11	4156	0	2077	934	654	491

Tabla 16. Tabla de resultados de simulación (continuación)

Días	Radio de celda [m]	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
5	30	20761	12401	4136	1893	1323	1008
	21	20749	4664	7926	3587	2663	1909
	18	20763	3245	8653	3938	2811	2116
	16	20891	224	10172	4564	3407	2524
	15	20856	6	10212	4716	3364	2558
	14	20694	0	10162	4704	3280	2548
	13	20694	0	10162	4704	3280	2548
	12	20694	0	10162	4704	3280	2548
	11	20694	0	10162	4704	3280	2548
10	30	41513	24851	8263	3762	2661	1976
	21	41514	9953	15648	6953	5125	3835
	18	41684	6864	17300	7760	5553	4207
	16	41887	422	20560	9182	6658	5065
	15	41843	6	20715	9369	6723	5030
	14	41644	0	20647	9355	6629	5013
	13	41644	0	20647	9355	6629	5013
	12	41644	0	20647	9355	6629	5013
	11	41644	0	20647	9355	6629	5013
15	30	62323	37488	12406	5515	3962	2952
	21	62381	14749	23663	10523	7706	5740
	18	62682	10264	26135	11629	8362	6292
	16	63058	595	31013	13793	10065	7592
	15	62711	6	31114	13993	10162	7436
	14	62543	0	31062	13978	10067	7436
	13	62543	0	31062	13978	10067	7436
	12	62543	0	31062	13978	10067	7436
	11	62543	0	31062	13978	10067	7436
20	30	83328	50104	16636	7374	5263	3951
	21	83289	20014	31513	13944	10223	7595
	18	83541	13814	34758	15545	11055	8369
	16	83851	710	41431	18419	13267	10024
	15	83437	8	41472	18619	13445	9893
	14	83253	0	41444	18623	13356	9830
	13	83253	0	41444	18623	13356	9830
	12	83253	0	41444	18623	13356	9830
	11	83253	0	41444	18623	13356	9830

Tabla 16. Tabla de resultados de simulación (continuación)

Días	Radio de celda [m]	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
25	30	104237	62898	20703	9150	6567	4919
	21	104042	25071	39416	17385	12654	9516
	18	104310	16569	43703	19635	13967	10436
	16	104765	866	51892	22993	16506	12508
	15	104498	9	52046	23253	16831	12359
	14	104211	0	51946	23279	16670	12316
	13	104211	0	51946	23279	16670	12316
	12	104211	0	51946	23279	16670	12316
30	30	125034	75296	24914	10998	7910	5916
	21	125053	30194	47400	20954	15173	11332
	18	125066	19697	52614	23550	16759	12446
	16	125302	942	62150	27535	19758	14917
	15	125451	12	62322	28006	20172	14939
	14	125187	0	62228	28041	20016	14902
	13	125187	0	62228	28041	20016	14902
	12	125187	0	62228	28041	20016	14902
35	30	145869	87879	29050	12809	9212	6919
	21	145905	35523	55114	24434	17651	13183
	18	146092	23561	61213	27343	19437	14538
	16	146105	1079	72431	32166	22949	17480
	15	146189	12	72607	32580	23473	17517
	14	145920	0	72516	32619	23313	17472
	13	145920	0	72516	32619	23313	17472
	12	145920	0	72516	32619	23313	17472
40	30	166466	100282	33165	14604	10539	7876
	21	166662	40555	63048	27885	20135	15039
	18	166668	26808	69876	31115	22272	16597
	16	166759	1279	82650	36669	26240	19921
	15	166802	12	82973	37057	26752	20008
	14	166529	0	82872	37107	26578	19972
	13	166529	0	82872	37107	26578	19972
	12	166529	0	82872	37107	26578	19972
11	166529	0	82872	37107	26578	19972	



Tabla 16. Tabla de resultados de simulación (continuación)

Días	Radio de celda [m]	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
45	30	187500	113024	37302	16420	11884	8870
	21	187542	45627	70909	31413	22645	16948
	18	187614	30121	78779	34947	25093	18674
	16	187587	1401	93052	41208	29592	22334
	15	187683	13	93346	41749	30020	22555
	14	187495	0	93296	41717	29982	22500
	13	187495	0	93296	41717	29982	22500
	12	187495	0	93296	41717	29982	22500
	11	187495	0	93296	41717	29982	22500
50	30	208459	125909	41250	18232	13150	9918
	21	208385	50769	78853	34784	25156	18823
	18	208575	33695	87442	38792	27903	20743
	16	208519	1542	103378	45845	32989	24765
	15	208748	22	103795	46390	33469	25072
	14	208352	0	103666	46382	33384	24920
	13	208352	0	103666	46382	33384	24920
	12	208352	0	103666	46382	33384	24920
	11	208352	0	103666	46382	33384	24920
55	30	229604	138845	45349	20012	14452	10946
	21	229322	55855	86720	38226	27795	20726
	18	229459	36830	96270	42782	30758	22819
	16	229519	1713	113839	50424	36325	27218
	15	229637	22	114374	50935	36773	27533
	14	229285	0	114144	50958	36717	27466
	13	229285	0	114144	50958	36717	27466
	12	229285	0	114144	50958	36717	27466
	11	229285	0	114144	50958	36717	27466
60	30	250328	151098	49593	21879	15819	11939
	21	250185	60579	94717	41797	30460	22632
	18	250544	40572	104872	46619	33530	24951
	16	250408	1796	124311	54986	39630	29685
	15	250534	32	124851	55529	40085	30037
	14	250520	0	124772	55674	40003	30071
	13	250520	0	124772	55674	40003	30071
	12	250520	0	124772	55674	40003	30071
	11	250520	0	124772	55674	40003	30071

Tabla 16. Tabla de resultados de simulación (continuación)

Días	Radio de celda [m]	Llamadas generadas	Llamadas rechazadas	Llamadas procesadas 7 hr-p Voz-IP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono	Llamadas procesadas 7 hr-p FTP	Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD
65	30	271494	164235	53563	23656	17095	12945
	21	271442	66152	102533	45235	32982	24540
	18	271429	43685	113831	50594	36387	26932
	16	271549	1952	134823	59506	43052	32216
	15	271525	32	135416	60096	43447	32534
	14	271517	0	135285	60315	43310	32607
	13	271517	0	135285	60315	43310	32607
	12	271517	0	135285	60315	43310	32607
70	30	292438	176859	57717	25541	18383	13938
	21	292486	71658	110279	48716	35436	26397
	18	292283	46822	122791	54495	39167	29008
	16	292537	2157	145327	64048	46264	34741
	15	292448	32	145845	64681	46816	35074
	14	292252	0	145793	64890	46566	35003
	13	292252	0	145793	64890	46566	35003
	12	292252	0	145793	64890	46566	35003
75	30	312742	188750	61952	27389	19711	14940
	21	313153	76500	118310	52117	37933	28293
	18	313149	50212	131567	58338	41940	31092
	16	313003	2218	155561	68632	49500	37092
	15	312974	32	156086	69239	50079	37538
	14	312863	0	156075	69529	49836	37423
	13	312863	0	156075	69529	49836	37423
	12	312863	0	156075	69529	49836	37423
80	30	333655	201210	66165	29312	21034	15934
	21	334261	81635	126342	55584	40483	30217
	18	334133	53679	140385	62221	44644	33204
	16	333846	2295	166098	73219	52773	39461
	15	333893	32	166565	73860	53357	40079
	14	333755	0	166539	74176	53193	39847
	13	333755	0	166539	74176	53193	39847
	12	333755	0	166539	74176	53193	39847
11	333755	0	166539	74176	53193	39847	

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Se observa del experimento 1 que cuando el radio de la celda es de 30 metros, equivalente a una configuración de 3 celdas y capacidad de 21 canales, se generan 4133 llamadas de las cuales 2398 se rechazan y se procesan 873 llamadas de Voz-IP, 380 llamadas de Video-teléfono, 280 llamadas FTP y 202 llamadas de Video-teléfono HD. Cuando el radio de la celda disminuye a 16 metros, equivalente a una configuración de 10 celdas con capacidad de 70 canales, se generan 4257 llamadas de las cuales se rechazan 49 y se procesan 2081 llamadas de Voz-IP, 924 llamadas de Video-teléfono, 685 llamadas FTP y 518 llamadas de Video-teléfono HD.

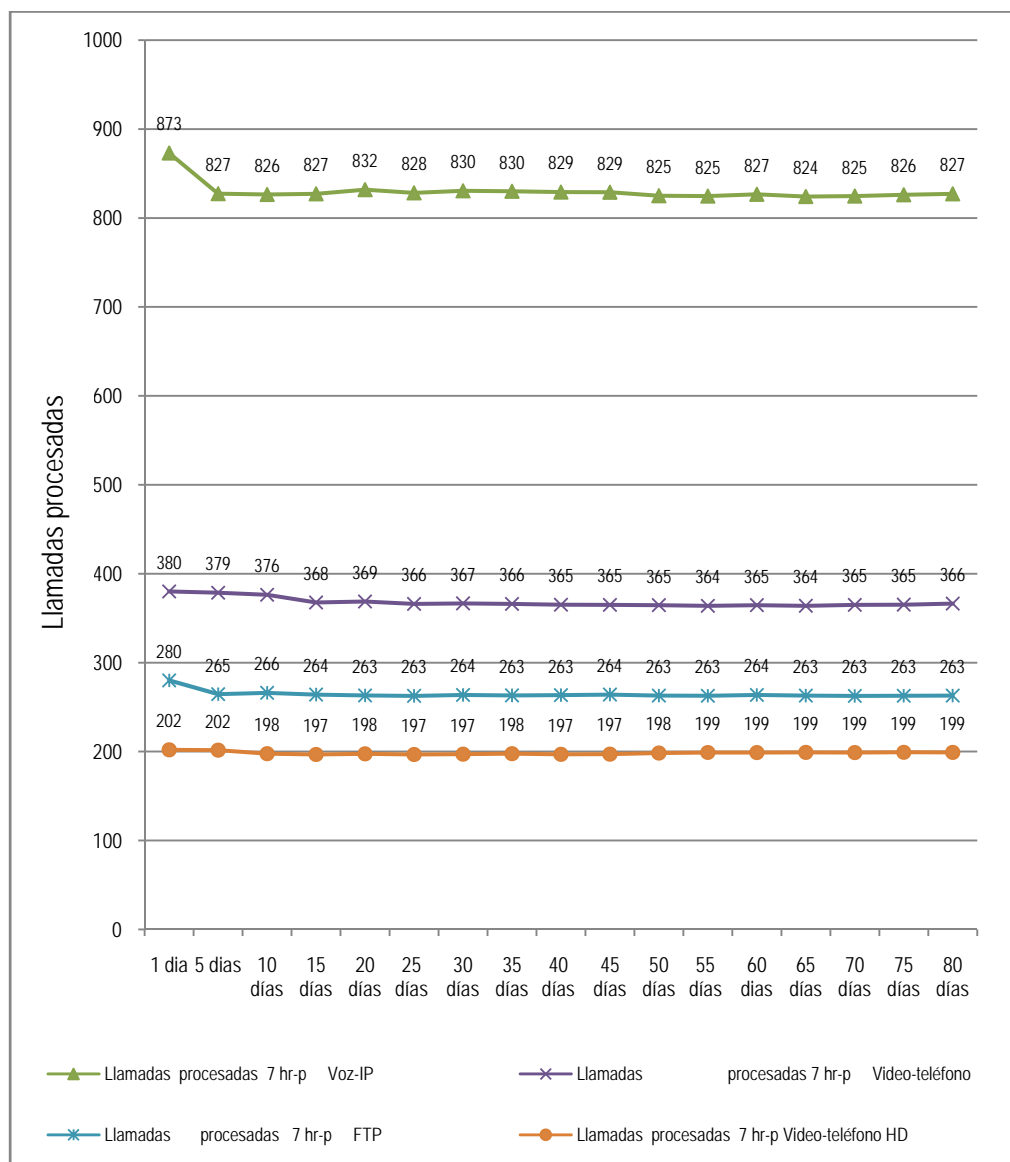
A medida que el radio de celda toma valores iguales o menores a 15 metros, equivalente a una configuración de contiene 12 celdas o más y una capacidad igual o mayor a 84 canales, la capacidad de la red es suficiente para no rechazar llamadas y pro lo mismo, todas las llamadas se procesan distribuidas en la proporción de 2077 llamadas de Voz-IP, 934 llamadas de Video-teléfono, 654 llamadas FTP y 491 llamadas de Video-teléfono HD.

Se observa del resto de los experimentos que a medida que se incrementa el número de días en la simulación, se genera un mayor número de llamadas, de esta forma, considerando la capacidad mínima de red en cada caso, 3 celdas y capacidad de 21 canales, en el experimento 2 se generan 20761 llamadas, en el experimento 3 se generan 41513 llamadas, en el experimento 4 se generan 62323 llamadas, en el experimento 5 se generan 83328 llamadas, en el experimento 6 se generan 10437 llamadas, en el experimento 7 se generan 125034 llamadas, en el experimento 8 se generan 145869 llamadas, en el experimento 9 se generan 166466 llamadas, en el experimento 10 se generan 187500 llamadas, en el experimento 11 se generan 208459 llamadas, en el experimento 12 se generan 229604 llamadas, en el experimento 13 se generan 250328 llamadas, en el experimento 14 se generan 271494 llamadas, en el experimento 15 se generan 292438 llamadas, en el experimento 16 se generan 312742 llamadas y finalmente en el experimento 17 se generan 333655 llamadas. Es decir, pasamos de 4133 llamadas generadas en 1 día a 333655 llamadas generadas en 80 días.

En relación a las llamadas rechazadas, éstas presentan un comportamiento similar al que presentan las llamadas generadas, es decir, a medida que se incrementa el número de días en la simulación, se rechaza un mayor número de llamadas, pasando de 2398 en 1 día con una capacidad de la red de 3 celdas y 21 canales a 201210 llamadas rechazadas en 80 días considerando la misma configuración de la red.

Como interesa conocer los ingresos que se estarían generando con el procesamiento de las llamadas en la red, es necesario llevar a cabo un análisis de las llamadas procesadas, por tipo de llamada, Voz-IP, Videoteléfono, FTP y Video-teléfono de alta definición. Para ello, se toman en cuenta los resultados obtenidos de los experimentos 1-17, obteniendo los valores mostrados en los Gráficos 13, 14, 15, 16, 17 y 18, en donde se observan los valores promedios de llamadas procesadas en el tiempo especificado y de acuerdo a cada capacidad de la red, en canales.

Gráfico 13. Llamadas procesadas, capacidad en red 21 canales.

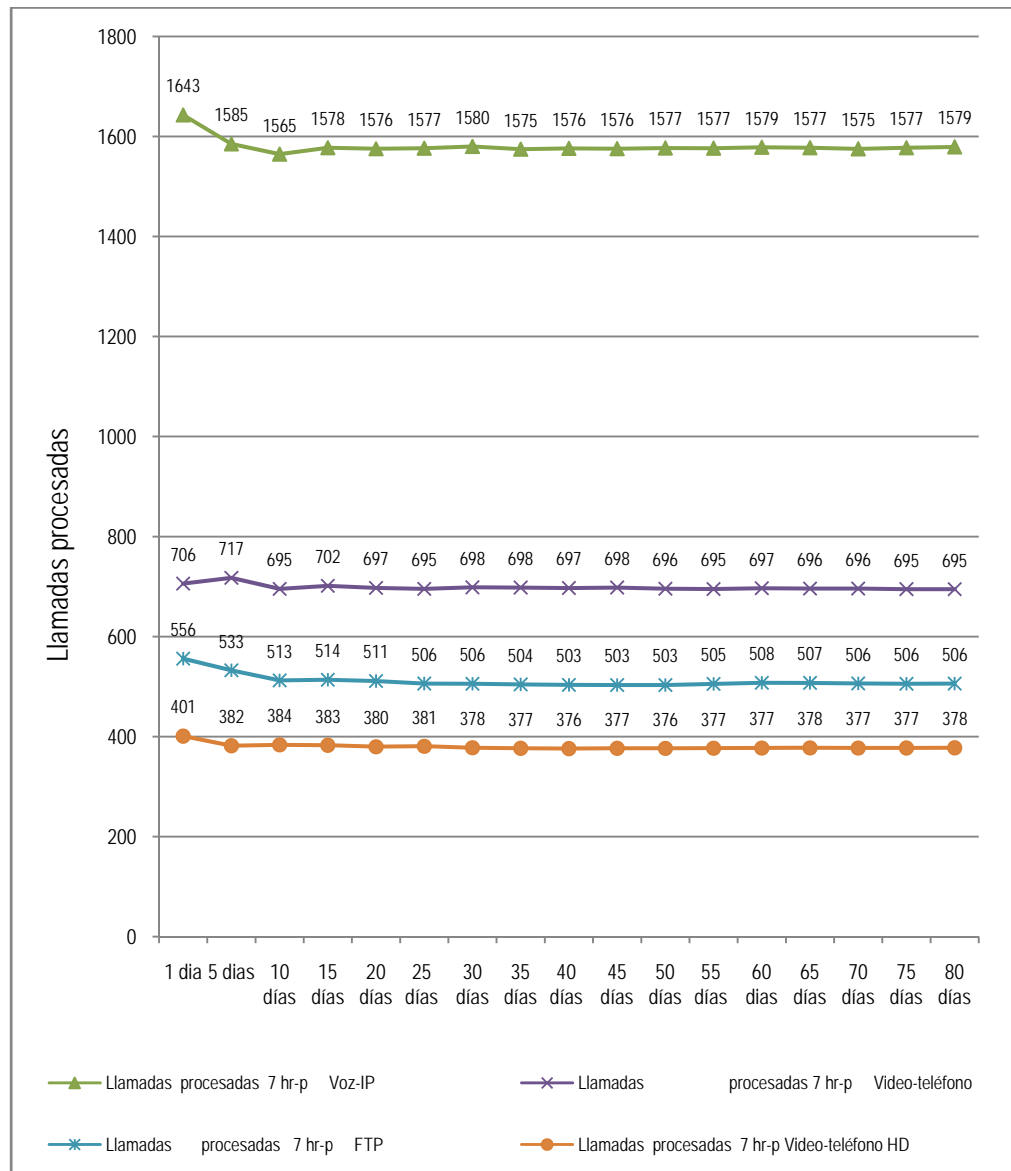


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 873 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 827 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 280 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 263 llamadas, para las llamadas de Video-teléfono, se observa que en el día 1 se procesan 380 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 366 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-teléfono HD, se observa que en el día 1 se procesan 202 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 199 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 21 canales, para el día 1, se rechazan 2398 llamadas y para el día 80 se rechazan 201210, por lo que se puede decir con base en estos resultados que la capacidad de red de 21 canales es menor a la demanda de llamadas por lo mismo se presenta un gran número de llamadas rechazadas.

Gráfico 14. Llamadas procesadas, capacidad en red 42 canales.

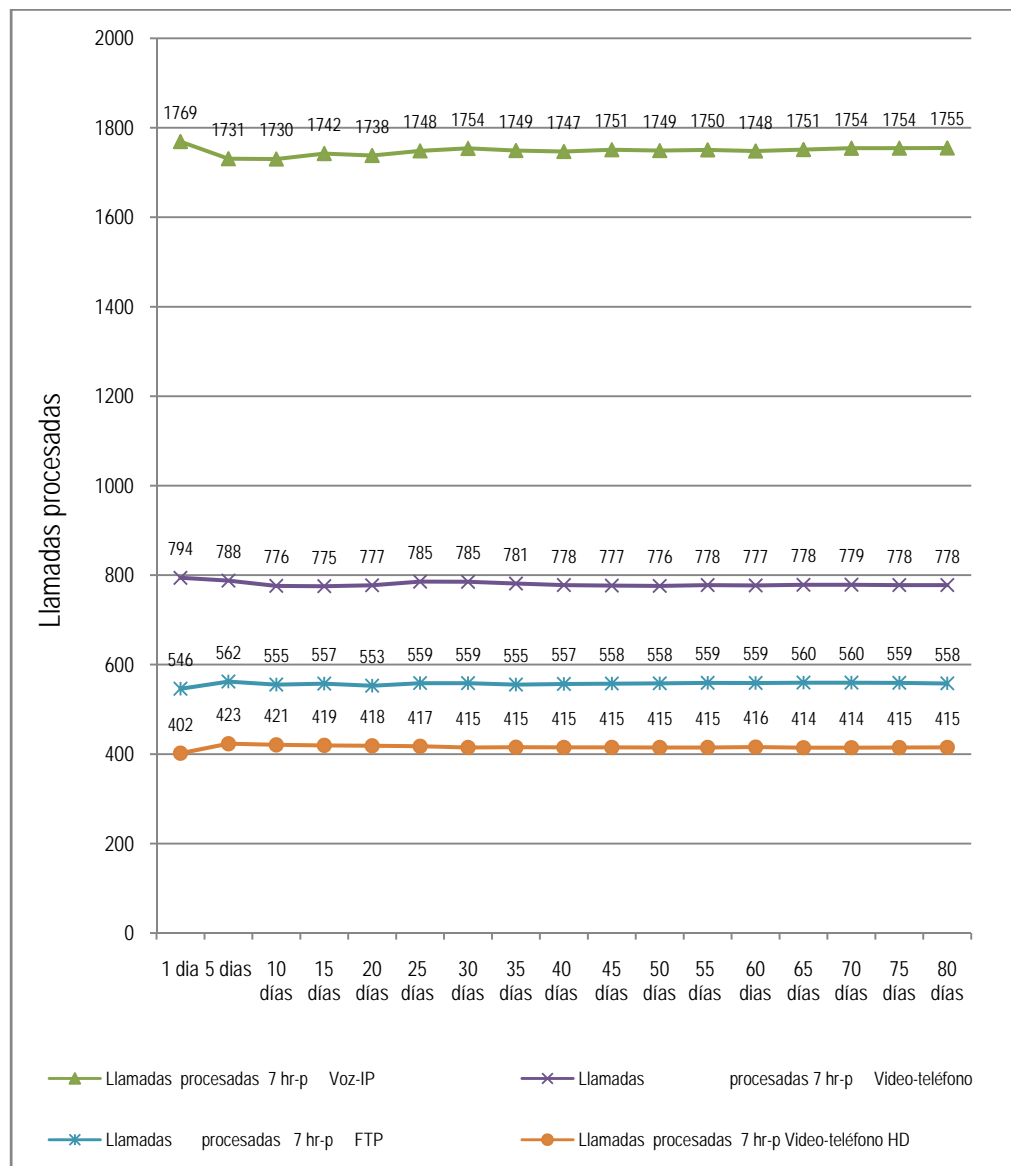


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 1643 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 1579 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 556 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 506 llamadas, para las llamadas de Video-teléfono, se observa que en el día 1 se procesan 706 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 695 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-teléfono HD, se observa que en el día 1 se procesan 401 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 378 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 42 canales, para el día 1, se rechazan 870 llamadas y para el día 80 se rechazan 81635, por lo que se puede decir con base en estos resultados que la capacidad de red de 42 canales es menor a la demanda de llamadas por lo mismo se presenta un gran número de llamadas rechazadas.

Gráfico 15. Llamadas procesadas, capacidad en red 48 canales.

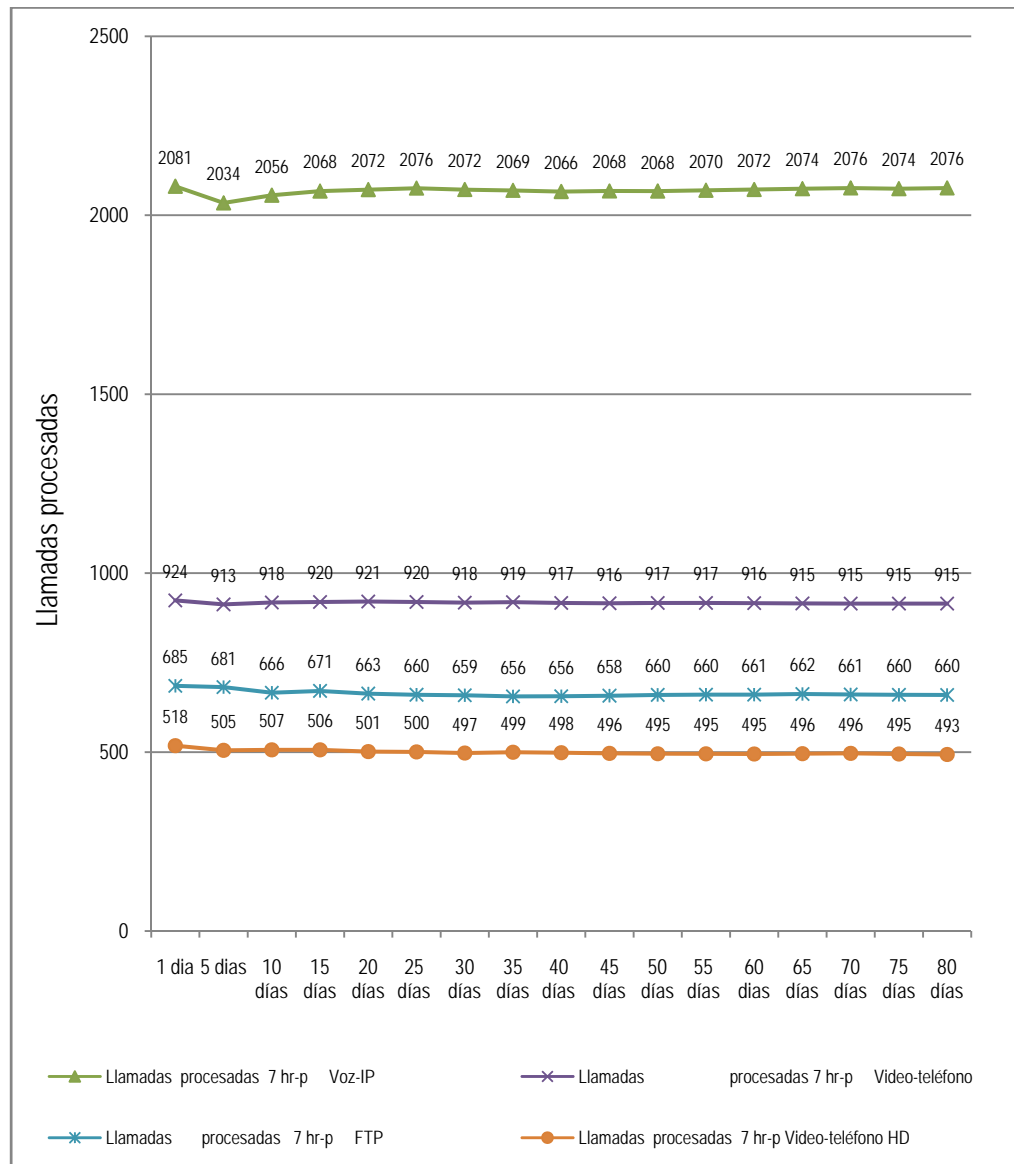


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 1769 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 1755 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 546 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 558 llamadas, para las llamadas de Video-telefono, se observa que en el día 1 se procesan 794 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 778 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-telefono HD, se observa que en el día 1 se procesan 402 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 415 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 48 canales, para el día 1, se rechazan 637 llamadas y para el día 80 se rechazan 53679, por lo que se puede decir con base en estos resultados que la capacidad de red de 48 canales es menor a la demanda de llamadas por lo mismo se presenta un gran número de llamadas rechazadas.

Gráfico 16. Llamadas procesadas, capacidad en red 70 canales.

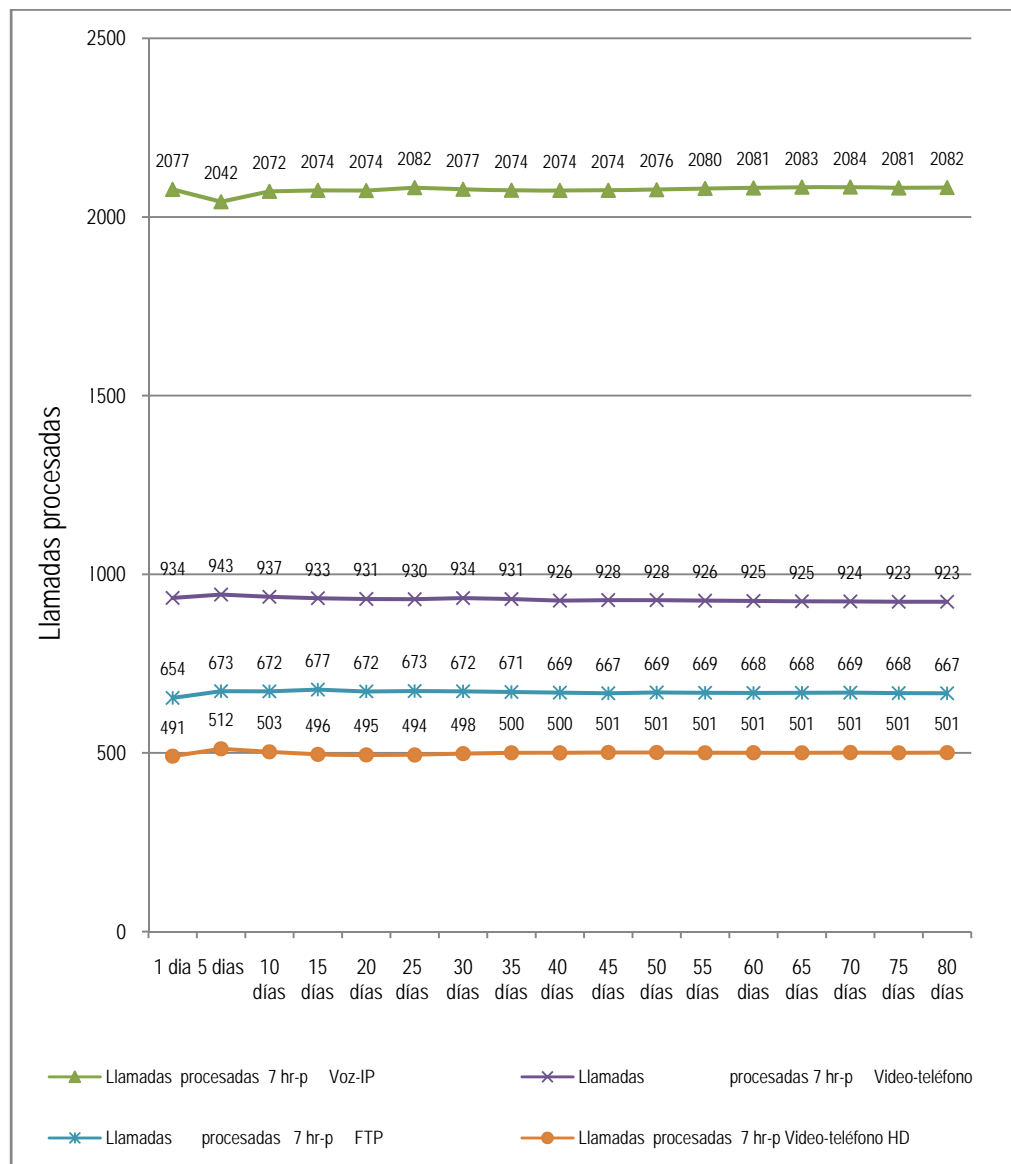


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 2081 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 2076 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 685 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 660 llamadas, para las llamadas de Video-telefono, se observa que en el día 1 se procesan 924 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 915 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-telefono HD, se observa que en el día 1 se procesan 518 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 493 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 70 canales, para el día 1, se rechazan 49 llamadas y para el día 80 se rechazan 2295, por lo que se puede decir con base en estos resultados que la capacidad de red de 70 canales es menor a la demanda de llamadas por lo mismo se presenta un gran número de llamadas rechazadas.

Gráfico 17. Llamadas procesadas, capacidad en red 84 canales.



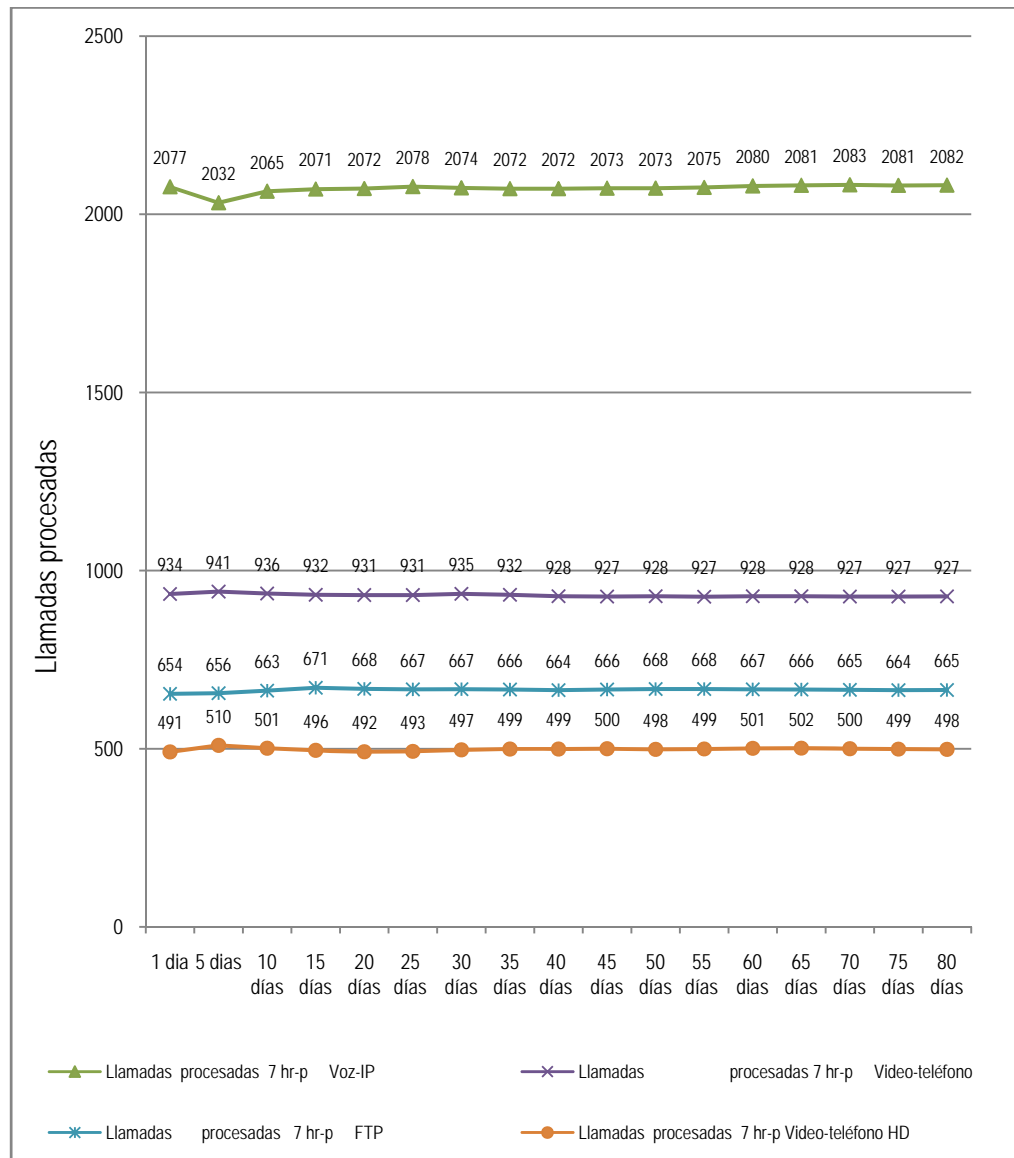
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 2077 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 2082 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 654 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 667 llamadas, para las llamadas de Video-teléfono, se observa que en el día 1 se procesan 934 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 923 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-teléfono HD, se observa que en el día 1 se procesan 491 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 501 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 84 canales, para el día 1, se rechazan 0 llamadas y para el día 80 se rechazan 32, por lo que se puede decir con base en estos resultados que la capacidad de red de 84 canales es ligeramente menor a la demanda de llamadas por lo mismo se presenta un número pequeño de llamadas rechazadas.



Gráfico 18. Llamadas procesadas, capacidad en red 98 canales.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Al tomar los valores promedio para cada tipo de llamada, se observa una convergencia a lo largo del tiempo de 1 hasta 80 días. De esta forma, para las llamadas de Voz-IP, se observa que en el día 1 se procesan 2077 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 2082 llamadas, para las llamadas FTP, se observa que en el día 1 se procesan 654 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 665 llamadas, para las llamadas de Video-teléfono, se observa que en el día 1 se procesan 934 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 927 llamadas y finalmente para las llamadas de Video-teléfono HD, se observa que en el día 1 se procesan 491 llamadas mientras que en el día 80 se procesan 498 llamadas.

Recordemos que para una capacidad de 98 canales, para el día 1, se rechazan 0 llamadas y para el día 80 se rechazan 0, por lo que se puede decir con base en estos resultados que para una capacidad de red igual o mayor a 98 canales el número de llamadas rechazadas es nulo.

### 3.3. Análisis de resultados

La Tabla 17 indica el resumen de llamadas procesadas en 1 día, valor convergente de las simulaciones, correspondiente a cada configuración de red de acuerdo al número de celdas utilizadas y al radio de cobertura de éstas. Conforme decrece el radio de cobertura de las celdas, el número de celdas se incrementa y por lo tanto la capacidad de la red medida en canales también se incrementa. Conforme la capacidad de la red se incrementa, el número de llamadas procesadas también se incrementa. Se observa también la situación contraria, conforme el radio de celda se incrementa, la capacidad de la red disminuye ya que la configuración de la red queda conformada por un menor número de celdas y por consecuencia, las llamadas procesadas decrecen.

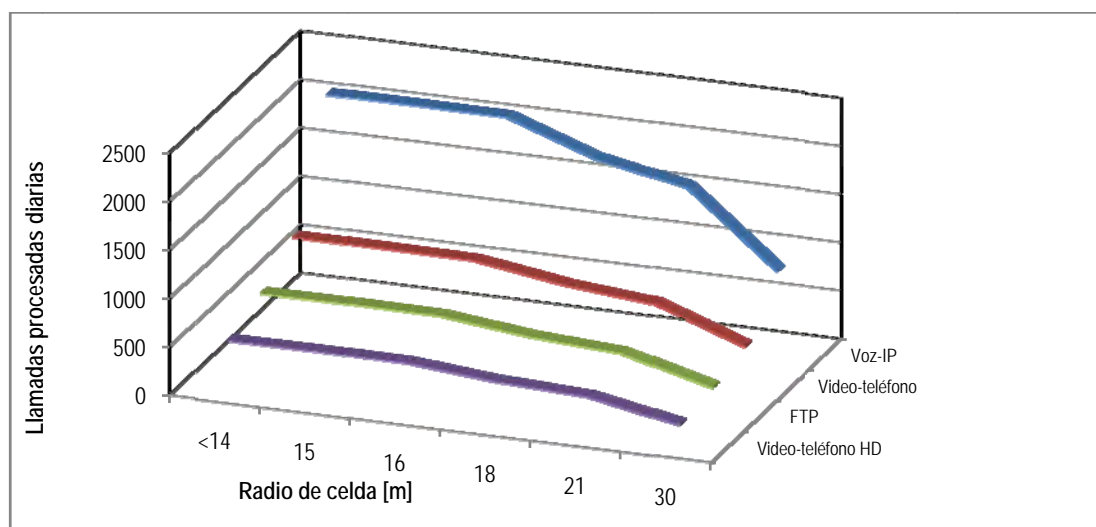
Tabla 17. Resumen de datos para diferentes capacidades de red.

Capacidad de la red [Canales]	Radio de celda [m]	Llamadas procesadas 7 hr-p		Llamadas procesadas 7 hr-p		Llamadas procesadas 7 hr-p Video-teléfono HD	Llamadas procesadas Total
		Voz-IP	Video-teléfono	FTP			
21	30	825	365	263		199	1652
42	21	1577	695	506		377	3155
48	18	1754	778	558		415	3505
70	16	2076	915	660		495	4146
84	15	2081	923	668		501	4173
>98	<14	2081	927	665		498	4171

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

El Gráfico 19, es un resumen de los resultados obtenidos de llamadas procesadas en la simulación.

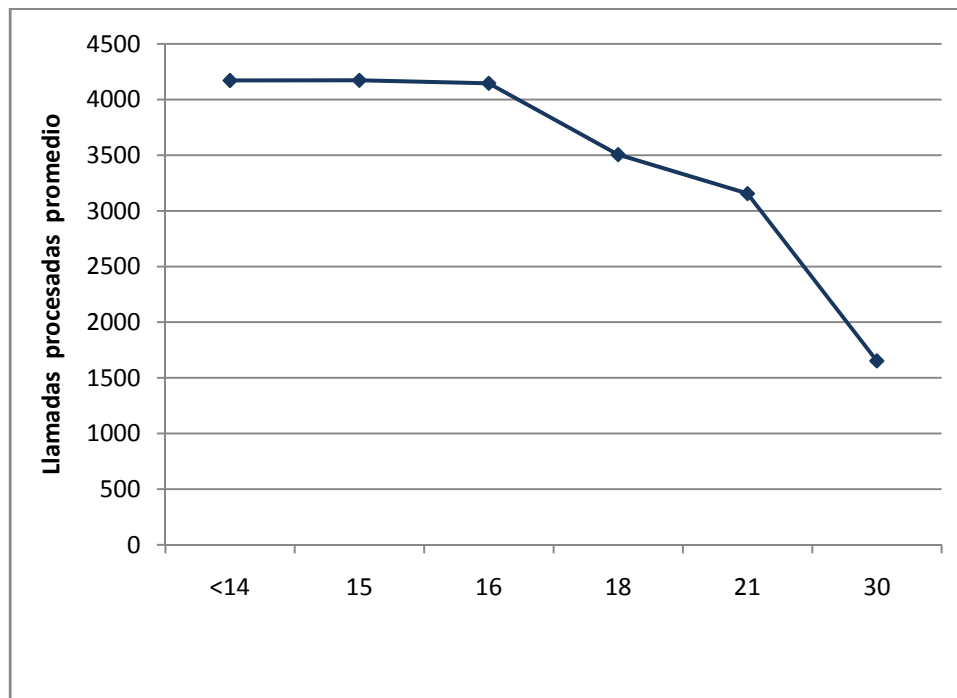
Gráfico 19. Resumen de llamadas procesadas promedio por tipo para diferentes capacidades de red.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

En el Gráfico 20, se observan las llamadas procesadas totales diarias en la red como función del radio de cobertura de las celdas que conforman la configuración de la red móvil de telecomunicaciones. Las llamadas procesadas en la red cuyo radio de celdas va de los 14-16 metros son muy semejantes, sin embargo, cuando el radio de la celda se incrementa a 18 metros, las llamadas procesadas sufren un decremento considerable, mismo que se observa cuando el radio de las celdas se incrementa de 18 a 21 metros. El mayor decremento en las llamadas procesadas se observa cuando el radio de la celda se incrementa de 21 a 30 metros. Considerando los extremos del rango de medición del radio de las celdas, cuando el radio de la celda es de 14 metros, las llamadas procesadas totales son 4171 y cuando el radio de la celda es de 30 metros, las llamadas procesadas son 1652. De esta forma, se pierde el 40% de llamadas al configurar la red con un radio de celda de 30 metros en relación a las obtenidas con una configuración del radio de celda de 14 metros.

Gráfico 20. Resumen de llamadas procesadas promedio para diferentes capacidades de red.



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados obtenidos de la simulación.

## Capítulo 4. Análisis de relación costo-beneficio

### Objetivos

- Analizar la relación costo-beneficio de las distintas configuraciones de la red móvil de telecomunicaciones con base en los resultados del modelo de simulación de tráfico para cada una de ellas.
- Determinar la configuración de red que maximiza la relación costo-beneficio de la red.

Como se mencionó en el Capítulo 1, de acuerdo a Gavish et al. (1995), el aspecto económico de una red de telecomunicaciones puede ser analizado desde diferentes perspectivas, la perspectiva de los usuarios, la perspectiva de los proveedores del servicio, la perspectiva del ente regulador o bien desde la perspectiva de los fabricantes de equipos.

Por una parte, para los usuarios lo más importante es la calidad del servicio percibida y el costo del servicio, mientras que para los proveedores del servicio, lo más importante es determinar la configuración de la red que maximice sus ingresos esperados. Y, por otra parte, para un regulador lo más importante es el bienestar social, promover la competencia entre los proveedores del servicio y administrar el espectro de frecuencias mientras que para los fabricantes de equipos, lo más importante es el precio de cada uno de los equipos.

Como se indicó en el Capítulo 1, en el presente trabajo de investigación se analizará el aspecto económico desde la perspectiva de los proveedores de servicio, por lo mismo, se determinará la configuración de la red que maximice la relación costo-beneficio de la red sobre una base anual.

Por lo tanto, en el Capítulo 4, En primer lugar, se determinará el costo anual de cada celda (técnicamente denominada en la tecnología UMTS estación base o nodo B) y el costo fijo de la red el cual queda determinado por el costo de la licencia para dar cobertura a un aeropuerto en México de las dimensiones del escenario prueba propuesto. En segundo lugar y tomando como base la Tabla 16, el costo fijo de la red y el costo anual de cada celda, se determinará el costo anual de la red radio para cada configuración de red, de acuerdo al número de celdas que la conforman en cada caso. En tercer lugar se determinarán los ingresos obtenidos para cada configuración de red, tomando como base la Tabla 18 en donde se indican el número de llamadas procesadas en la red para cada tipo de llamada. Recordar que se hizo la simulación de procesamiento para cuatro tipos de llamadas: Voz-IP, Video-teléfono, FTP y Video-teléfono HD. Finalmente, con base en los ingresos y costos para cada configuración de red, se obtiene el beneficio neto [%] y se determina el radio de celda que optimiza esta relación.

### 4.1. Análisis costo-beneficio

#### 4.1.1. Costo anual de la red radio

De acuerdo a Cabral et al. (2005), el costo anual total de una red radio queda determinado por un costo fijo y un costo proporcional al número de celdas y/o radio bases instaladas, necesarias para dar cobertura al área especificada, denominadas nodos  $B$  en la arquitectura de una red UMTS.

##### Costo anual de celda

Conforme a la Ecuación 4 citada en el Capítulo 1, el costo anual de cada celda queda determinado por el costo de la radio base o equipo y el costo de la instalación en relación a los años de vida de dicha radio base, adicional al costo anual de operación y mantenimiento.

$$\text{Costo anual nodo B [\$]} = \frac{\text{Costo radio base [\$]} + \text{costo instalación [\$]}}{\text{Años de vida de radio base}} + \text{Costo Operación y mantenimiento [\$]}$$

Ecuación (4), Capítulo 1.

Con base en la información obtenida sobre costos de equipos en el mercado de diferentes fabricantes y costos de diferentes proveedores de instalación y de operación y mantenimiento, se obtiene la Tabla 18. Los costos se indican en moneda nacional considerando un tipo de cambio de \$14.00 por dólar.

Tabla 18. Costos de equipos, instalación y O&M.

Item	Costo [\\$] MN
Radio base pico- celda UMTS	\$ 30 000.00
Años de vida pico-celda	10
Instalación pico-celda UMTS	\$20 000.00
Operación y mantenimiento anual pico-celda	\$15 000.00

Fuente: Elaboración propia con base en información de fabricantes y proveedores.

De esta forma, tenemos que el costo anual de un nodo *B* es de \$65 000.00 MN.

De acuerdo a la Ecuación 3 citada en el Capítulo 1, el costo fijo queda determinado por el costo de una licencia UMTS para dar cobertura en un aeropuerto, de la siguiente forma:

$$\text{Costo fijo [\$]} = \text{Costo de una licencia UMTS para dar cobertura en un aeropuerto [\$]}$$

Ecuación (3), Capítulo 1.

En este caso, consideramos que el costo de una licencia UMTS para dar cobertura en un aeropuerto es equivalente a la renta que debe pagar el operador por derecho de instalación en un aeropuerto. Con base en la información de los operadores en México, la renta mensual que se paga en un aeropuerto en México de dimensiones aproximadas al aeropuerto internacional de Los Cabos corresponde a \$15 000.00 M.N. Por lo que el costo fijo anual equivale a la renta anual que debe pagar el operador, \$180 000.00. En este costo fijo no importa el número de celdas a instalar.

Finalmente, y de acuerdo a la Ecuación 2 citada en el Capítulo 1, el costo anual total queda determinado por el costo fijo más el costo anual de celda por el número de celdas a considerar en cada propuesta de planificación, de la siguiente forma:

$$\text{Costo anual total [\$]} = \text{Costo fijo [\$]} + (\text{Costo anual de nodo B [\$]})(\text{Número de nodos B})$$

Ecuación (3), Capítulo 1.

Por tanto, se obtienen los costos anuales totales para cada configuración de red considerada en la Tabla 15 y se indican los resultados obtenidos en la Tabla 19 y Gráfico 21.

Tabla 19. Costos anuales totales para diferentes configuraciones de red.

Número de celdas	Radio de celda[m]	Capacidad de celda [Canales]	Costo anual total M.N
3	30	21	\$375000.00
6	21	42	\$570000.00
8	18	48	\$700000.00
10	16	70	\$830000.00
12	15	84	\$960000.00
14	14	98	\$1090000.00
16	13	112	\$1220000.00
18	12	126	\$1350000.00
20	12	140	\$1480000.00
22	11	154	\$1610000.00

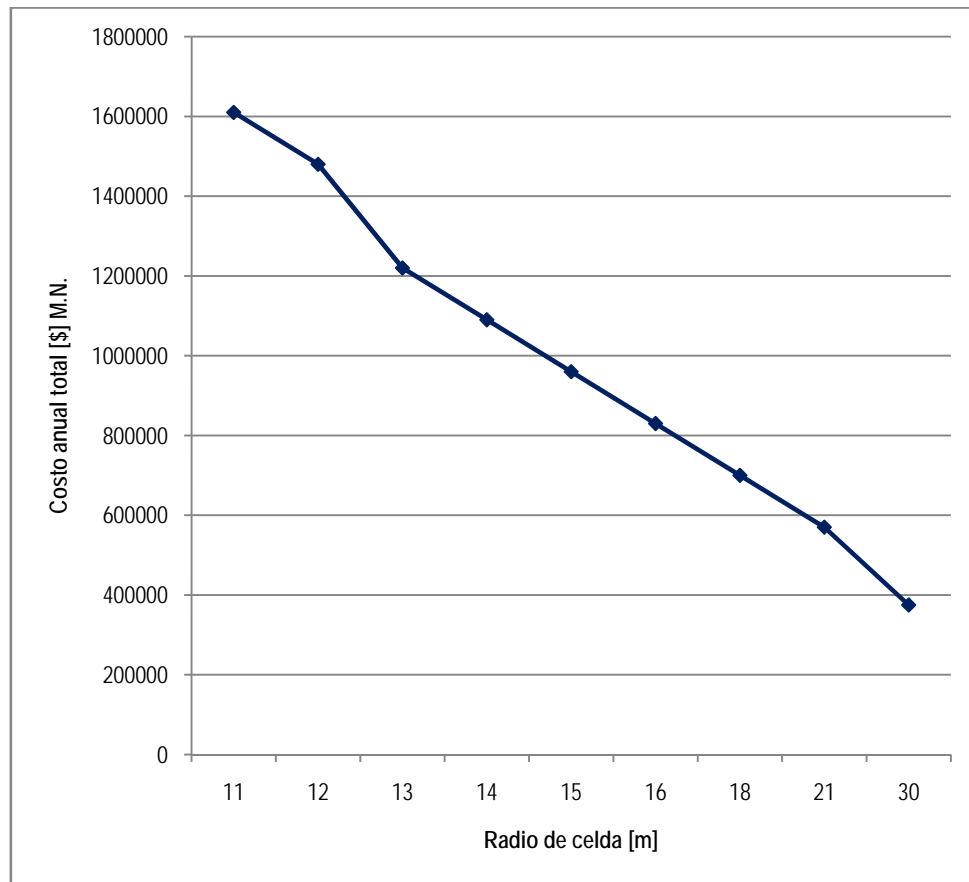
Fuente: Elaboración propia con base en información de fabricantes y proveedores.

Como ya se ha indicado a lo largo del desarrollo de la investigación, a cada configuración de red, le corresponde un determinado número de celdas. De acuerdo al número de celdas, se establece un radio de celda y se determina una capacidad de la red.

Debido a que el costo anual total de la red queda determinado directamente por el número de celdas que conforman la configuración, en la Tabla 19 se indica como varía dicho costo anual total para las configuraciones de red de 3,6,8,10,12,14,16,18,20 y 22 celdas.

Se observa por tanto que para una configuración de red conformada por un número mínimo de celdas le corresponde un costo anual total mínimo, mientras que para un número máximo de celdas le corresponde un costo anual total máximo. Es decir, a un número mayor de celdas le corresponde un mayor costo total anual.

Gráfico 21. Costos anuales totales para diferentes configuraciones de red.



Fuente: Elaboración propia con base en información de fabricantes y proveedores.

#### 4.1.2. Ingreso anual de la red radio

De acuerdo a la Ecuación 7 citada en el Capítulo 1, el ingreso diario por cada configuración de red se obtiene como función de la carga en los nodos  $B$  [kb/s], de los ingresos de las portadoras (los nodos  $B$  se configurarán sólo con 1 portadora) con una tasa de transmisión específica y de las horas pico diarias.

$$\text{Ingreso diario red [\$]} = \frac{\text{Carga en nodo } B \left[ \frac{kb}{s} \right] * \text{Horas pico diarias [hr]} * \text{Ingreso portadora} \left[ \frac{\$}{\text{min}} \right]}{\text{Tasa de transmisión de portadora} \left[ \frac{kb}{s} \right]}$$

Ecuación (7), Capítulo 1.

De acuerdo al Gráfico 6, recordemos que se considera que en la red existen 7 horas pico distribuidas a lo largo del día, en las ventanas de 8–12 hrs, 14–16 hrs y de 17–18 hrs. Para el resto de las horas del día se considera que no se generan llamadas, aunque es probable que si se generasen algunas llamadas, el número de ellas no sería significativo en relación a las llamadas generadas en las horas pico.

La carga en el nodo  $B$  o celda [kb/s] por cada tipo de llamada, se obtiene de la Tabla 10, y corresponde a la tasa de transmisión de cada tipo de llamada, de acuerdo a la Tabla 20.

Tabla 20. Carga [kb/s] en la red generada por cada tipo de llamada.

Aplicación	Duración [Distribución/media]	Tasa de transmisión [Kb/s]	Carga generada [kb/s]
Voz sobre IP	EXP/3 min	12	12
Video-teléfono	EXP/3 min	128	128
FTP (Transferencia de archivos)	EXP/ 0.1 min	384	384
Video-teléfono de alta definición.	EXP/30 min	1920	1920

Fuente: Elaboración propia.

La carga total en un día, generada por cada tipo de llamada para cada configuración de red se observa en la Tabla 21. Se obtiene al multiplicar la carga generada por cada tipo de llamada por las llamadas procesadas en las horas pico para un día. Se observa que la carga total para cada tipo de llamada es igual para un radio de celda mayor o igual a 14 metros, esto es porque la capacidad de la red es mayor a la demanda de tráfico y por lo mismo se procesan todas las llamadas generadas. Como el número de llamadas generadas es el mismo, la carga es la misma para los casos en que no existe congestión.

Tabla 21. Carga [kb/s] en la red total generada en un día con hora pico.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Carga total Voz-IP [kb] 1 día	Carga total Video-teléfono [kb] 1 día	Carga total FTP [kb] 1 día	Carga total Video-teléfono HD [kb] 1 día	Carga total [kb] 1 día
3	30	21	1782000	8409600	605952	687744000	698541552
6	21	42	3406320	16012800	1165824	1302912000	1323496944
8	18	48	3788640	17925120	1285632	1434240000	1457239392
10	16	70	4484160	21081600	1520640	1710720000	1737806400
12	15	84	4494960	21265920	1539072	1731456000	1758755952
14	14	98	4494960	21358080	1532160	1721088000	1748473200
16	13	112	4494960	21358080	1532160	1721088000	1748473200
18	12	126	4494960	21358080	1532160	1721088000	1748473200
20	12	140	4494960	21358080	1532160	1721088000	1748473200
22	11	154	4494960	21358080	1532160	1721088000	1748473200

Fuente: Elaboración propia.

El operador que a esta fecha ya ha comercializado el servicio de tercera generación utilizando tecnología UMTS en México es la compañía TELCEL y desde su portal electrónico, se han obtenido las tarifas del servicio<sup>2</sup> que se muestran en la Tabla 22.

<sup>2</sup> <http://www.telcel.com.mx>



Tabla 22. Tarifas de servicios 3G tecnología UMTS TELCEL

Paquete	Renta Mensual	KB incluidos	Precio por KB Adicional
2 MB	\$59.00	2,048	\$0.04
10 MB	\$109.00	10,240	\$0.04
20 MB	\$149.00	20,480	\$0.04
50 MB	\$239.00	51,200	\$0.03
150 MB	\$259.00	153,600	\$0.03
500 MB	\$379.00	512,000	\$0.02
1 GB	\$459.00	1,048,576	\$0.01

Fuente: <http://www.telcel.com.mx>

La tasa mínima de transmisión es de 128 kb/s de acuerdo a la información de la página electrónica del operador.

De acuerdo a Cabral et al. (2005), al eliminar los tiempos inactivos en una transmisión de información, se considera que aproximadamente 1MB de información útil se transmite en 56 segundos. Por lo tanto, con base en lo anterior y en la información tarifaria de la Tabla 23, se obtienen la Tabla 23 en donde se indica los precios de servicios 3G con tecnología UMTS con tasa de transmisión de 128 kb/s.

Tabla 23. Tarifas de servicios 3G con tasa de transmisión 128 [kb/s].

Paquete	Renta mensual	Tasa de transmisión mínima	Precio con tasa de transmisión 128 [kb/s]
2 MB	\$ 59.00	128 [kb/s]	29.5 [\$/min]
10 MB	\$ 109.00	128 [kb/s]	10.9 [\$/min]
20 MB	\$ 149.00	128 [kb/s]	7.45 [\$/min]
50 MB	\$ 239.00	128 [kb/s]	4.78 [\$/min]
150 MB	\$ 259.00	128 [kb/s]	1.72 [\$/min]
500 MB	\$ 379.00	128 [kb/s]	0.758 [\$/min]
1 GB	\$ 459.00	128 [kb/s]	0.459 [\$/min]

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador.

Para cada paquete, el ingreso en un día con hora pico, para a cada configuración de red se indica en las Tablas 24 -30.

Tabla 24. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 2 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	6849,5625	32324,4	2329,128	2643516	2685019,091
6	21	42	3093,0425	61549,2	4481,136	5008068	5087191,379
8	18	48	14562,585	68899,68	4941,648	5512860	5601263,913
10	16	70	17235,99	81032,4	5844,96	6575580	6679693,35
12	15	84	17277,5025	81740,88	5915,808	6655284	6760218,191
14	14	98	17277,5025	82095,12	5889,24	6615432	6720693,863
16	13	112	17277,5025	82095,12	5889,24	6615432	6720693,863
18	12	126	17277,5025	82095,12	5889,24	6615432	6720693,863
20	12	140	17277,5025	82095,12	5889,24	6615432	6720693,863
22	11	154	17277,5025	82095,12	5889,24	6615432	6720693,863

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 25. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 10 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	2519,86	11891,70	856,85	972513,00	987781,41
6	21	42	4816,75	22643,10	1648,55	1842399,00	1871507,40
8	18	48	5357,37	25347,24	1817,96	2028105,00	2060627,58
10	16	70	6340,88	29810,70	2150,28	2419065,00	2457366,86
12	15	84	6356,15	30071,34	2176,34	2448387,00	2486990,84
14	14	98	6356,15	30201,66	2166,57	2433726,00	2472450,38
16	13	112	6356,15	30201,66	2166,57	2433726,00	2472450,38
18	12	126	6356,15	30201,66	2166,57	2433726,00	2472450,38
20	12	140	6356,15	30201,66	2166,57	2433726,00	2472450,38
22	11	154	6356,15	30201,66	2166,57	2433726,00	2472450,38

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 26. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 20 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	1727,70	8153,37	587,49	666789,30	677257,86
6	21	42	3302,53	15524,91	1130,30	1263213,90	1283171,65
8	18	48	3673,20	17378,96	1246,46	1390540,50	1412839,13
10	16	70	4347,53	20439,27	1474,31	1658596,50	1684857,61
12	15	84	4358,00	20617,97	1492,18	1678700,70	1705168,86
14	14	98	4358,00	20707,33	1485,48	1668648,60	1695199,41
16	13	112	4358,00	20707,33	1485,48	1668648,60	1695199,41
18	12	126	4358,00	20707,33	1485,48	1668648,60	1695199,41
20	12	140	4358,00	20707,33	1485,48	1668648,60	1695199,41
22	11	154	4358,00	20707,33	1485,48	1668648,60	1695199,41

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 27. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 50 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	1113,75	5256	378,72	429840	436588,47
6	21	42	2128,95	10008	728,64	814320	827185,59
8	18	48	2367,9	11203,2	803,52	896400	910774,62
10	16	70	2802,6	13176	950,4	1069200	1086129
12	15	84	2809,35	13291,2	961,92	1082160	1099222,47
14	14	98	2809,35	13348,8	957,6	1075680	1092795,75
16	13	112	2809,35	13348,8	957,6	1075680	1092795,75
18	12	126	2809,35	13348,8	957,6	1075680	1092795,75
20	12	140	2809,35	13348,8	957,6	1075680	1092795,75
22	11	154	2809,35	13348,8	957,6	1075680	1092795,75

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 28. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 150 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	417,66	1971,00	142,02	161190,00	163720,68
6	21	42	798,36	3753,00	273,24	305370,00	310194,60
8	18	48	887,96	4201,20	301,32	336150,00	341540,48
10	16	70	1050,98	4941,00	356,40	400950,00	407298,38
12	15	84	1053,51	4984,20	360,72	405810,00	412208,43
14	14	98	1053,51	5005,80	359,10	403380,00	409798,41
16	13	112	1053,51	5005,80	359,10	403380,00	409798,41
18	12	126	1053,51	5005,80	359,10	403380,00	409798,41
20	12	140	1053,51	5005,80	359,10	403380,00	409798,41
22	11	154	1053,51	5005,80	359,10	403380,00	409798,41

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 29. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 500 MB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	180,98	854,10	61,54	69849,00	70945,63
6	21	42	345,95	1626,30	118,40	132327,00	134417,66
8	18	48	384,78	1820,52	130,57	145665,00	148000,88
10	16	70	455,42	2141,10	154,44	173745,00	176495,96
12	15	84	456,52	2159,82	156,31	175851,00	178623,65
14	14	98	456,52	2169,18	155,61	174798,00	177579,31
16	13	112	456,52	2169,18	155,61	174798,00	177579,31
18	12	126	456,52	2169,18	155,61	174798,00	177579,31
20	12	140	456,52	2169,18	155,61	174798,00	177579,31
22	11	154	456,52	2169,18	155,61	174798,00	177579,31

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

Tabla 30. Ingresos diarios totales para diferentes configuraciones de red, paquete de 1 GB.

Número de celdas	Radio de celda [m]	Capacidad [Canales]	Ingreso diario M.N. Voz-IP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono	Ingreso diario M.N. FTP	Ingreso diario M.N. Video-teléfono HD	Ingreso diario total M.N.
3	30	21	111,375	525,6	37,872	42984	43658,847
6	21	42	212,895	1000,8	72,864	81432	82718,559
8	18	48	236,79	1120,32	80,352	89640	91077,462
10	16	70	280,26	1317,6	95,04	106920	108612,9
12	15	84	280,935	1329,12	96,192	108216	109922,247
14	14	98	280,935	1334,88	95,76	107568	109279,575
16	13	112	280,935	1334,88	95,76	107568	109279,575
18	12	126	280,935	1334,88	95,76	107568	109279,575
20	12	140	280,935	1334,88	95,76	107568	109279,575
22	11	154	280,935	1334,88	95,76	107568	109279,575

Fuente: Elaboración propia con base en la información del portal electrónico del operador y de los resultados de la simulación.

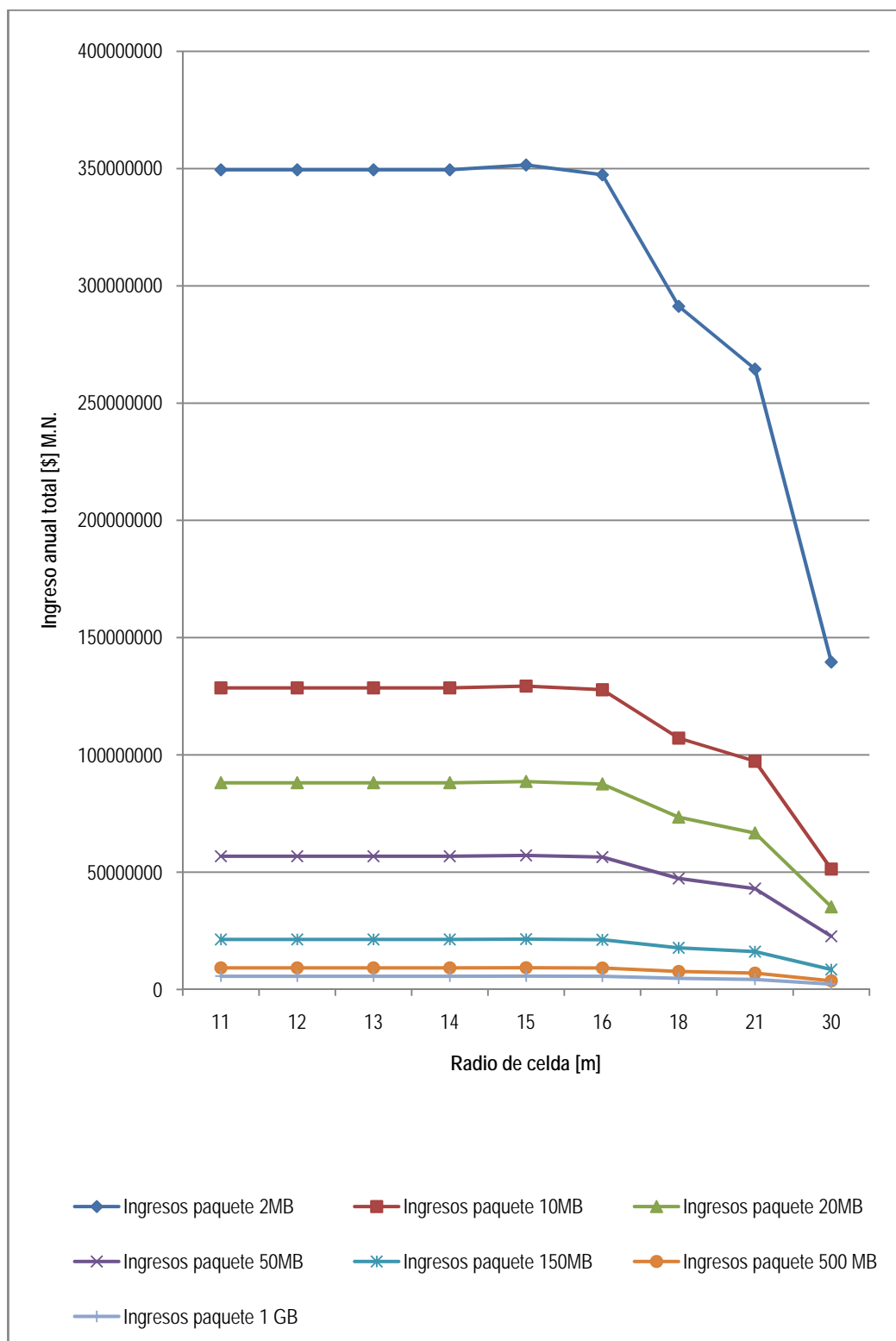
Por tanto, el ingreso anual total de la red radio es equivalente al ingreso diario para cada configuración de red multiplicado por el número de días con carga considerados.

$$\text{Ingreso anual total [\$]} = \text{Ingreso diario de configuración de red [\$]} * \text{Número de días con carga}$$

#### Ecuación (8), Capítulo 1.

El número de días con congestión que presenta una red de telecomunicaciones es variable y está en función de la ciudad, de los servicios que preste la red a los usuarios, de las promociones del operador, etc. Para propósitos de análisis en este trabajo de tesis, se considera que la red móvil de telecomunicaciones presentará 1 día a la semana el tráfico propuesto, por tanto, considerando 52 semanas por año, se obtiene que la red móvil de telecomunicaciones propuesta para el aeropuerto internacional de Los Cabos presentaría 52 días con horas pico en un año con los ingresos anuales totales como se indica en el Gráfico 22, para cada configuración de red propuesta. Se observa la caída muy pronunciada de los ingresos cuando la red se configura con un radio de celda mayor a los 16 metros.

Gráfico 22. Ingresos anuales totales para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3. Beneficio neto anual de la red radio

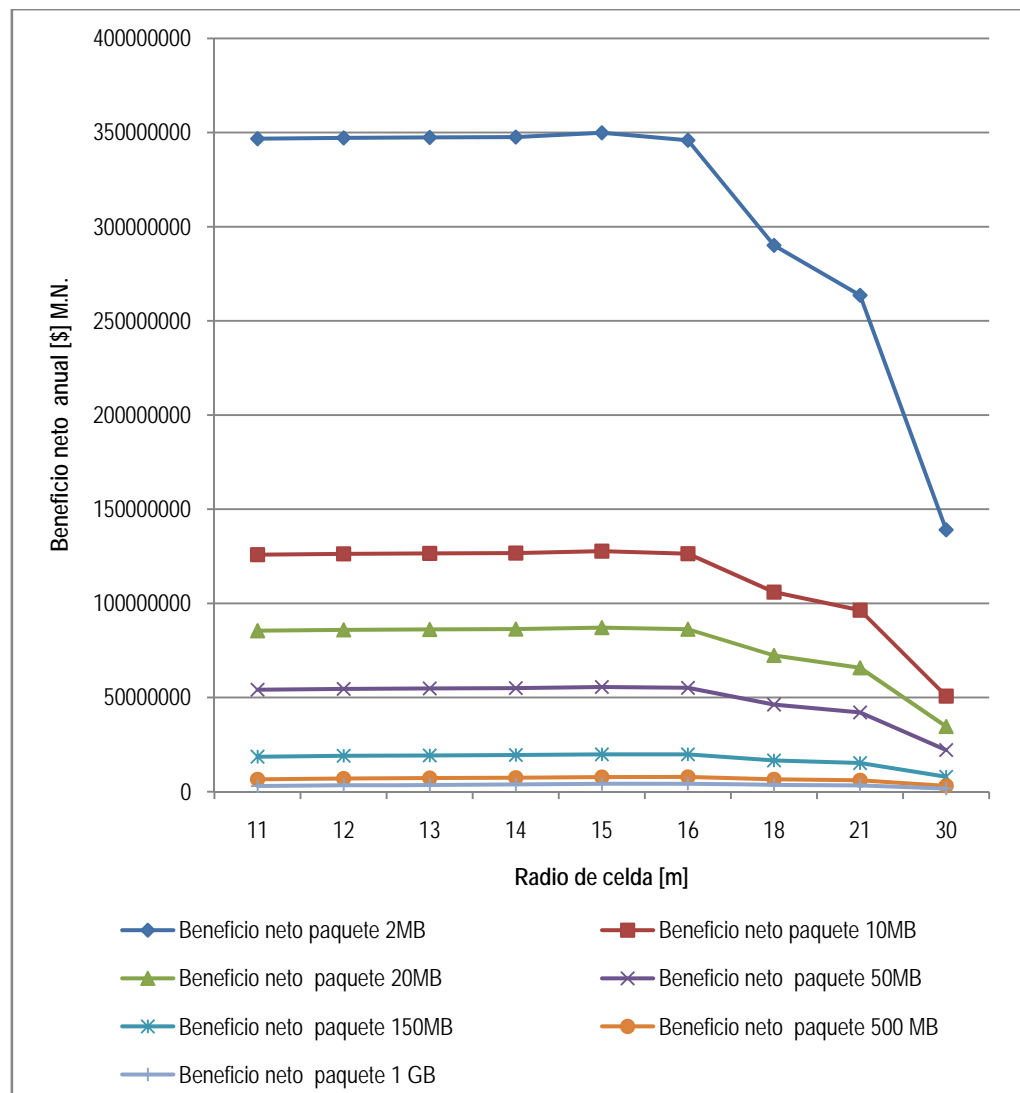
El beneficio neto anual de la red radio, de acuerdo a la Ecuación 9 citada en el Capítulo 1, queda expresada como función del costo anual total e ingreso anual total de la siguiente forma:

$$\text{Beneficio neto anual total [\$]} = \text{Ingreso anual total [\$]} - \text{Costo anual total [\$]}$$

Ecuación (9), Capítulo 1.

Con base en los costos e ingresos anuales totales para las diferentes configuraciones de red que se están estudiando, y con base en la Ecuación 9 citada en el Capítulo 1, se obtiene el Gráfico 23 en donde se ilustra el beneficio neto anual total para las diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.

Gráfico 23. Beneficio neto anual para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.



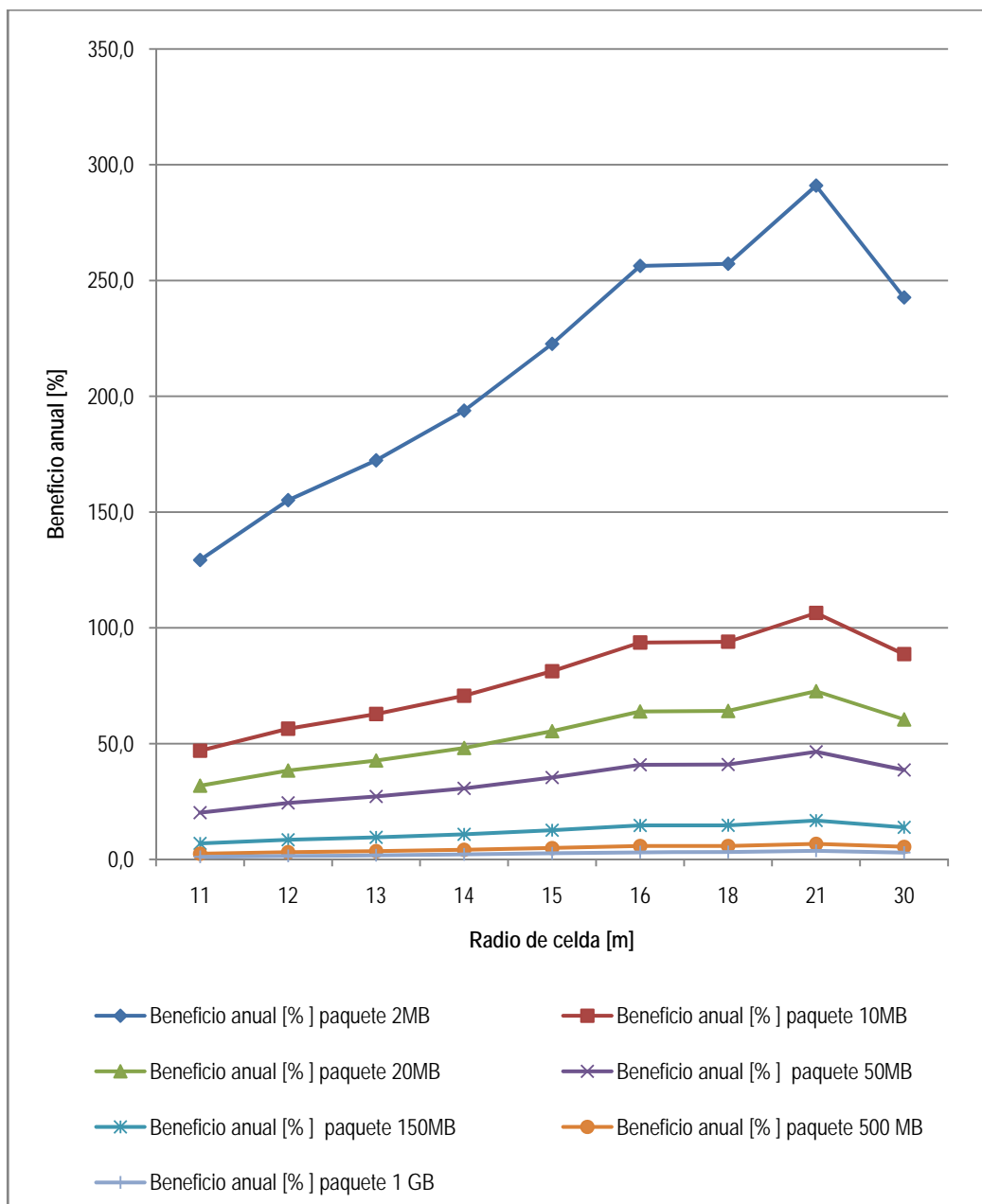
Fuente: Elaboración propia.

En porcentaje y de acuerdo a Cabral et al. (2005), el beneficio anual se expresa, de acuerdo a la Ecuación 10 citada en el Capítulo 1, de la siguiente forma y se ilustra en el Gráfico 24:

$$\text{Beneficio anual [\%]} = \frac{\text{Beneficio neto anual total[\$]}}{\text{Costo anual total[\$]}}$$

Ecuación (10), Capítulo 1.

Gráfico 24. Beneficio anual en porcentaje para diferentes configuraciones de red y paquetes tarifarios.



Fuente: Elaboración propia.



Del Gráfico 24 se obtiene el radio de celda que maximiza la relación costo-beneficio para cada paquete tarifario, 2MB, 10 Mb, 20 MB, 50 MB, 150 MB, 500 MB y 1 GB y que corresponde a 21 metros.

Por tanto, la red móvil de telecomunicaciones para dar cobertura de interior al aeropuerto internacional de Los Cabos en Baja California Sur y sobre la cual el operador proporcionaría a los usuarios los servicios de Voz sobre IP, videoteléfono, descarga de archivos FTP y video teléfono de alta definición, quedaría configurada por 6 celdas con radio de cobertura de 21 metros cada una para maximizar la relación costo-beneficio de la red.

## Capítulo 5. Conclusiones generales y recomendaciones

### Objetivos

- Emitir las conclusiones generales del trabajo de tesis.
- Emitir las recomendaciones y matriz de oportunidades que podrían seguirse como líneas de investigación futuras.

En el Capítulo 5, se emiten las conclusiones generales del trabajo de tesis, indicando el cumplimiento del objetivo general y de los objetivos específicos. Así mismo, se emiten recomendaciones y una matriz de oportunidades que podrían seguirse como líneas de investigación futuras.

### Conclusiones generales

La configuración de red para dar cobertura de interior en el aeropuerto Internacional de Los Cabos Baja California Sur que maximiza la relación costo- beneficio de acuerdo al modelo de tráfico y al modelo económico es la que está conformada por 6 celdas con radio de 21 metros y capacidad de 7 canales cada una, por tanto, la capacidad total de la configuración de red que optimiza la relación costo-beneficio es de 42 canales, esto aplica para cada paquete tarifario, 2MB, 10 Mb, 20 MB, 50 MB, 150 MB, 500 MB y 1 GB.

El modelo de tráfico que se propuso quedó conformado por 4 servicios con su respectiva aplicación, de esta forma, se consideraron las aplicaciones de Voz-IP con 50% de utilización, Video-teléfono con 22% de utilización, FTP con 16% de utilización y video-teléfono HD con 12% de utilización. Para la configuración que maximiza la relación costo-beneficio, se procesan 1577 llamadas de Voz-IP, 695 llamadas de Video-teléfono, 506 llamadas FTP y 377 llamadas de Video-teléfono HD, sumando 3155 llamadas totales procesadas.

De acuerdo al modelo económico, la configuración de red que maximiza la relación costo-beneficio, 6 celdas con radio de 21 metros y capacidad de 7 canales cada una, presenta un costo total anual de la red de \$570000.00 pesos y un ingreso total anual de \$264533951.00 pesos para el paquete de 2MB, de \$97318384.66 pesos para el paquete de 10MB, de \$66724925.61 pesos para el paquete de 20 MB, de \$43013650.68 para el paquete de 50 MB, de \$16130119.00 pesos para el paquete de 150 MB, de \$6989718.23 para el paquete de 500 MB y de \$4301365.06 pesos para el paquete de 1GB.

El máximo beneficio anual porcentual, 291%, se obtiene con la comercialización de paquetes de 2MB, mientras que el mínimo beneficio anual porcentual, 3.7%, se obtiene con la comercialización de paquetes de 2MB.

### Recomendaciones

Desde el punto de visto económico, en relación a la rentabilidad de la industria, las utilidades se basan en el equilibrio entre oferta y demanda. Si la demanda supera a la oferta, se obtiene gran rentabilidad. Con todo, en el equilibrio a largo plazo entre ambas variables influye profundamente la estructura de la industria y las consecuencias del desequilibrio afectan a la rentabilidad. Por tanto, aun cuando las fluctuaciones a corto plazo de la oferta y de la demanda pueden incidir en la rentabilidad a corto plazo, la rentabilidad a largo plazo depende de la estructura de la industria.

Es por ello que, en el presente trabajo de investigación, y con el objetivo de analizar a detalle en el caso de México, la rapidez con que la oferta de los actuales operadores de redes de telecomunicaciones se ajusta a la demanda de los usuarios potenciales, se recomienda analizar la estructura de la industria de las telecomunicaciones, para el caso específico

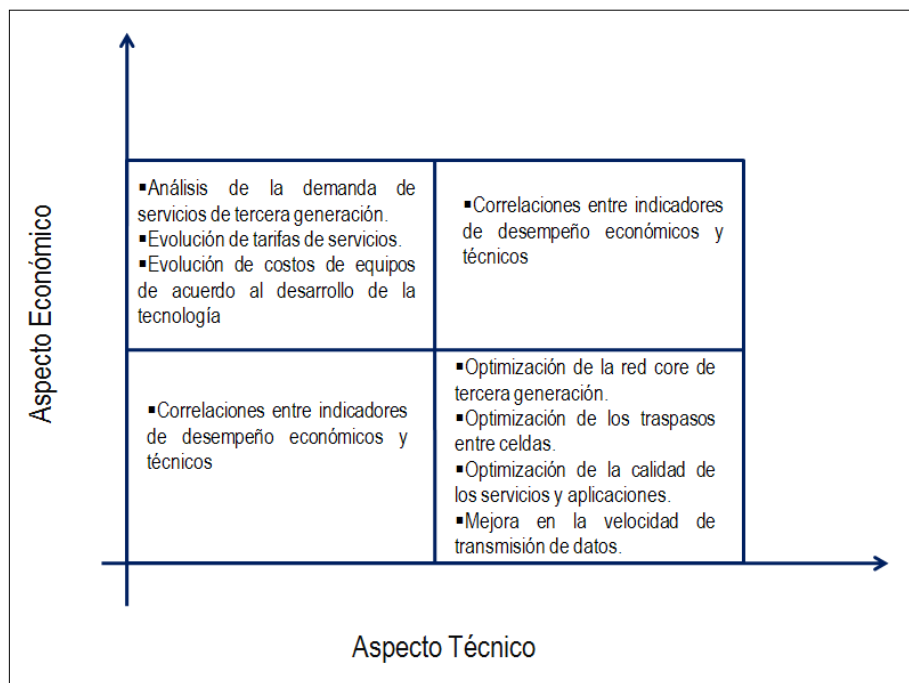
de los servicios de tercera generación. Dicho análisis, permitirá también, conocer la relación que guarda la utilización de los recursos de las redes de telecomunicaciones con su correspondiente rentabilidad.

### Matriz de oportunidades en investigaciones futuras

Las oportunidades que se visualizan para investigaciones futuras en relación al tema de la planificación de las redes radio de tercera generación en México son grandes y pueden ser enfocadas desde dos dimensiones, aspecto técnico y aspecto económico.

La Figura 17, ilustra algunas de las oportunidades que la autora del presente trabajo de investigación visualiza para investigaciones futuras. Se mencionan por ejemplo, el análisis de la demanda de servicios de tercera generación, para el caso de México, la evolución de tarifas de servicios y costos de equipos, la optimización de la red core así como de la calidad de los servicios y aplicaciones, entre otras.

Figura 17. Matriz de oportunidades en investigaciones futuras.



Fuente: Elaboración propia.

## Referencias

1. 3G Americas (2007). Press release, 11 de noviembre.
2. 3GPP (2002). Technical specification group services and systems aspects: Network architecture V3.5.0 (Release 1999). *3GPP Technical Standards*.
3. Alonso, M. y López C. (2005). Simuladores UMTS. *Escuela Superior de Ingenieros*. Universidad de Sevilla.
4. Antoniou, J. , Vassiliou, V. y Jacovides N. (2003). A simulation Environment for Enhanced UMTS Performance Evaluation. *Proc. Of ATNAC 2003-The Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference*. Melbourne, Australia.
5. Antoniou, J., Vassiliou, V. y Pitsillides A. (2005). Coverage and Capacity Planning for 3G and beyond Mobile Networks. *2<sup>nd</sup> COST290 MC Meeting*. Colmar, France.
6. Cabral O. et al. (2005). Enhanced UMTS Simulation – based Planning in Office Scenarios. *MULTIPLAN y CROSSNET, Proyecto de Re-equipamiento Científico REEQ/1201/EEI/2005*. Lisboa, Portugal.
7. Cabral, O., Velez, F., Hadjipollas, G., Stylianou, M., Antoniou, J., Vassiliou, V. y Pitsillides A. (2005). Enhanced UMTS cost/revenue Optimisation in Offices Scenarios. *Proc. Of 3G2005-6<sup>th</sup> IEE International Conference on 3G & Beyond*. Londres, Inglaterra.
8. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2008). La inversión extranjera en América Latina y el Caribe. *Publicación anual de las Naciones Unidas*. Santiago de Chile, Chile.
9. Correia, L. et al. (2002). Models and Simulations for Network Planning and Control of UMTS. *Publicación del proyecto MOMENTUM*. Editor Eirk Fledderus.
10. Davies, V. A. (2000). Evaluating Mobility Models Within an Ad Hoc Network. *Thesis for the degree of Master of Science*. Faculty of the Colorado School of Mines.
11. Elizondo, C. M. y Flores de la Mota, I. (2006). Apuntes de simulación. *Facultad de Ingeniería. División de estudios de Posgrado, Departamento de Sistemas, Sección de Investigación de Operaciones, UNAM*.
12. Escobar, Z. M. y Calvo, R. M. (2001). Análisis de Calidad de Servicio en sistemas Móviles de Tercera Generación. *E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España*.
13. ETSI (1997). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA); Concept evaluation. *UMTS 30.06, ETSI TR 101 146*.
14. Ferreira, J. y Velez, F. (2005). E-UMTS services and applications characterization. *Elektronikk-Strategies in Telecommunications*. Vol. 101, No.1, 113-131.
15. Ferreira, J., Gomes, A. y Velez, F. (2003). Enhanced UMTS Deployment and Mobility Scenarios. *Proc. of 12<sup>th</sup> IST Mobile & Wireless Communications Summit*. Aveiro, Portugal.
16. Gavish, B. y Sridhar, S. (1995). Economic aspects of configuring cellular networks. *Wireless Networks*, No.1, 115-128.

17. ITU-T (1993). B-ISDN Aspectos de servicio de la red digital de servicios integrados de banda ancha. *Recomendación I.221*. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra, Suiza.
18. Kelton, D., Sadowski, R. y Sturrock, D. (2007). Simulación con software Arena. *Mc Graw Hill*. Cuarta Edición.
19. Mecklenbrauker, C. (2008). From GSM/GPRS via UMTS, WIMAX and MIMO to LTE/SAE. *389.075 Mobile Communications Seminar*.
20. Mishra, A. editor (2007). Advanced Cellular Network Planning and Optimization. *John Wiley & Sons Ltd*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, England.
21. Ramos, T. S. (2008). Service Provider Perspectives on the Evolving Information Age. *Networking Research Laboratory, Bell Laboratories*.
22. San José, E. y Velez, F. (2003). Enhanced UMTS Services and Applications: a perspective beyond 3G. *Proc. Of EPMCC 2003- 5<sup>th</sup> European Personal Mobile Communications Conference*. Glasgow.
23. TR 101 112 V3.2.0 (1998). Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS (UMTS 30.03 version 3.2.0). *Technical Report, ETSI*. Valbonne, France.
24. Van, C. S. (2003). Study of soft handover in UMTS. *Master Thesis for the degree of Burgerlijk Electrotechnisch Ingenieur – optie Communicatie*. Technical University of Denmark.

## Mesografía

<http://www.nokia.com>

<http://www.ericsson.com>

<http://www.huawei.com>

<http://www.aeropuertomexico.com>.

<http://www.telcel.com.mx>

<http://www.3gpp.org>.

## Anexo 1

### Función de distribución de Poisson

La frecuencia de aparición de eventos en un proceso de llegadas, puede formalizarse al especificar el tiempo entre dos llegadas sucesivas, o especificando el número de eventos de llegada por intervalo (Elizondo y Flores, 2006).

- **Tiempo entre 2 eventos de llegada sucesivos:** en general, el tiempo entre dos eventos independientes de llegada consecutivos suele responder a una distribución exponencial.
- **Número de eventos de llegada por intervalo:** en lugar de descubrir el tiempo entre eventos de llegada, se describe el número de eventos en un intervalo de tiempo constante. La distribución de Poisson es una de las más utilizadas para describir este tipo de comportamiento. Esta distribución fue desarrollada originalmente para modelar las llamadas telefónicas a una central. Otros fenómenos que pueden ser modelados son:
  1. El número de entidades temporales que llegan por unidad de tiempo.
  2. El número total de defectos en una pieza.
  3. El número de veces que un recurso es interrumpido por unidad de tiempo.

Tabla .Función de distribución Poisson.

Poisson	<i>Poisson</i> ( $\lambda$ )
Función de probabilidad	$f(x) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} & x \in \{0, 1, \dots\} \\ 0 & \text{resto} \end{cases}$
Distribución acumulativa	$F(x) = \begin{cases} e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\lfloor x \rfloor} \frac{\lambda^i}{i!} & 0 \leq x \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
Media	$\lambda$
Varianza	$\lambda$

Fuente: Elizondo y Flores (2006).