

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

PROYECTO TERMINAL II

**SIMULADOR DE MODELOS DE
TRÁFICO PARA NODOS IOT EN UNA
RED CELULAR DE 5G**

Autores:

Rolando SOTELO ALARCON
Luis Fernando SALAZAR
ORDOÑEZ

Asesores:

Dr. Domingo LARA
RODRIGUEZ
Dr. Noe TORRES CRUZ

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos
para el grado de Ingeniería en Telemática*

Julio 2020

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA Y
TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Resumen

Ingeniería en Telemática

SIMULADOR DE MODELOS DE TRÁFICO PARA NODOS IOT EN UNA RED CELULAR DE 5G

by

Resumen: En este documento se presenta el desarrollo de un simulador a nivel de sistema, programado bajo el paradigma de eventos discretos, que permite modelar el servicio que la red de comunicación celular de quinta generación (5G), ofrece a nodos de Internet de las cosas (IoT). El simulador se enfocó en el caso de uso mIoT, el cual comprende principalmente de nodos IoT estáticos de baja complejidad que además se encuentran en gran cantidad dentro de los escenarios de esta red. La arquitectura del simulador contempló cuatro módulos clave para su ejecución: un modelo de despliegue de UEs, un modelo de canal, un esquema de acceso múltiple al medio no ortogonal y modelos de tráfico adecuados para modelar distintos servicios. Asimismo, se consideró el fundamentar la fiabilidad de los resultados obtenidos por el simulador mediante la previa prueba e implementación de modelos de tráfico ya estudiados en la literatura concerniente al desempeño de sistemas celulares. Con los resultados del simulador se determinaron qué configuraciones y parámetros iniciales de la arquitectura de red propuesta satisfacen una óptima calidad de servicio (QoS) para el caso de uso mIoT.

Palabras clave: mMTC, NB-IoT, PD-NOMA, 5G, simulador de eventos discretos, QoS.

Abstract:

Keywords: mMTC, NB-IoT, PD-NOMA, 5G, simulador de eventos discretos, QoS.

TODO: Realizar la actualización del abstract y agregar su traducción

Acknowledgements

Agradecimientos...

Índice general

Declaration of Authorship	II
Resumen	III
Acknowledgements	V
1. Presentación del Proyecto	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4. JUSTIFICACIÓN	5
1.5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	6
1.6. ALCANCES	7
2. Marco Teórico	9
2.1. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS EN TELECOMUNICACIONES	9
2.2. MODELADO DEL CANAL CELULAR	10
2.2.1. Relaciones Generales de Propagación	12
2.2.2. Pérdida por trayectoria en el Espacio Libre (FSPL, <i>Free Space Path Loss</i>)	12
2.2.3. Caracterización del canal de radio	14
2.3. GEOMETRÍA CLÁSICA CELULAR	16
2.3.1. Planeación Celular	17
2.3.2. Planeación de frecuencia	20
2.4. INTERFERENCIA EN SISTEMAS CELULARES	21
2.5. CAPACIDAD EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES	23
2.6. INTERFAZ DE RADIO	24
2.6.1. Esquemas de Acceso Múltiple al Medio	25
2.6.2. Generaciones anteriores de sistemas de comunicaciones móviles	25
2.7. TELETRÁFICO	27
2.7.1. Caracterización del Tráfico	27
2.7.2. Notación Kendall	29

2.8. SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS	30
2.9. SIMULACIONES A NIVEL DE SISTEMA	31
2.10. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN PARA SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS (DES)	32
2.11. ORGANISMOS INTERNACIONALES DE ESTANDARIZACIÓN	33
3. Estado del Arte	35
3.1.	35
3.2.	35
4. Análisis	37
4.1. RED 5G	38
4.2. INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	38
4.3. CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ÁMBITOS DE IoT	38
4.3.1. Ciudades inteligentes (<i>Smart City</i>):	38
4.3.2. Ambiente inteligente (<i>Smart Environment</i>)	38
4.3.3. Energía inteligente (<i>Smart Energy</i>):	38
4.3.4. Transporte y movilidad inteligentes (<i>Smart Transport and Mobility</i>):	38
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO A IMPLEMENTAR	38
4.4.1. Análisis de las aplicaciones de IoT y selección de casos considerados	38
4.4.2. Análisis de las tecnologías para IoT y selección de casos considerados	38
4.4.3. Análisis del estándar NB-IoT	38
4.5. INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPIs)	38
4.6. ANÁLISIS DE MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE REDES 5G/IoT	38
4.6.1. MODELO DE DESPLIEGUE DE BSs Y UEs	38
4.6.2. MODELO DE CANAL	38
4.6.3. ESQUEMA DE ACCESO MÚLTIPLE AL MEDIO	38
4.6.4. MODELOS DE TRÁFICO	38
5. Diseño	39
5.1. MODELO DE SISTEMA PROPUESTO	39
5.2. RESULTADOS A OBTENER	39
5.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	39
5.4. DEFINICIÓN DE EVENTOS	39
5.5. DIAGRAMAS DE FLUJO	39
5.6.	39
5.7.	39
5.8.	39

6. Implementación	41
6.1.	41
6.2.	41
7. Resultados	43
7.1.	43
7.2.	43
8. Conclusiones	45
8.1.	45
8.2.	45
A. Simulación - Geometría celular hexagonal	47
A.1.	47
Bibliografía	49

Índice de figuras

2.1. Procedimiento de generación de coeficientes de canal	11
2.2. Propagación de señales celulares en ambientes urbanos	14
2.3. Ejemplo de niveles de señal con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido	15
2.4. Clusterización de celdas con un factor de reúso de 3 celdas	19
2.5. Localización de celdas co-canal con distintos factores de reúso	20
2.6. Sistema celular con celdas de tamaño no uniforme	21
2.7. Diferentes tipos de acceso múltiple al medio ocupados en generaciones anteriores (1G, 2G y 3G)	26
2.8. El diseño usual de una red celular en simulaciones a nivel de sistema . .	31
2.9. Socios Internacionales con los que colabora la 3GPP	34

Índice de cuadros

TODO: La lista de tablas la traduce como lista de cuadros", hay que ver como corregir esto en el cls

List of Abbreviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Cuarta generación de Comunicaciones Móviles
5G NR	5G New Radio
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARPU	Average Revenue Per User
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
AWGN	Additive White Gaussian Noise
apd	Average Power Decay (a.k.a. PLE)
BS	Base Station
BSs	Base Stations
BW	Bandwidth
CCSA	China Communications Standards Associations
CD-NOMA	Code Division NOMA
CIoT	Cellular IoT
CMMPP	Coupled Markov Modulated Poisson Process
CT	Central Terminal
DES	Discrete Event Simulation
DL	Downlink
ED	Event-Driven
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eMTC	Enhanced Machine Type Communications
ETSI	European Telecommunications Standards institute
GIL	Global Interpreter Lock
HTC	Human Type Communication
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFT	Instituto Federal de Telecomunicaciones
InH	Indoor Hotspot
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunications
KPI	Key Performance Indicator
KPIs	Key Performance Indicators
LoS	Line of Sight

LPWAN	Low Power Wide Area Networks
LSP	Large-Scale Parameters
LTE	Long Term Evolution
LTE-M	LTE-MTC
M2M	Machine to Machine
MA	Multiple Access
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
mIoT	Massive IoT
MMPP	Markov Modulated Poisson Process
mMTC	Massive Machine Type Communications
MS	Mobile Station
MT	Mobile Terminal
MTC	Machine Type Communication
MTs	Mobile Terminals
M2M	Machine to machine
NB-IoT	Narrow-Band Internet of Things
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NLoS	Non-Line of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
PD-NOMA	Power Division NOMA
PE	Payload Exchange
PL	Path Loss
PLE	Path Loss Exponent
PPP	Poisson Point Process
PSM	Power Saving Mode
PU	Periodic Update
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Networks
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
Rx	Receiver
SA	System Aspects
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SF	Shadow Fading
SIC	Successive Interference Cancellation
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SM	Suburban Macro
SMM	Semi-Markov Model

TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TSDO	Telecommunications Standards Development Organization
TSDOs	Telecommunications Standards Development Organizations
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society, India
TSG	Technical Specifications Group
TTA	Telecommunications Technology Association of Korea
TTC	Telecommunication Technology Committee
Tx	Transmitter
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMa	Urban Macro
UMi	Urban Micro
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communications

TODO: Acabar de dar formato a lista de acronimos, poniendo cada sigla en negritas

For/Dedicated to/To my ...

Capítulo 1

Presentación del Proyecto

1.1. INTRODUCCIÓN

Imaginar nuestra vida sin los beneficios brindados por los sistemas de comunicación de hoy en día, o tan sólo sin la tecnología presente en este ámbito desde los últimos 20 años es ya muy difícil, y esto se debe a que en el presente una gran parte de las tareas y actividades, muchas de ellas cruciales para el funcionamiento de nuestras sociedades, operan eficientemente sí y sólo sí se está propiamente conectado y en facultades de compartir información (G. Fettweis y Alamouti, 2014).

Los sistemas de comunicación celular han tenido saltos generacionales desde la conocida como primera generación, la cual saldría al mercado a finales de la década de los 70's e inicio de los 80's, hasta el presente con el desarrollo de la próxima generación (5G), la cual comenzará su implementación en el año 2020. En (G. Fettweis y Alamouti, 2014) encontramos que:

“La primera y segunda generación de comunicaciones móviles estuvieron dominadas por señales analógicas de audio y posteriormente señales digitales de audio y texto. La tercera generación se trató más de escalar el número de usuarios en la red [...] pero fue abrumada por un tsunami de contenido de imágenes y videos.”

Cada uno de estos saltos de generación ha estado motivado por distintos requerimientos de servicio, necesidades de los usuarios y la aparición de nuevas tecnologías que han buscado ser una vía para facilitar la comunicación entre individuos de todo el mundo y ahora, más recientemente, la comunicación entre máquinas.

El aumento de la tasa de transmisión de datos ha sido siempre un factor a tener en cuenta para el desarrollo de los estándares de las nuevas generaciones de redes móviles, por ejemplo, para la nueva generación se espera “un pico de transmisión de al menos 1 Gb/s al tiempo de su introducción en 2020, esperando que crezca hasta los 10Gb/s para 2025”, (G. P. Fettweis, 2020). Pero el sistema de comunicaciones móviles de quinta generación ha estado, además de eso, motivado por un mayor volumen de transmisión

de datos, un incremento radical en la cantidad de dispositivos conectados a la red, una menor latencia y una mayor duración de batería para los dispositivos de bajo consumo.

Las limitaciones presentes hasta ahora para las comunicaciones IoT celulares, se deben principalmente a que la red de comunicación móvil fue creada para voz y aplicaciones de texto, evolucionando eventualmente a una transmisión de archivos como imágenes y videos predominante en el enlace de bajada. Por otro lado la comunicación de dispositivos IoT tiene un conjunto de requerimientos muy distintos. Pero es ahora con la quinta generación que se promete brindar las herramientas que esta tecnología necesita para alcanzar su máximo potencial. 5G se trata entonces de la propuesta de crear una red de comunicaciones que logre implementar tanto los servicios inherentes a las necesidades de comunicación entre los humanos y aquellas necesidades de comunicación entre las máquinas. El cumplir con estas últimas necesidades, aseguraría brindar una calidad de servicio óptima para la nueva ola de dispositivos de IoT que se espera estén ya conectados a la red para 2020.

Este proyecto presenta el diseño de un simulador de eventos discretos, el cual modeló el servicio prestado por la arquitectura de red celular que aquí se propone a nodos IoT. Su arquitectura contempló la próxima generación móvil a implementarse (5G) y los servicios seleccionados para atender a aplicaciones del caso de uso mIoT. Este simulador se enfocó en el tráfico generado por dispositivos NB-IoT y con los resultados obtenidos se esclareció sobre qué configuraciones de red son ideales para conseguir una óptima calidad de servicio.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los recientes años se ha estado presenciando la definición de la tecnología de comunicación móvil 5G en estándares, para su posterior introducción a partir de 2020, y como se resalta en (G. P. Fettweis, 2020) la nueva generación no sólo seguirá la línea de incrementar la velocidad de transmisión como se ha venido haciendo en cada salto generacional, sino que también traerá consigo la posibilidad de una conectividad adicional sin precedentes, todo esto motivado por la cantidad masiva de dispositivos de IoT que se esperan. Según *Ericsson Mobility Report* (Ericsson, 2019), 22.3 mil millones de dispositivos en el 2024, pertenecerán a una aplicación de IoT. De manera que 5G dará servicio a una enorme cantidad de dispositivos IoT, cada dispositivo enviará pequeños paquetes de datos a lo largo de mucho tiempo, además de que existirá una cierta sincronía en el tráfico generado. Lo anterior ha provocado el desarrollo de nuevas tecnologías que proponen distintas formas de agrupamiento de estos nodos, distintas formas de acceder a los recursos, distintas propuestas de comunicación entre ellos y nuevas formas de que ahorren energía. Siempre teniendo en cuenta los KPIs de la red,

como dar servicio a una cantidad masiva de nodos, la duración de la batería de estos y la menor latencia en comunicaciones críticas¹, como se menciona en (Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative, 2015).

Esto ha resultado en nuevos retos para la implementación de la red, para la cual se desarrolla tecnología o se mejora la ya existente. En (GSM Association, 2019), se presenta la tecnología NB-IoT (*Narrow-Band IoT*), originalmente creada como una solución que brindara servicio a nodos IoT en LTE. Esta tecnología formará parte de los estándares de 5G, como 3GPP² lo ha indicado a la ITU (*International Telecommunication Union*). Se pretende que con esta tecnología y algunas mejoras, la red 5G sea capaz de brindar servicio a aplicaciones del caso de uso mMTC³, para el cual se esperan tener decenas de miles de dispositivos conectados por celda.

En el futuro, los escenarios de IoT, tendrán una enorme cantidad de dispositivos conectados en comparación con los actuales escenarios de la red 4G (Yu, 2017). Por lo tanto, las tecnologías de 5G deberán brindar servicio a muchos dispositivos usando recursos limitados. Pero dada la elevada complejidad con la que el modelo de un sistema de comunicación como la red 5G puede contar, si de éste se quieren obtener resultados útiles, resulta casi imposible el analizar su comportamiento sino a través de una simulación.

Los patrones de tráfico de nodos de IoT varían según su caso de uso, los cuales se dividen normalmente en tres: *eMBB*, *uRLLC* y *mMTC*. Para mMTC también llamado mIoT, en el cual se enfocará el proyecto, se tienen nodos en su amplia mayoría estáticos y como se ve en (Hossfeld y Metzger, 2018), para estos nodos podemos considerar por los menos dos patrones de tráfico: el periódico, y el aleatorio, de manera que el modelo de tráfico deberá tener en consideración esto. Como se puede apreciar en (Hossfeld y Metzger, 2018), un problema crítico del Internet de las cosas masivo (mIoT) en las redes móviles es que los dispositivos de IoT causarán una gran congestión en esta si es que no se incorporan mejoras en las arquitecturas de estas redes. Este problema se ve acrecentado debido a que el tráfico de los nodos mIoT presenta cierta sincronía espacial y temporal dependiendo de la aplicación a la que pertenezcan.

Por lo anterior, para la red 5G se necesitan realizar simulaciones en sus distintos casos de uso, que generen resultados sobre qué arquitectura de red y tecnologías brindan un resultado óptimo. Con la realización de este proyecto se pretende aportar al campo de las comunicaciones móviles de quinta generación, que está específicamente interesado en el servicio prestado a los nodos de IoT, de una herramienta de simulación que genere resultados que permitan realizar comparaciones entre distintas configuraciones de

¹ Comunicaciones que requieren de una urgente respuesta debido a su naturaleza, por ejemplo los coches auto-dirigidos.

² The 3rd Generation Partnership Project (3GPP), desarrolladores del estándar NB-IoT y el 5G NR

³ Cabe mencionar que los casos de uso o tecnologías mIoT y mMTC son análogos.

red. Todo esto con el fin de que la red 5G próxima a ser desplegada, cumpla con una óptima calidad de servicio para el caso de uso mIoT.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un simulador de teletráfico para el ambiente de Internet de las cosas masivo (mIoT) en una red celular de quinta generación (5G), por medio de la programación de eventos discretos, con la finalidad de evaluar el desempeño de esta red en términos de la cantidad de recursos requeridos para satisfacer niveles esperados de calidad de servicio (QoS).

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el escenario a implementar, mediante el análisis de requerimientos, para definir después los parámetros de entrada en el modelado del simulador.
- Seleccionar los modelos (despliegue, propagación, técnica de acceso múltiple) aplicables a una simulación a nivel de sistema para la comunicación entre nodos IoT y la red 5G.
- Seleccionar y determinar los modelos de tráfico a analizar para nodos IoT que hayan sido propuestos en la red 5G, mediante la lectura de distintas publicaciones en revistas científicas, para simular el modelo más adecuado según los alcances propuestos.
- Determinar los parámetros de desempeño de la red (KPIs), mediante el análisis de distintas publicaciones científicas, con la finalidad de establecer métricas de QoS.
- Definir el procedimiento de la simulación mediante la especificación de su arquitectura y elaboración de diagramas de su funcionamiento y procesos, con el fin de integrar una metodología para su implementación.
- Implementar los modelos y protocolos que definen a la comunicación entre los nodos IoT y la red 5G, mediante algoritmos computacionales (incluyendo la técnica de eventos discretos) y de acuerdo a la arquitectura previamente definida.
- Implementar una técnica de paralelismo, mediante el uso de multiprocesamiento, con la finalidad de reducir los tiempos de ejecución de las simulaciones.

- Evaluar y analizar cada modelo analítico con el uso de escenarios de pruebas y calibración para poder realizar comparaciones con los resultados teóricos esperados y verificar la fiabilidad del simulador
- Simular el modelo de sistema propuesto, mediante la variación de los parámetros de entrada, para caracterizar el desempeño del sistema en términos del tráfico que se puede ofrecer y la cantidad de recursos requeridos para satisfacer objetivos de QoS.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En la gran mayoría de los trabajos de investigación revisados, se han realizado estudios de rendimiento de los sistemas de comunicación móvil de quinta generación. Estos se concentran en evaluar distintos modelos, frecuentemente se considera, un modelo de distribución de BSs y UEs, uno de canal, y un esquema de acceso multiple, sin embargo no hay mucha investigación acerca de incorporar todos estos componentes en conjunto con modelos de tráfico para el caso específico de mIoT. La aportación que se pretende hacer con este proyecto se encuentra precisamente en ese ámbito.

Los enlaces de comunicación inalámbrica experimentan fenómenos físicos perjudiciales al canal como lo son las multi-trayectorias y los desvanecimientos debido a grandes objetos que se interceptan en la trayectoria de la propagación, además el rendimiento de los sistemas celulares inalámbricos tiende a limitarse debido a la interferencia de otros usuarios. Estas condiciones complejas del canal son difíciles de describir con un simple modelo analítico, es por esto que las aproximaciones de las simulaciones son necesarias. Estas pueden analizar el rendimiento de los enlaces de comunicaciones celulares (Dd y col., 2018), modelando un gran número de eventos aleatorios a través del tiempo, mediante el uso de simulaciones orientadas a eventos discretos.

Una simulación permite observar muchas de las interacciones de un sistema, que de otra forma tomaría mucho trabajo predecirlas o calcular, además de que proporciona un método importante de análisis, que resulta sencillo de comunicar y comprender. En todas las industrias y disciplinas, la creación de simulaciones brinda soluciones valiosas al proporcionar información clara sobre sistemas complejos (Dd y col., 2018). Los resultados de una simulación que haga las suposiciones adecuadas y modele correctamente el sistema propuesto, brindarán confianza y claridad, ahorrarán tiempo y muy posiblemente también dinero.

Este proyecto servirá como referencia a los investigadores y estudiantes que busquen comparar los modelos y técnicas propuestos en este trabajo con otras selecciones posibles para la futura red 5G y el servicio brindado a los nodos IoT.

Por otra parte, se debe enfatizar que el desarrollo de este proyecto requiere de la aplicación de conocimientos relacionados a la informática (entre los que se incluyen desarrollo de software y algoritmos computacionales), así como del dominio de conceptos propios de las telecomunicaciones (por ejemplo, análisis de tráfico y caracterización de enlaces inalámbricos). De acuerdo a lo anterior, se considera que este proyecto pertenece al campo de aplicación de la ingeniería telemática. Además, se debe notar que, si bien los fenómenos simulados corresponden al proceso de transmisión de información, dichos fenómenos están siendo analizados en el contexto de un sistema con características telemáticas (nodos mIoT conectados a la red 5G).

1.5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Considerando lo expuesto anteriormente, se propone desarrollar un simulador a nivel sistema que será programado bajo el paradigma de eventos discreto. La elección de una simulación a nivel de sistema se deriva del enfoque que tendrá nuestro proyecto hacia los distintos tipos de tráfico de nodos NB-IoT y la simulación de cada uno de ellos como fuente de tráfico. Las simulaciones a nivel de sistema permiten modelar el comportamiento de múltiples radio bases, múltiples nodos como fuentes de tráfico, la propagación de las señales y la interferencia que estas causan, a la vez que se realizan abstracciones más simples de lo que sucede más allá de estas interacciones. Esto facilita la implementación de una gran cantidad de actores. La generación de variables aleatorias vendrá de la mano de las distintas aplicaciones mIoT y sus patrones de transmisión estocásticos, además de la localización de nodos en un plano la cual no será uniforme.

El simulador será capaz de evaluar la calidad del servicio que la red celular propuesta ha de brindar a nodos de mIoT. Dicha arquitectura de red, propuesta en este mismo trabajo está basada a su vez en los avances hechos, por grupos como 3GPP, hacia el despliegue de la red 5G. La base de la que se partió es la tecnología NB-IoT, la cual abordó el caso de uso mMTC en la red 4G donde ha estado prestando servicio a nodos mIoT a una escala menor que la esperada en 5G.

Se modelará el servicio brindado a nodos estáticos de IoT cuyas aplicaciones pertenecen al caso de uso mIoT. Con la ayuda del estándar NB-IoT, para el que se proponen mejoras en el acceso múltiple, esto en búsqueda de cumplir con los KPI's de la red 5G, ya que si bien NB-IoT pertenecerá al paradigma de 5G, no es viable tal y como existe ahora para cumplir con los requerimientos. La importancia de esto recae, como se menciona en (Ejaz, Imran y Jo, 2016), en que la tecnología de IoT ha creado una revolución en la última década con la creación de aplicaciones pensadas alrededor de todo tipo de sensores, lo que resulta en una proyección estimada de miles de millones de dispositivos IoT para el 2020 [3]. Esta misma referencia asegura que IoT está tomando un

papel principal en el desarrollo de la quinta generación, debido a que se espera que los dispositivos de IoT formen la gran mayoría de dispositivos en esta nueva generación que se avecina.

Se propone un análisis fundamental principalmente del modelado de cuatro componentes que son esenciales para la caracterización de un sistema de comunicación móvil. Estos componentes corresponden al: modelado de despliegue de usuarios, canal, tráfico y un esquema de acceso múltiple al medio. Esto se encontrará en el capítulo 4, que comprende un análisis de forma detallada de estos, pero a continuación se abordan de tal forma que se esclarezca la arquitectura del modelo de sistema, presentada también más adelante.

Se considerará un modelo de despliegue de nodos IoT que seguirá un proceso puntual de Poisson con el fin de crear una geometría estocástica, se representarán las pérdidas por medio de un modelo de canal estadístico para ambientes celulares de quinta generación, se considerará en la simulación un modelo de tráfico fuente en el que cada nodo mIoT generará tráfico ya sea periódico o aleatorio, cada caso con distintas tasas y por último, referente al método de acceso múltiple, se aplicará una mejora a la tecnología NB-IoT, se trata de la implementación del esquema NOMA en el dominio de la potencia, de forma que agrupamientos (de longitud fija) de nodos estarán compartiendo un mismo recurso (una sub-banda).

Este análisis conllevará en conjuntos de la red 5G y los dispositivos NB-IoT en un ambiente masivo, conseguirá resultados que podrán brindar una base fundamental para evaluar el desempeño de estas redes y por supuesto, su dimensionamiento en términos de objetivos de QoS.

1.6. ALCANCES

Se obtendrán resultados que permitan analizar las configuraciones de la arquitectura de red propuesta que conllevan a una óptima calidad de servicio. Teniendo como métricas principales la densidad de usuarios soportada y la tasa de transmisión máxima alcanzada. Estos resultados reflejarán a su vez las ventajas que puede traer la selección de cierta arquitectura de red y su despliegue. Es aquí donde se encuentra una de las ventajas de realizar un simulador, ya que con la ayuda de múltiples computadoras, se podrán simular miles de nodos mIoT en esta red. Las configuraciones y parámetros de la red podrán modificarse al inicio de cada simulación, y podrán ser inspeccionados mientras esta corre. La variación de estos parámetros a lo largo de múltiples simulaciones permitirá generar tablas y gráficas de los resultados obtenidos.

Este proyecto no cubrirá los aspectos de movilidad entre celdas para los nodos de IoT, ya que el caso de uso mMTC representa a los nodos estáticos en su mayoría o con velocidades menores a 3Km/h. No se desarrollarán nuevos modelos probabilísticos o matemáticos de ninguna clase, sino que se implementarán los existentes para el escenario propuesto.

Capítulo 2

Marco Teórico

El objetivo de este capítulo fue revisar los fundamentos de la teoría de los sistemas de comunicaciones móviles, comenzando desde las distribuciones de probabilidad utilizadas para caracterizar los fenómenos más importantes en este ámbito, después se ahondó en las pérdidas en un sistema celular por medio de los modelos de canal más comunes y con su caracterización en parámetros a larga y pequeña escala, p.ej., la pérdida por trayectoria y el desvanecimiento de las señales de radio.

Además, se repasó la teoría del concepto celular, es decir, la geometría celular clásica que sirve para la eficiencia en la planificación de los recursos y por lo tanto el problema más importante en estos sistemas: los efectos de la interferencia.

Finalmente, se revisaron los aspectos de la teoría del tráfico en telecomunicaciones, los organismos más importantes de estandarización de redes móviles y algunos conceptos de las simulaciones a nivel de sistema orientados a eventos discretos en conjunto con los lenguajes de programación más utilizados.

2.1. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS EN TELECOMUNICACIONES

El uso de modelos estadísticos es importante para describir (Correia, 2018):

- Llamadas telefónicas y conexiones de datos
- Influencia del usuario en el rendimiento de la red
- Propagación no guiada en ambientes aleatorios
- Movilidad del usuario

Comúnmente se utilizan las siguientes distribuciones de probabilidad en telecomunicaciones (Correia, 2018):

1. Distribución Uniforme: Es usada para describir la fase de una señal. También, se ha utilizado para simular el despliegue de BSs (Al-turjman, Ever y Zahmatkesh, 2018).
2. Distribución Normal (Gaussiana): Es usada para describir fluctuaciones alrededor de un valor medio, p.ej. *shadowing*. Esta distribución no puede ser usada para describir entidades que no pueden ser negativas.
3. Distribución Log-Normal: Es usada para describir entidades como la potencia de una señal, amplitudes, principalmente el desvanecimiento lento.
4. Distribución Rayleigh: Es usada para describir el desvanecimiento rápido-intenso.
5. Distribución Susuki: Describe conjuntamente el desvanecimiento lento y rápido.
6. Distribución Rice: Es usada para describir el desvanecimiento rápido - no-intenso.
7. Distribución Exponencial: Es ampliamente usada para describir la duración de diferentes fenómenos, principalmente asociados con el desvanecimiento de señales y las llamadas telefónicas.
8. Distribución de Bernoulli: Es usada para describir la ocupación de canales de telecomunicaciones.
9. Distribución binomial: Es usada para describir llamadas telefónicas.
10. Distribución de Poisson: Es usada para describir la generación de llamadas telefónicas.

Las PDF y CDF son de suma importancia en el área de las telecomunicaciones ya que ayudan a caracterizar estadísticamente diferentes fenómenos.

TODO: incluir procedimientos para generar variables aleatorias a partir de una distribución uniforme

2.2. MODELADO DEL CANAL CELULAR

Los modelos de propagación por radio se clasifican en modelos a gran escala y a pequeña escala. Los efectos a gran escala generalmente ocurren en el orden de cientos a miles de metros de distancia. Los efectos a pequeña escala se localizan y ocurren temporalmente (en el orden de unos pocos segundos) o espacialmente (en el orden de unos pocos metros). Los parámetros del canal generalmente se dividen en Pérdida por trayectoria (PL), parámetros de gran escala (LSP, como sombreado, dispersión de retardo, dispersión angular, etc.) y parámetros de pequeña escala (como demora, ángulo de llegada y salida, etc.), que reflejan conjuntamente las características de desvanecimiento

del canal. El procedimiento de generación de los coeficientes del canal se puede apreciar en la *Figura 2.1*. La pérdida de ruta generalmente se expresa en una o dos fórmulas y un conjunto de valores numéricos de parámetros, que reflejan las relaciones con el entorno de transmisión, la distancia y la frecuencia, etc.

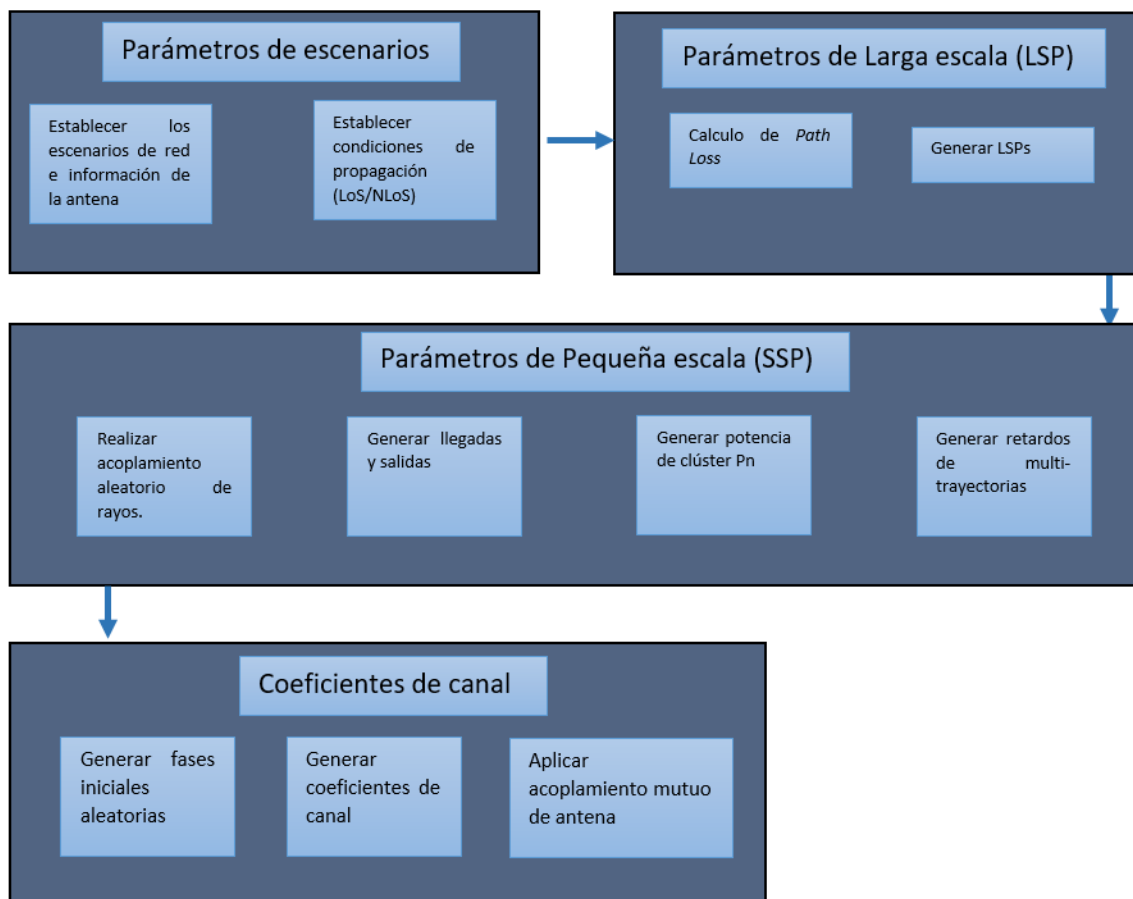


FIGURA 2.1: Procedimiento de generación de coeficientes de canal, [Fuente: 3GPP TR36.873]

El rendimiento a nivel de enlace es un fenómeno de pequeña escala el cual lidia con cambios instantáneos en el canal a través de áreas e instantes de tiempo pequeños donde se considera la potencia recibida como constante, por otra parte, en las simulaciones a nivel de sistema para determinar el rendimiento en general del sistema para un gran número de usuarios esparcidos en una área geográfica es necesario incorporar parámetros de larga escala como el comportamiento estadístico de la interferencia, así como los niveles de señal experimentados por cada usuario a través de largas distancias, ignorando las características transitorias del canal (las de pequeña escala) (Tranter y col.,

2003). En una simulación a nivel de sistema, principalmente se busca la probabilidad de que un usuario en particular alcance un servicio aceptable en el sistema, para esto es necesario contemplar los efectos de los múltiples usuarios para cada enlace individual entre un móvil y la estación base. Por lo tanto en las simulaciones a nivel de sistema se suelen omitir los parámetros a pequeña escala.

2.2.1. Relaciones Generales de Propagación

La pérdida por trayectoria L_p se define como (Correia, 2018):

$$L_p[dB] = P_{tx}[dBm] + G_{tx}[dBi] - P_{rx}[dBm] + G_{rx}[dBi] \quad (2.1)$$

Donde:

$P_{tx} \rightarrow$ Potencia de la antena transmisora

$G_{tx} \rightarrow$ Ganancia de la antena transmisora

$P_{rx} \rightarrow$ Potencia de la antena receptora

$G_{rx} \rightarrow$ Ganancia de la antena receptora

En muchas aplicaciones la ganancia de la antena es referida al dipolo de media longitud de onda:

$$G_{[dBi]} = G_{[dBd]} + 2,15 \quad (2.2)$$

La Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (EIRP) se define como:

$$P_{EIRP}[dBm] = P_{tx}[dBm] + G_{tx}[dBi] \quad (2.3)$$

2.2.2. Pérdida por trayectoria en el Espacio Libre (FSPL, *Free Space Path Loss*)

El receptor puede recibir una señal atenuada directa (también llamada señal de línea de vista (LoS)) del transmisor. El FSPL se utiliza para predecir la pérdida de trayectoria cuando hay un LoS claro y sin obstrucciones entre el transmisor y el receptor. Se basa en la ley de distancia al cuadrado inverso que establece que la potencia recibida (PRX) decae por un factor de cuadrado de la distancia (d) desde el transmisor.

Se considera a la propagación en el espacio libre como la mínima atenuación que una señal puede sufrir en el medio.

La potencia disponible en la antena receptora P_{rx} con una propagación en el espacio libre se define como (también conocida como Formula de Friis):

$$P_{rx[W]} = \left(\frac{\lambda_{[m]}}{4\pi d_{[m]}} \right)^2 P_{tx[W]} G_{tx} G_{rx} \quad (2.4)$$

ó

$$P_{rx[dBW]} = -32,44 + P_{tx[dBW]} + G_{tx[dBi]} + G_{rx[dBi]} - 20\log(d_{[km]}) - 20\log(f_{[MHz]}) \quad (2.5)$$

Donde:

$d \rightarrow$ Distancia entre Rx y Tx

$f \rightarrow$ Frecuencia de operación

$\lambda \rightarrow$ Longitud de onda, $\lambda = \frac{c}{f}$

$c \rightarrow$ Velocidad de la luz (299 792 458 m/s)

Por lo tanto, la pérdida por trayectoria en el espacio libre L_0 se define como:

$$L_{0[dB]} = 32,44 + 20\log(d_{[km]}) + 20\log(f_{[MHz]}) \quad (2.6)$$

Tomando el modelo del decaimiento de potencia promedio con la distancia a_{pd} :

$$L_{p[dB]} = L_{ref} + 10a_{pd}\log(d_{[km]}) \quad (2.7)$$

$a_{pd} = 2$, para una propagacion en el espacio libre

El a_{pd} (también conocido como PLE) es un valor que va de 2 a 4 frecuentemente. El valor mínimo (i.e. 2) proviene de la perdida FSPL y el máximo (i.e. 4) por la pérdida del modelo *Flat Earth* (modelo de tierra plana). En algunos modelos se llega a incluir valores de PLE más altos que los aquí definidos.

2.2.3. Caracterización del canal de radio

Usualmente en ambientes urbanos no hay línea de vista (LoS) entre la estación base (BS) y la terminal móvil (MT¹) [véase Figura 2.2] por lo que la transmisión es realizada por reflexión, difracción y dispersión de las señales.

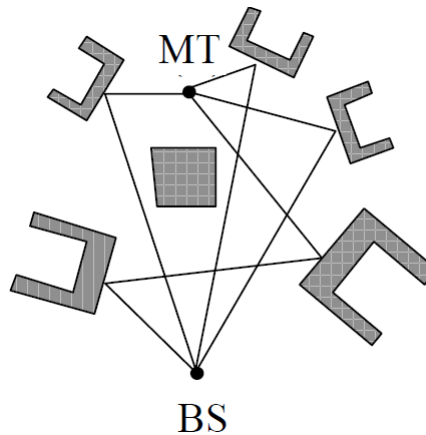


FIGURA 2.2: Propagación de señales celulares en ambientes urbanos, [Fuente: L. Correia 2018]

Sin embargo estas señales sufren de desvanecimiento con caídas de potencia. Este desvanecimiento depende de la posición y el ambiente del cual se propague la señal.

Características de desvanecimiento:

- Desvanecimiento lento: Depende esencialmente de la distancia, sigue una distribución Log-normal
- Desvanecimiento rápido: Es asociado al movimiento del usuario, sigue una distribución Rice

En la Figura 2.3 se observa que al principio, la señal parece muy aleatoria. Mirando más de cerca podemos dividirlo en tres componentes principales como se muestra en la mitad derecha de la Figura 2.3 (Mathuranathan, 2016).

1. Pérdida por trayectoria (*Path loss*)
2. *Shadowing* (Sombreado) o desvanecimiento lento

¹MT y UE son términos análogos.

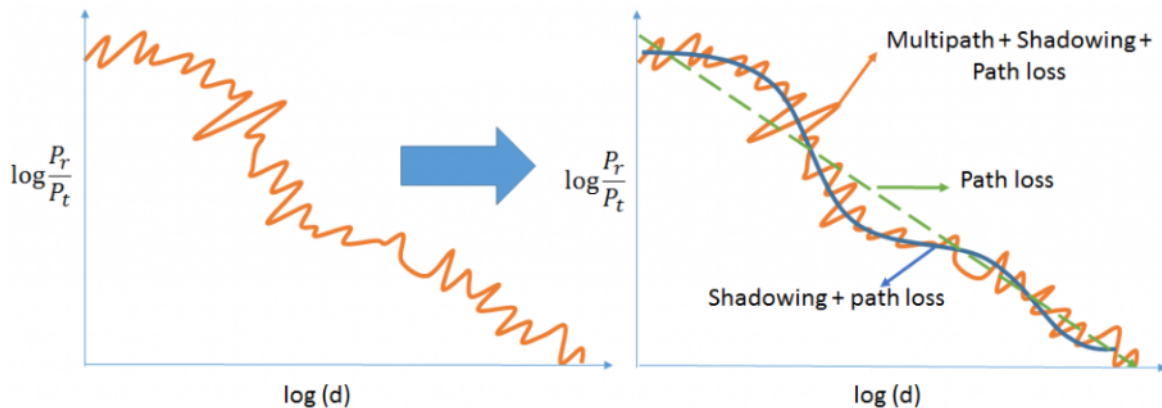


FIGURA 2.3: Ejemplo de niveles de señal con desvanecimiento lento y desvanecimiento rápido, [Fuente: V. Mathuranathan, 2016]

3. Desvanecimiento multitrayectoria o desvanecimiento rápido.

El desvanecimiento lento puede ser causado por eventos como el *shadowing*, donde una gran obstrucción, como una colina o un gran edificio, oscurece la trayectoria de la señal principal entre el transmisor y el receptor. Se considera un parámetro a gran escala.

El desvanecimiento rápido ocurre cuando la amplitud y el cambio de fase impuestos por el canal varían considerablemente durante el período de uso. Una señal que viaja en un entorno puede verse reflejada por varios objetos en el camino. Esto da lugar a varias señales reflejadas. Las señales reflejadas llegan al receptor en diferentes instantes de tiempo y con diferentes intensidades que conducen a la propagación multitrayectoria. Se considera un parámetro a pequeña escala.

Los márgenes de desvanecimiento deben tomarse en cuenta para caracterizar la variación de las señales alrededor de un valor promedio, esto depende de:

- Características del ambiente (LoS)
- QoS

Para *narrowband* (banda estrecha, donde prevalece el desvanecimiento plano en lugar de un desvanecimiento selectivo de frecuencia) el desvanecimiento se caracteriza de la siguiente manera:

- Desvanecimiento rápido:
 - LoS: Distribución Rice (no intenso)
 - NLoS: Distribución Rayleigh (intenso)
- Desvanecimiento lento:

- Distribución Log-Normal
- Ambos desvanecimiento rápido y lento:
 - Distribución Susuki

Los modelos de estimación de señal pueden ser divididos en dos categorías:

1. Teóricos: Son una aproximación a la realidad, no toman en cuenta todos los factores de la propagación pero permiten cambios fáciles de los parámetros.
 - Ray Tracing
 - Modelo Ikegami [1984]
 - Modelo Walfish-Bertoni [1988]
2. Empíricos: Están basados en la observación de mediciones, conduciendo al mejor ajuste de ecuaciones. Tienen la ventaja de tomar en cuenta todos los factores que influyen en la propagación.

Para ambientes exteriores hay dos modelos básicos:

- COST 231 Okumura-Hata
 - Largas distancias ($>5\text{km}$)
 - Ambientes rurales, urbanos y suburbanos
 - Alta desviación estándar
 - Rango de frecuencias aplicables [1.5, 2.0] GHz
- COST 231 Walfish-Ikegami [1999]
 - Cortas distancias ($<5\text{km}$)
 - Ambientes urbanos y suburbanos
 - Rango de frecuencias aplicables [0.8, 2.0] GHz
- COST 207 [1989]

2.3. GEOMETRÍA CLÁSICA CELULAR

Los sistemas celulares brindan una determinada cobertura para un servicio, dividiendo el área geográfica en segmentos llamados celdas donde el espectro de frecuencia también es dividido en canales y estos son agrupados para repartirse entre las celdas. Estos sistemas logran una alta capacidad gracias al reuso del canal de comunicación permitiendo a las estaciones base compartir los canales, sin embargo, este reuso da como resultado una interferencia co-canal generada solamente entre usuarios que comparten el mismo canal, lo cual limita el rendimiento y capacidad de un sistema celular

dado que los efectos de esta interferencia son altamente dependientes con los aspectos del sistema (Tranter y col., 2003) como lo son el tipo de acceso múltiple del sistema, el número de usuarios compartiendo el canal, el canal de propagación, la pérdida por trayectoria, el desvanecimiento, entre otros.

- Ser limitados por la interferencia (capacidad).
- Servir a una alta densidad de usuarios.
- Considerar la disponibilidad del espectro solo como un factor limitante.
- Reúso de frecuencias.
- Uso de Estaciones Base de baja potencia.
- Tener celdas de distintas coberturas.
- Permitir *handover*.

2.3.1. Planeación Celular

Una buena planeación celular es de crucial importancia para lograr un buen rendimiento del sistema y la provisión de una buena Calidad de servicio (QoS).

La planeación celular consiste en:

- Colocación de BSs y establecimiento de coberturas
- Optima administración de recursos de radio.
- Minimización de interferencia.

La planeación celular se desempeña de acuerdo a:

- Morfología del área de servicio y modelos de propagación.
- Perfiles de usuario y modelos de tráfico.

Considerando:

$R \rightarrow$ Radio de cobertura de la celda

$D_r \rightarrow$ Distancia de reuso de celda co_canal

$d_u \rightarrow$ Distancia unitaria entre los centros de dos celdas adjacentes

$$d_u = \sqrt{3}R$$

Llegando a una distancia de reuso normalizada D_n

$$D_n = i^2 + ij + j^2, \text{ donde } : i! = 0, j! = 0 \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow D_r = D_n d_u \quad (2.9)$$

área de una celda S_{cel}

$$S_{cel} = (3\sqrt{3}/2)R^2 \quad (2.10)$$

área de un cluster S_{clu}

$$S_{clu} = (3\sqrt{3}/2)D_n^2 d_u^2 \quad (2.11)$$

Numero de celdas por cluster, N_{cc} ó también conocido como “factor de reuso”

$$N_{cc} = \frac{S_{clu}}{S_{cel}} \quad (2.12)$$

Siendo valores posibles para N_{cc} , 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, ... [Véase Figura 2.4 y Figura 2.5]

Para implementar el reúso, se deben asignar un conjunto de canales disponibles para un grupo de celdas, el clúster y repetir ese conjunto a través de toda el área de servicio.

$$N_{ch/c} = \frac{N_{ch/s}}{N_{cc}} \quad (2.13)$$

$N_{ch/c} \rightarrow$ Numero de canales por celda

$N_{ch/s} \rightarrow$ Numero de canales en el sistema

$N_{cc} \rightarrow$ Numero de celdas por cluster

La relación de reutilización co-canal, r_{cc} es usada para caracterizar clústeres

$$r_{cc} = \frac{D_r}{R} = \sqrt{3N_{cc}} \quad (2.14)$$

Un valor grande de r_{cc} corresponde a:

1. Una baja interferencia co-canal
2. Baja capacidad del sistema

El clúster es escogido lo más pequeño posible tomando los umbrales de interferencia en consideración (Correia, 2018).

$$GSM, N_{cc} = 4$$

$$UMTS, N_{cc} = 1$$

$$LTE, N_{cc} = 3$$

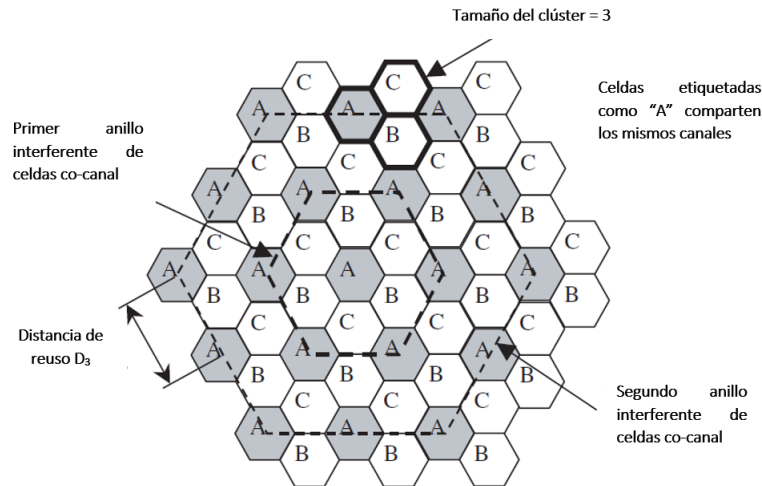


FIGURA 2.4: Clusterización de celdas con un factor de reuso de 3 celdas, [Fuente: Tranter 2003]

Diferentes tamaños de celda son usadas para distribuciones no uniformes de tráfico (Al-turjman, Ever y Zahmatkesh, 2018).

El uso de diferentes tamaños de celdas:

- Conduce a un incremento de interferencia, debido a la poca uniformidad en la estructura celular.
- Requiere cuidado adicional en el despliegue de BSs

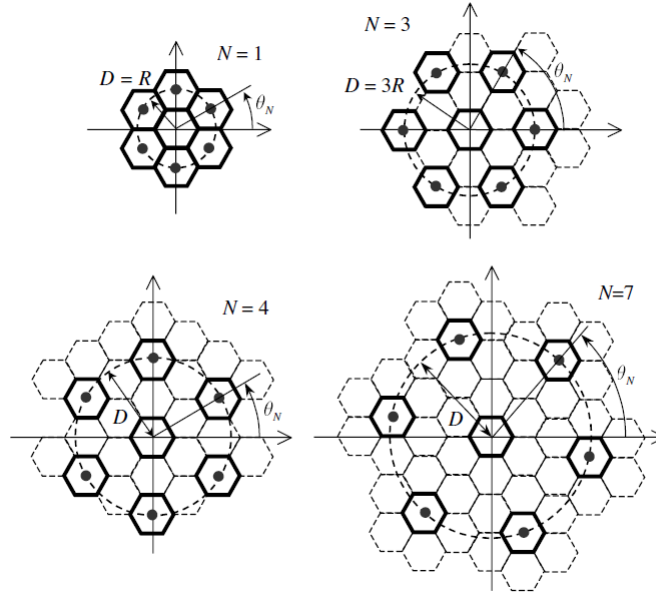


FIGURA 2.5: Localización de celdas co-canal con distintos factores de reúso, [Fuente: Tranter 2003]

2.3.2. Planeación de frecuencia

La decisión de bandas de frecuencia para ser usadas en los diversos sistemas de comunicaciones es decidida por la ITU. La asignación de canales en una banda dada para un operador es decidido a nivel nacional por un cuerpo regulatorio, IFT en México. El hecho de que el espectro es muy escaso incita a un eficiente uso de frecuencias.

El número de frecuencias (portadoras, canales de radio) por celda N_{fc} depende del clúster, N_{cc} , y del número de frecuencias en el sistema N_{fs}

$$N_{fc} = N_{fs} / N_{cc} \quad (2.15)$$

Debido a la limitación en el número de frecuencias, debe haber una compensación entre la interferencia N_{cc} y la capacidad $N_{ch/c}$ en el sistema.

La asignación de frecuencias de las celdas debería reducir la interferencia de celdas adyacente maximizando la separación de las frecuencias en una celda.

En un simple sistema celular, las frecuencias deberían ser asignadas a las celdas de acuerdo a:

$$f_{ij} = i + N_{cc} (j - 1) \quad (2.16)$$

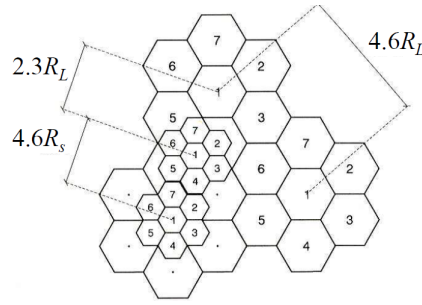


FIGURA 2.6: Sistema celular con celdas de tamaño no uniforme, [Fuente: Yacoub 1993]

$$i = 1, \dots, N_{cc}$$

$$j = 1, \dots, N_{fc}$$

Cuando N_{sc} sectores por celdas son implementados, cada sector deberá contener su propio grupo de frecuencias:

$$f_{ijk} = i + N_{cc} (k - 1) + N_{cc} N_{sc} (j - 1) \quad (2.17)$$

$$i = 1, \dots, N_{cc}$$

$$j = 1, \dots, N_{fc}$$

$$k = 1, \dots, N_{sc}$$

2.4. INTERFERENCIA EN SISTEMAS CELULARES

En general el receptor recibe:

$$\text{SNIR} = \frac{S}{I + N} \quad (2.18)$$

Donde:

$S \rightarrow$ Potencia de portadora de la señal deseada

$I \rightarrow$ Potencia de las portadoras de las señales interferentes

$N \rightarrow \text{Potencia del ruido}$

Los sistemas de comunicaciones móviles se caracterizan por ser sistemas limitados por interferencia, donde I domina sobre N, por lo tanto la participación del ruido N puede ser ignorada (Correia, 2018).

Quedando entonces como la relación portadora a interferencia:

$$\frac{S}{I + N} \cong \frac{S}{I} \rightarrow SIR \quad (2.19)$$

La interferencia co-canal I_{cc} es un problema aceptado en los sistemas de comunicaciones móviles.

La estimación de la relación portadora a interferencia co-canal S/I_{cc} es calculada de acuerdo a las siguientes asunciones:

1. Todas las celdas son del mismo tamaño
2. La potencia radiada por todas las BSs son iguales
3. Todas las BSs tienen antenas omnidireccionales
4. El decaimiento de la potencia promedio (a_{pd}) con la distancia es de la forma:

$$P_r = P_0(d/d_0)^{-a_{pd}} \quad (2.20)$$

En un sistema celular en general, la interferencia co-canal es calculada tomando la interferencia de todas las celdas N_{Icc}

$$\frac{S}{I_{cc}} = \frac{S}{\sum_{k=1}^{N_{Icc}} I_k} \quad (2.21)$$

Usualmente la interferencia puede ser estimada por tomar únicamente el primer anillo de interferencia (Correia, 2018).

$$\frac{S}{I_{cc}} = \frac{S}{\sum_{k=1}^6 I_k} \quad (2.22)$$

Para el caso de transmisión de bajada *downlink* para un usuario en los límites de la celda, el cálculo de la interferencia co-canal se puede aproximar a:

$$\frac{S}{I_{cc}} = \frac{R^{-a_{pd}}}{2(D_r - R)^{-a_{pd}} + 2(D_r)^{-a_{pd}} + 2(D_r + R)^{-a_{pd}}} \quad (2.23)$$

Donde:

R : radio de cobertura de la celda

D_r : distancia de reuso de celda co-canal

La interferencia puede disminuir (Correia, 2018):

- implementando celdas sectorizadas.
- *downtilting* el lóbulo principal de la antena de la BS.
- bajando la altura de la BS
- optimizando la localización de la BS
- implementando control de potencia
- implementando *frequency hopping*

En resumen, la planeación de una red celular de radio es ejecutada de la siguiente manera:

1. El mínimo valor para la relación portadora a interferencia impone el tamaño del clúster.
2. Se estima el tráfico en una celda determinada.
3. Se calcula el número de canales para una calidad de servicio determinada.
4. En caso de que el número de canales disponibles no sea suficiente, el tráfico se reducirá, es decir, la cobertura se reducirá.
5. Se establece el plan de frecuencias y la estructura del despliegue de celdas.
6. Cuando se propone una estructura de celdas no uniforme, los canales deberán ser distribuidos de acuerdo a las necesidades de capacidad, y a los valores tope permitidos de interferencias co- canal y canal-adyacente.

2.5. CAPACIDAD EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES

La teoría de la información de Shannon nos dice la cantidad de información que un canal puede transportar. En otras palabras, especifica la capacidad del canal. La capacidad de un sistema de comunicación es la velocidad de datos máxima en bits por segundo que se puede transferir de manera confiable del transmisor al receptor. En el

sentido estricto de la teoría de la información, este es un límite superior insuperable que, en la práctica, solo se puede abordar. En un único enlace Tx-Rx de ancho de banda de unidad sujeto a AWGN, la capacidad en bits por uso de canal (es decir, bps / Hz) viene dada por la fórmula de *Shannon-Hartley*:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ [bps]} \quad (2.24)$$

B es el ancho de banda del canal en Hertzios.

C es la capacidad del canal (tasa de bits de información bit / s)

S es la potencia de la señal útil (W, mW, etc.)

N es la potencia del ruido presente en el canal, (W, mW, etc.), que trata de enmascarar a la señal útil.

2.6. INTERFAZ DE RADIO

Los canales de transmisión dirigidos desde la BS a MT son referidos como canal *down-link* y los dirigidos desde el MT a la BS como canales *uplink*, estos canales juntos se identifican como canales “dúplex”. La transmisión bidireccional de la información en sistemas dúplex puede dividirse en (Correia, 2018):

1. Frecuencia: Donde los canales UL y DL ocupan diferentes bandas de frecuencia - FDD (*Frequency Division Multiplexing*).
2. Tiempo: Donde los canales UL y DL ocupan diferentes ventanas de tiempo- TDD (*Time Division Multiplexing*).

FDD se caracteriza por:

- Cuando es utilizada una división “dúplex” de frecuencia FDD estos canales son transmitidos en diferentes frecuencias
- Permitir transmisión simultánea en ambos caminos
- Requieren filtros con un buen rechazo en la banda adyacente
- Requieren en general el uso de filtros dúplex

TDD se caracteriza por:

- Cuando se usa una división “dúplex” de tiempo TDD los canales son transmitidos en la misma frecuencia pero utilizando diferentes ranuras de tiempo.
- Permitir transmisión secuencial en ambos caminos

- Requiere sincronización
- No requieren uso de filtros dúplex

El uso de una técnica de división dúplex puede depender de la técnica de acceso múltiple utilizada para el sistema.

2.6.1. Esquemas de Acceso Múltiple al Medio

Las técnicas de acceso múltiple (MA) generalmente se pueden dividir en enfoques ortogonales y no ortogonales (Tse y Viswanath, 2004). En MA ortogonal (OMA), los recursos de radio se dividen ortogonalmente entre dispositivos, donde las señales de diferentes dispositivos no se superponen entre sí. Las instancias de OMA son acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA), y FDMA de portadora única (SC-FDMA).

Los enfoques OMA no tienen la capacidad de combatir la interferencia entre células (Shirvanimoghaddam y col., 2017); por lo tanto, se requieren técnicas cuidadosas de planificación celular y gestión de interferencia para resolver este problema.

Existen 4 técnicas básicas de acceso múltiple:

1. frecuencia: asignación de una portadora - FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia)
2. tiempo: asignación de un intervalo de tiempo - TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo)
3. código: asignación de un código - CDMA (Acceso múltiple por división de código)
4. frecuencia ortogonal: asignación de un conjunto de sub-portadoras - OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal).

En muchos sistemas prácticos, se utiliza una mezcla o combinación de estas técnicas básicas (Correia, 2018).

2.6.2. Generaciones anteriores de sistemas de comunicaciones móviles

La generación 1G fue la primera generación de tecnología celular inalámbrica. 1G se introdujo en la década de 1980. Las señales de radio utilizadas por la red 1G fueron

analógicas y proporcionaba comunicación solo por voz, alcanzaba una velocidad de 2.4 Kbps. La técnica de acceso múltiple utilizada en 1G es el acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) (Nair, Gupta y Srinivas, 2018). Esta generación utiliza el método de conmutación de circuitos para la transmisión de datos.

Las redes celulares 2G de segunda generación fueron lanzadas comercialmente en el estándar GSM en Finlandia 1991 (Nair, Gupta y Srinivas, 2018). 2G utilizó el método de conmutación de paquetes para la transmisión de datos y habilitó el cifrado digital de la conversación por teléfono, además proporcionaron servicios multimedia como SMS (Servicios de mensajes cortos) MMS (Servicios de mensajes multimedia) y las velocidades de descarga y carga fueron de hasta 236 Kbps. Se utilizó el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), como el número de usuarios aumentó con el tiempo, TDMA se volvió obsoleto por causar una velocidad más baja para cada usuario.

3G (conocida también como UMTS) fue la tercera generación de tecnología inalámbrica de telecomunicaciones móviles y utilizó el acceso múltiple por división de código de secuencia directa (DS-CDMA) (Nair, Gupta y Srinivas, 2018). Las redes 3G ofrecieron velocidades de 3.1 megabits por segundo (Mbps) o más y se instalaron por primera vez en 1998. La aplicación del concepto 3G se encuentra en telefonía inalámbrica, acceso a Internet móvil, acceso a Internet inalámbrico, llamadas de conferencia y TV portátil.

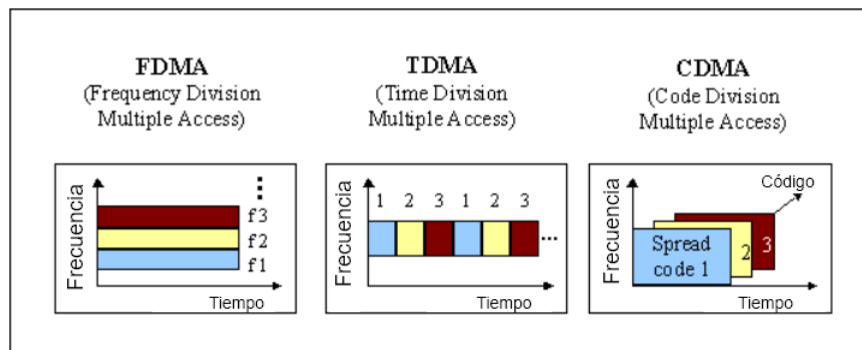


FIGURA 2.7: Diferentes tipos de acceso múltiple al medio ocupados en generaciones anteriores (1G, 2G y 3G), [Fuente: <https://www.itu.int/osg/spuold/ni/3g/technology/index.html>]

4G (conocida también como LTE) es el término utilizado para describir la cuarta generación de servicio celular inalámbrico y es el estándar actual del servicio celular. Es hasta 10 veces más rápido que los servicios 3G. Sprint fue el primer operador en ofrecer velocidades 4G en los EE. UU. a partir de 2009. Las redes 4G pueden ofrecer velocidades de descarga entre 5 y 12 Mbps y velocidades de carga entre 2 y 5 Mbps, lo que finalmente da una velocidad máxima de 50Mbps. El sistema de comunicación celular 4G

utiliza una versión avanzada del esquema FDMA, es decir, OFDMA (acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal) (Nair, Gupta y Srinivas, 2018).

2.7. TELETRÁFICO

Conceptos básicos:

1. Tráfico: Es el acumulado de peticiones de servicio de todos los usuarios atendidos por la red o por una parte de ella.
2. Recurso o servidor: medio físico, usualmente sólo es capaz de atender un solo servicio.
3. Sistema de colas: conjunto de servidores de uso compartido.

2.7.1. Caracterización del Tráfico

Para caracterizar el tráfico se deben definir previamente los siguientes conceptos:

1. Volumen de Tráfico Cursado. Suma de la duración de todos los servicios atendidos por el sistema.
2. Intensidad de Tráfico Cursado u Ocupación promedio de recursos (a'). Número promedio de servicios atendidos simultáneamente. Se puede obtener mediante dividir el volumen de tráfico cursado entre el tiempo que tomó cursar dicho volumen. También se puede interpretar como el número promedio de servidores ocupados.
3. Intensidad de Tráfico Ofrecido (a). Número promedio de servicios atendidos simultáneamente, si todas las peticiones fueran atendidas.

Suponiendo un sistema que es capaz de atender todas las peticiones de servicio y al que arriban λ peticiones/segundo. Esto implica que en un intervalo T segundos se recibirían $\lambda \cdot T$ peticiones de servicio. Si la duración promedio de estos servicios es μ segundos, entonces el volumen de tráfico ofrecido (y en este caso también cursado) es $\lambda \cdot \mu \cdot T$ y la intensidad de tráfico ofrecido se reduce a:

$$a = \lambda \cdot \mu$$

Para un sistema que atiende todas las peticiones el tráfico cursado y el ofrecido son iguales, sin embargo, cuando se analizan sistemas que no cumplan esta característica, a se vuelve un valor hipotético (la intensidad de tráfico cursado, si todas las peticiones se atendieran), sin embargo, seguirá describiendo la intensidad del tráfico que se ofrece. Es importante mencionar que el desempeño de un sistema (en términos de algún parámetro de calidad de servicio) no va a depender del valor de λ o de μ por sí solos, sino

del producto de ellos. Por ejemplo, un sistema se puede saturar tanto por una alta tasa de arribos como por una gran duración del tiempo de servicio.

Hasta este punto el tráfico sólo se ha caracterizado en término de dos valores promedio: la tasa de arribos (λ) y la duración promedio de los servicios (μ). Estos parámetros representan información parcial de dos variables aleatorias, el tiempo entre arribos (TEA) y el tiempo duración de servicio (TDS). Estos tiempos por su carácter aleatorio en muchos análisis se modelan como variables aleatorias. El tipo de comportamiento aleatorio en las tasas se establece al de una distribución exponencial negativa (Carter, Gnendenko y Kovalenko, 1990). La tasa de arribos corresponde una distribución como sigue:

$$f(y) = \lambda e^{-\lambda y} \cdot u(y) \quad (2.25)$$

La duración promedio de servicios corresponde a:

$$f(y) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{1}{\mu} y} \cdot u(y) \quad (2.26)$$

Es necesario establecer fórmulas que relacionen a la cantidad de recursos y el tráfico ofrecido con los parámetros de calidad de servicio, se requiere como paso intermedio determinar la probabilidad de que el sistema se encuentre en determinado estado.

Se considera que el sistema está en estado j , si la suma de los servicios que están siendo atendidos más los servicios en espera es j .

Una técnica que simplifica significativamente el cálculo de las probabilidades de estado es el uso de cadenas de Markov, sin embargo, la solución mediante este método implica el análisis del sistema exclusivamente en el dominio de las probabilidades, por lo que las probabilidades de estado no tienen dependencia del tiempo. Esta independencia del tiempo se consigue sólo si:

1. El sistema se analiza en estado estable, es decir, si el sistema ha estado operando por un intervalo de tiempo lo suficientemente grande, de modo que ya no depende de las condiciones iniciales.
2. Si la probabilidad de que el sistema cambie de estado no depende de cuánto tiempo haya permanecido en el estado actual.

La segunda condición sólo se puede cumplir si las distribuciones del TEA y del TDS son exponenciales negativas (Carter, Gnendenko y Kovalenko, 1990).

Si el número de servidores que posee un sistema es menor a la cantidad de fuentes que generan el tráfico, y se entiende como fuentes de tráfico a los posibles usuarios, resulta

imposible atender a todas las peticiones de servicio de forma instantánea. Básicamente se puede proceder de 2 formas con aquellas llamadas que hallen al sistema saturado:

1. Negarles el servicio. Se tiene un sistema con bloqueo o con pérdidas.
2. Mantenerlas en espera y asignarles servidores cuando sean liberados. Se tiene un sistema con retardo.

En el modelado de los sistemas con bloqueo también se debe tomar en cuenta que sucede con las llamadas que no son atendidas y dependiendo de la naturaleza del servicio analizado se puede considerar que las llamadas bloqueadas regresan al sistema en forma de reintentos o bien son eliminadas en forma definitiva.

Otra consideración de suma importancia en el sistema de colas es tomar en cuenta que tan grande es la cantidad de posibles fuentes de tráfico en comparación con la cantidad de recursos; cuando la cantidad de fuentes es muy grande se puede aproximar con infinito y los análisis se simplifican considerablemente.

También es importante mencionar que hay sistemas en los que las peticiones pueden experimentar bloqueo o retardo. Además de las consideraciones previas: la distribución del TEA y del TDS, la cantidad de recursos y el tamaño de la cola de espera son parámetros que influyen en el desempeño de un sistema.

2.7.2. Notación Kendall

Para describir a un sistema mediante estos parámetros se puede usar la notación de Kendall, la cual se expresa de la forma: $c1/c2/s/K$

Donde:

1. **c1** representa la distribución del TEA y pueden asignársele las letras M (arribos Markovianos, es decir distribución exponencial negativa) o G (General, es decir cualquier otra distribución).
2. **c2** es la distribución del TDS y puede ser M (exponencial negativa), D (Determinístico, es decir el TDS es constante) o G (general).
3. **s** es el número de servidores.
4. **K** es la longitud de la cola de espera.

Se refiere como λ a la tasa de arribos generada por todas las fuentes de tráfico y se denotó anteriormente μ a la duración promedio de un servicio. El inverso de dicho tiempo se considera la tasa a la que finaliza un servicio en curso. En caso de que existan j servicios en curso la tasa a la que finalizan las llamadas es j/μ . Esta fórmula concuerda

con el hecho de que a medida que hay más servicios en curso, menos tiempo se tiene que esperar a que alguno de ellas finalice, es decir, la tasa de finalización se incrementa. La probabilidad de bloqueo está dada por:

$$P_j = \frac{\frac{(\lambda\mu)^j}{j!}}{\sum_{k=0}^s \frac{(\lambda\mu)^k}{k!}} \quad (2.27)$$

De todas las probabilidades de estado, P_s tiene particular importancia, ya que representa la probabilidad de que el sistema esté saturado, en otras palabras, la probabilidad de bloqueo:

$$P_s = \frac{\frac{a^s}{s!}}{\sum_{k=0}^s \frac{a^{(k)}}{k!}} \quad (2.28)$$

La Ecuación 2.29 fue desarrollada originalmente por el danés A. K. Erlang, por lo que es comúnmente conocida como fórmula de **Erlang-B**.

Notese que en la Ecuación 2.28 el producto $\lambda^*\mu$ se puede sustituir por a , el tráfico ofrecido, y con esto se corrobora que la calidad del servicio (en este caso la probabilidad de bloqueo) no depende de λ o de μ por si solos, sino de su producto.

2.8. SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS

Una simulación es casi siempre la imitación de algún proceso o sistema que toma o podría tomar lugar en el mundo real, implementada utilizando un paradigma de programación y ejecutada por computadoras. Para realizarse esta, debe tenerse en cuenta un previo estudio del sistema real o de algún modelo o modelos existentes, junto con un análisis detallado de las variables presentes, además es necesario hacer distintas suposiciones al estar el estándar aún en desarrollo. Todo esto para permitir una simulación que simplifique el sistema, pero aun siendo capaz de generar resultados que puedan ayudar a su caracterización y a ser dimensionado.

En (Banks y Carson, 2005) se describe a un sistema discreto como: “[...] *aquel en el cual las variables de estado cambian únicamente en un número discreto de instantes en el tiempo*”. Por lo que la simulación de eventos discretos es la implementación en hardware de un sistema en el que sus variables de estado cambian de tal forma con el arribo de eventos, los cuales se tratan de ocurrencias que se presentan de forma instantánea y cuentan con un nacimiento y una muerte.

En cuanto a un evento o proceso estocástico, tenemos la siguiente definición (Correia, 2018):

Definición: Un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias $X_t : t \in T$ parametrizada por un conjunto T , llamado espacio parametral, en donde las variables toman valores en un conjunto S llamado espacio de estados.

En los casos más sencillos se toma como espacio parametral al conjunto discreto

$T = [0, 1, 2, \dots]$ y estos números se interpretan como tiempos. En este caso se dice que el proceso es a tiempo discreto, y en general este tipo de procesos se denotara por $[X_n: n = 0, 1, \dots]$

2.9. SIMULACIONES A NIVEL DE SISTEMA

Debido a las complicadas estructuras de los sistemas de comunicación celular móvil, no podemos describirlos completamente a través de un modelo matemático simple y abstracto. Por lo tanto, siempre recurrimos a la simulación para evaluar su rendimiento. La simulación a nivel de sistema se ha utilizado ampliamente para evaluar el rendimiento integral de diferentes sistemas celulares móviles (Chen y col., 2011). Los programas de computadora se utilizan para simular los mecanismos operativos de los sistemas móviles de comunicación celular, los tráficos cargados, etc. El rendimiento de estos sistemas se puede reflejar en última instancia por los resultados obtenidos de los programas de simulación.

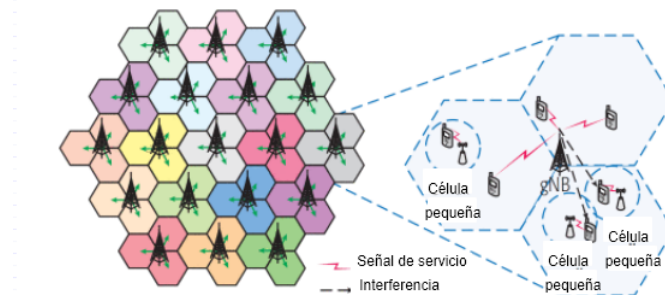


FIGURA 2.8: El diseño usual de una red celular en simulaciones a nivel de sistema

El escenario para la simulación a nivel de sistema generalmente consiste en una red con múltiples BS y MS [véase Figura 2.8]. A diferencia de la simulación a nivel de enlace, la simulación a nivel de sistema se centra en las métricas de rendimiento de la capa de aplicación expresadas por el rendimiento del sistema, la imparcialidad del usuario, la calidad de servicio percibida por el usuario (QoS), el retraso de la transferencia o la tasa de éxito, etc.

2.10. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN PARA SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS (DES)

Considerando solo los lenguajes de código abierto, tenemos a *JAVA* (*DESMO-J* y *Ptolemy I*), *Python* (*Simpy*) y *C++* (*SystemC* y *PowerDEVS*) como los lenguajes más conocidos y de entre estos sobresalen *Simpy* (*Python*) y *SystemC* (*C++*) como los que han tenido más soporte y actualización (2018), lo cual será un factor importante al elegir el lenguaje.

Simpy es una librería basada en procesos, se pueden definir diferentes entornos, todos los procesos interactúan mediante eventos con el mismo entorno y entre ellos. Durante su estancia, los procesos crean eventos y producen nuevos eventos para esperar a que se activen. Cuando un proceso produce un evento, el proceso se suspende, *SimPy* reanuda el proceso, cuando ocurre el evento. Varios procesos pueden esperar el mismo evento, *SimPy* los reanuda en el mismo orden en que dieron lugar a ese evento (*Descripción general: documentación de SimPy 3.0.11 2019*). Además proporciona varios tipos de recursos compartidos para modelar puntos de congestión de capacidad limitada (p. ej. servidores).

La documentación de *SimPy* contiene tutoriales, guías detalladas y una gran cantidad de ejemplos (*Descripción general: documentación de SimPy 3.0.11 2019*). *SimPy* se lanza como software de código abierto bajo la licencia del MIT. La primera versión fue lanzada en diciembre de 2002 y hoy en día su última versión estable es la 3.0.11 / 16 de noviembre de 2018.

Python es un lenguaje de programación dinámico de alto nivel, interpretado y de propósito general que se enfoca en la legibilidad del código. La sintaxis en *Python* ayuda a los programadores a codificar en menos pasos en comparación con *Java* o *C++* (*Ventajas y desventajas del lenguaje de programación Python 2019*). *Python* es ampliamente utilizado en organizaciones más grandes debido a sus múltiples paradigmas de programación. Usualmente involucran programación funcional imperativa y orientada a objetos.

Ventajas o beneficios de *Python* (*Ventajas y desventajas del lenguaje de programación Python 2019*):

1. Amplias librerías de soporte
2. Característica de integración
3. Productividad mejorada del programador

Limitaciones o desventajas de *Python*:

1. Lenguaje interpretado: se ralentiza en velocidad: Python se ejecuta con la ayuda de un intérprete en lugar del compilador, lo que hace que se ralentice porque la compilación y la ejecución ayudan a que funcione normalmente.

El mecanismo que degrada el desempeño de CPython es la ejecución de bytecode por varios hilos a la vez, conocido como *Global Interpreter Lock* o GIL, es un mecanismo utilizado en intérpretes de lenguaje de computadora para sincronizar la ejecución de subprocesos para que solo un subproceso nativo pueda ejecutarse a la vez. Un intérprete que usa GIL siempre permite que se ejecute exactamente un subproceso a la vez, incluso si se ejecuta en un procesador multinúcleo.

Afortunadamente existen métodos para evitar este comportamiento del interpretador, haciendo que se usen todos los núcleos del PC con ayuda de la librería *multiprocessing* (*multiprocessing — Process-based parallelism — Python 3.8.0 documentation* 2019).

2.11. ORGANISMOS INTERNACIONALES DE ESTANDARIZACIÓN

Para la creación de estándares de las redes de nueva generación, existen más que en otras ocasiones, organizaciones desarrolladoras de estándares de telecomunicaciones (TSDOs) (3GPP, 2019), lo que significa que hay muchas partes que debieran moverse en armonía. Estas organizaciones comparten entre sí: sus recomendaciones, artículos, especificaciones, estándares, presentaciones, visiones y demás.

Uno de los TSDO más importantes que han contribuido a definir el funcionamiento de redes móviles como por ejemplo UMTS, LTE, NB-IoT entre otros, es el Proyecto de Asociación de 3ra Generación (3GPP), el cual unifica a siete organizaciones internacionales de desarrollo de estándares de telecomunicaciones (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), conocidas en conjunto como "Socios Organizacionales". 3GPP proporciona a sus miembros un entorno estable para producir los Informes y Especificaciones que definen las tecnologías 3GPP (3GPP, 2019). El proyecto cubre tecnologías de telecomunicaciones celulares, incluyendo acceso de radio, red central y capacidades de servicio, que proporcionan una descripción completa del sistema para comunicaciones móviles.

Además, los socios organizacionales de 3GPP pueden invitar a un socio de representación del mercado a participar en 3GPP, con el fin de ofrecer asesoramiento de mercado a 3GPP y traer a 3GPP una visión consensuada de los requisitos del mercado [véase Figura 2.9].

Los tres grupos de especificaciones técnicas (TSG, *Technical Specifications Group*) de 3GPP, quienes cada determinado tiempo liberan *releases* (lanzamientos) en los cuales especifican estándares (3GPP, 2019), son:

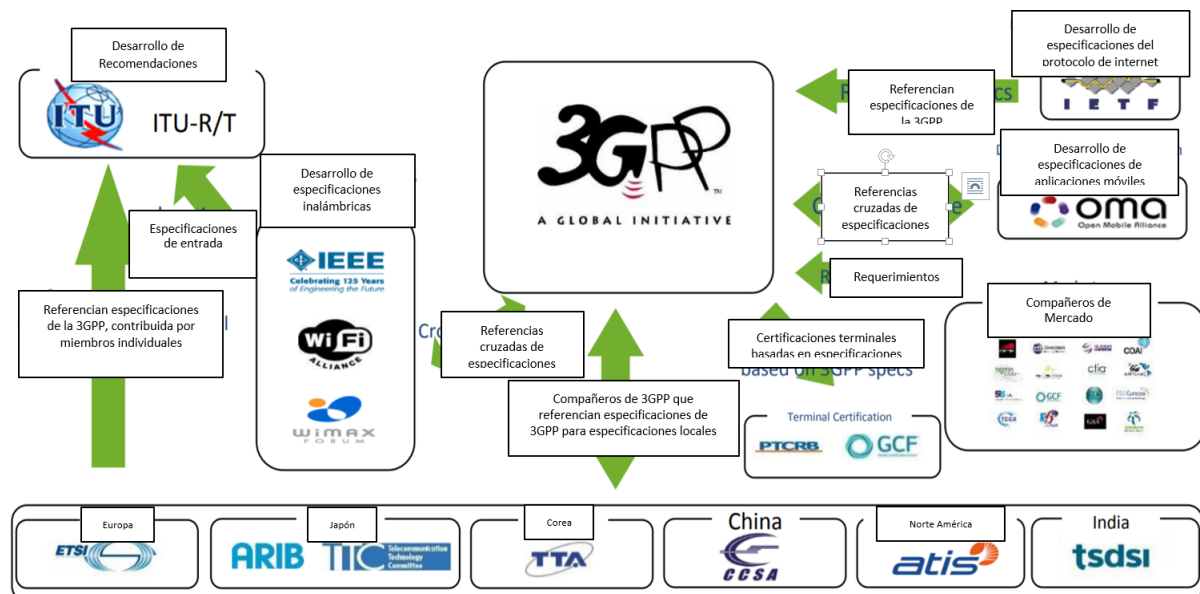


FIGURA 2.9: Socios Internacionales con los que colabora la 3GPP, [Fuente: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/partners>]

1. Redes de acceso por radio (RAN).
2. Servicios y aspectos de sistemas (SA).
3. Red central y terminales (CT).

Capítulo 3

Estado del Arte

3.1.

3.2.

TODO: ACTUALIZAR estado del arte de acuerdo a los articulos que si tomamos en consideración

TODO: Faltan palabras en ingles en italias en este capitulo

Capítulo 4

Análisis

4.1. RED 5G

4.2. INTERNET DE LAS COSAS (IoT)

4.3. CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ÁMBITOS DE IoT

4.3.1. Ciudades inteligentes (*Smart City*):

4.3.2. Ambiente inteligente (*Smart Environment*)

4.3.3. Energía inteligente (*Smart Energy*):

4.3.4. Transporte y movilidad inteligentes (*Smart Transport and Mobility*):

4.4. CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO A IMPLEMENTAR

4.4.1. Análisis de las aplicaciones de IoT y selección de casos considerados

4.4.2. Análisis de las tecnologías para IoT y selección de casos considerados

4.4.3. Análisis del estándar NB-IoT

4.5. INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPIs)

4.6. ANÁLISIS DE MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE REDES 5G/IoT

4.6.1. MODELO DE DESPLIEGUE DE BSs Y UEs

4.6.2. MODELO DE CANAL

Capítulo 5

Diseño

5.1. MODELO DE SISTEMA PROPUESTO

5.2. RESULTADOS A OBTENER

5.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

5.4. DEFINICIÓN DE EVENTOS

5.5. DIAGRAMAS DE FLUJO

5.6.

5.7.

5.8.

TODO: Agregar nuevos diagramas de acuerdo con la simulación

TODO: Faltan palabras en ingles en italias en este capitulo

Capítulo 6

Implementación

6.1.

6.2.

AQUI VA TODO LO REFERENTE A LO QUE HEMOS HECHO EN PT2
TODO: Faltan palabras en ingles en itálicas en este capítulo

Capítulo 7

Resultados

7.1.

7.2.

TODO: Faltan palabras en ingles en italias en este capitulo

Capítulo 8

Conclusiones

8.1.

8.2.

Apéndice A

Simulación - Geometría celular hexagonal

A.1.

Bibliografía

- 3GPP (2019). *The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)*. URL: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>.
- Banks, Jerry y John H Carson (2005). *Discrete Event Simulation System*.
- Carter, J. M., B. V. Gnendenko e I. N. Kovalenko (1990). «Introduction to Queueing Theory». En: *The Mathematical Gazette*. ISSN: 00255572. DOI: [10.2307/3618175](https://doi.org/10.2307/3618175).
- Chen, Li y col. (2011). «System-level simulation methodology and platform for mobile cellular systems». En: *IEEE Communications Magazine*. ISSN: 01636804. DOI: [10.1109/MCOM.2011.5936168](https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5936168).
- Correia, L. M. (2018). «Mobile Communications Systems - Course Notes». En: February. ISSN: 0009-4978. DOI: [10.1016/b978-075064355-9/50006-4](https://doi.org/10.1016/b978-075064355-9/50006-4).
- Dd, Iv y col. (2018). *5G Wireless Systems: Simulation and Evaluation Techniques*. ISBN: 978-3-319-61868-5. DOI: [10.1007/978-3-319-61869-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61869-2).
- Descripción general: documentación de SimPy 3.0.11 (2019). URL: <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/> (visitado 14-11-2019).
- Ejaz, Waleed, Muhammad Ali Imran y Minho Jo (2016). «Internet of Things (IoT) in 5G Wireless Communications». En: January. DOI: [10.1109/ACCESS.2016.2646120](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2646120).
- Ericsson (2019). «Ericsson Mobility Report (June 2019)». En: June, pág. 28.
- Fettweis, Gerhard y Siavash Alamouti (2014). «5G: Personal mobile internet beyond what cellular did to telephony». En: *IEEE Communications Magazine*. ISSN: 01636804. DOI: [10.1109/MCOM.2014.6736754](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736754).
- Fettweis, Gerhard P (2020). «5G and the Future of IoT And on its Hardware / Software Impact». En: June 2016, págs. 21-24.
- GSM Association (2019). *GSMA Mobile IoT LPWA - LTE-M & NB-IoT Commercial Launches* | GSMA.
- Hossfeld, Tobias y Florian Metzger (2018). «Traffic Modeling for Aggregated Periodic IoT Data». En: March. DOI: [10.13140/RG.2.2.30475.39203](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30475.39203).
- Mathuranathan, Viswanathan (2016). «Simulation of Digital Communication Systems Using Matlab». En: *Kindle*. ISSN: 1098-6596. DOI: [10.1017/CB09781107415324.004](https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004). arXiv: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- multiprocessing — Process-based parallelism — Python 3.8.0 documentation (2019). URL: <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html> (visitado 20-11-2019).
- Nair, Anugrah, Gaurav Gupta y Kartik Srinivas (2018). «REVIEW ON MULTIPLE ACCESS TECHNIQUES USED IN MOBILE TELECOMMUNICATION GENERATIONS». En: *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.

- Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative (2015). «5G White Paper». En: *A Deliverable by the NGMN Alliance*, pág. 124. ISSN: 0027-9684. DOI: [10.1021/la100371w](https://doi.org/10.1021/la100371w). URL: https://www.ngmn.org/uploads/media/NGMN%7B%5C_%7D5G%7B%5C_%7DWhite%7B%5C_%7DPaper%7B%5C_%7DV1%7B%5C_%7D0%7B%5C_%7D01.pdf.
- Shirvanimoghaddam, Mahyar y col. (2017). «On the Fundamental Limits of Random Non-Orthogonal Multiple Access in Cellular Massive IoT». En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.10, págs. 2238-2252. ISSN: 07338716. DOI: [10.1109/JSAC.2017.2724442](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2724442). arXiv: [1705.10471](https://arxiv.org/abs/1705.10471).
- Tranter, William H y col. (2003). *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. ISBN: 0134947908.
- Tse, David y Pramod Viswanath (2004). «Fundamentals of Wireless Communication 1». En: *Cambridge University Press*. ISSN: 0018-9448. DOI: [10.1109/TIT.2008.2009814](https://doi.org/10.1109/TIT.2008.2009814). arXiv: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3).
- Al-turjman, Fadi, Enver Ever y Hadi Zahmatkesh (2018). «Small Cells in the Forthcoming 5G / IoT : Traffic Modelling and Deployment Overview». En: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* PP.c, pág. 1. DOI: [10.1109/COMST.2018.2864779](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2864779).
- Ventajas y desventajas del lenguaje de programación Python (2019). URL: [https://medium.com/mindfiresolutions . usa / advantages - and - disadvantages - of - python - programming - language - fd0b394f2121](https://medium.com/mindfiresolutions/usa/advantages-and-disadvantages-of-python-programming-language-fd0b394f2121) (visitado 14-11-2019).
- Yu, Heejung (2017). «What is 5G ? Emerging 5G Mobile Services and Network Requirements». En: págs. 1-22. DOI: [10.3390/su9101848](https://doi.org/10.3390/su9101848).

TODO: Aplicar formato IEEE para referencias