

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:*

Luis Fernando SALAZAR  
ORDOÑEZ  
Rolando SOTELO  
ALARCON

*Asesores:*

Dr. Domingo LARA  
RODRIGUEZ  
Dr. Noe TORRES CRUZ

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

26 de junio de 2020

*«Thanks to my solid academic training, today I can write hundreds of words on virtually any topic without possessing a shred of information, which is how I got a good job in journalism.»*

Dave Barry

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 una mejor versión del abstract y agregar su traducción**



# *Acknowledgements*

The acknowledgments and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor. . .



# Índice general

<b>Declaration of Authorship</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>V</b>
<b>1. Presentación del Proyecto</b>	<b>3</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3. OBJETIVOS	6
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	6
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4. JUSTIFICACIÓN	7
1.5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	8
1.6. ALCANCES	9
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS EN TELECOMUNICACIONES	11
2.2. MODELADO DEL CANAL CELULAR	12
2.2.1. Relaciones Generales de Propagación	14
2.2.2. Pérdida por trayectoria en el Espacio Libre (FSPL, <i>Free Space Path Loss</i> )	16
2.2.3. Caracterización del canal de radio	16
2.3. GEOMETRÍA CLÁSICA CELULAR	16
2.3.1. Planeación Celular	16
2.3.2. Planeación de frecuencia	16
2.4. INTERFERENCIA EN SISTEMAS CELULARES	16
2.5. CAPACIDAD EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES	16
2.6. INTERFAZ DE RADIO	16
2.6.1. Esquemas de Acceso Múltiple al Medio	16
2.6.2. Generaciones anteriores de sistemas de comunicaciones móviles	16
2.7. TELETRÁFICO	16
2.7.1. Caracterización del Tráfico	16
2.7.2. Notación Kendall	16
2.8. SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS	16
2.9. SIMULACIONES A NIVEL DE SISTEMA	16
2.10. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN PARA SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS (DES)	16

2.10.1. Python	16
2.10.2. Librería Simpy	16
2.11. ORGANISMOS INTERNACIONALES DE ESTANDARIZACIÓN	16
<b>3. Estado del Arte</b>	<b>17</b>
3.1.	17
3.2.	17
<b>4. Análisis</b>	<b>19</b>
4.1. RED 5G	20
4.2. INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	20
4.3. CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ÁMBITOS DE IoT	20
4.3.1. Ciudades inteligentes ( <i>Smart City</i> ):	20
4.3.2. Ambiente inteligente ( <i>Smart Environment</i> )	20
4.3.3. Energía inteligente ( <i>Smart Energy</i> ):	20
4.3.4. Transporte y movilidad inteligentes ( <i>Smart Transport and Mobility</i> ):	20
4.4. CARACTERÍSTICAS DEL ESCENARIO A IMPLEMENTAR	20
4.4.1. Análisis de las aplicaciones de IoT y selección de casos considerados	20
4.4.2. Análisis de las tecnologías para IoT y selección de casos considerados	20
4.4.3. Análisis del estándar NB-IoT	20
4.5. INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO (KPIs)	20
4.6. ANÁLISIS DE MODELOS PARA LA EVALUACIÓN DE REDES 5G/IoT	20
4.6.1. MODELO DE DESPLIEGUE DE BSs Y UEs	20
4.6.2. MODELO DE CANAL	20
4.6.3. ESQUEMA DE ACCESO MÚLTIPLE AL MEDIO	20
4.6.4. MODELOS DE TRÁFICO	20
<b>5. Diseño</b>	<b>21</b>
5.1. MODELO DE SISTEMA PROPUESTO	21
5.2. RESULTADOS A OBTENER	21
5.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	21
5.4. DEFINICIÓN DE EVENTOS	21
5.5. DIAGRAMAS DE FLUJO	21
5.6.	21
5.7.	21
5.8.	21
<b>6. Implementación</b>	<b>23</b>
6.1.	23
6.2.	23
<b>7. Resultados</b>	<b>25</b>
7.1.	25
7.2.	25



<b>8. Conclusiones</b>	<b>27</b>
8.1. . . . .	27
8.2. . . . .	27
<b>A. Simulación - Geometría celular hexagonal</b>	<b>29</b>
A.1. . . . .	29
<b>Bibliografía</b>	<b>31</b>



# Índice de figuras

2.1. Procedimiento de generación de coeficientes de canal . . . . .	13
---	----



# Índice de cuadros



# List of Abbreviations

**LAH** List Abbreviations **Here**  
**WSF** What (it) **Stands For**





# Physical Constants

Speed of Light  $c_0 = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  (exact)



# List of Symbols

TODO: Agregar los simbolos con formato	$a$	distance	m
$P$		power	W (J s <sup>-1</sup> )
$\omega$		angular frequency	rad



*For/Dedicated to/To my...*



TODO: Aplicar formato IEEE para referencias





# 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.”

**TODO: poner esta parte en sangría**

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 críticas<sup>1</sup>, 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 3GPP<sup>2</sup> 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 mMTC<sup>3</sup>, 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

---

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

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

<sup>3</sup> Cabe mencionar que los casos de uso o tecnologías mIoT y mMTC son análogas.

nodos de IoT, de una herramienta de simulación que genere resultados que permitan realizar comparaciones entre distintas configuraciones de 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 modelo 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.

TODO: Faltan palabras en ingles en italias en este capitulo



## 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 1. La pérdida de ruta generalmente se expresa en una o dos fórmulas y un conjunto de valores numéricos de parámetros, que reflejan

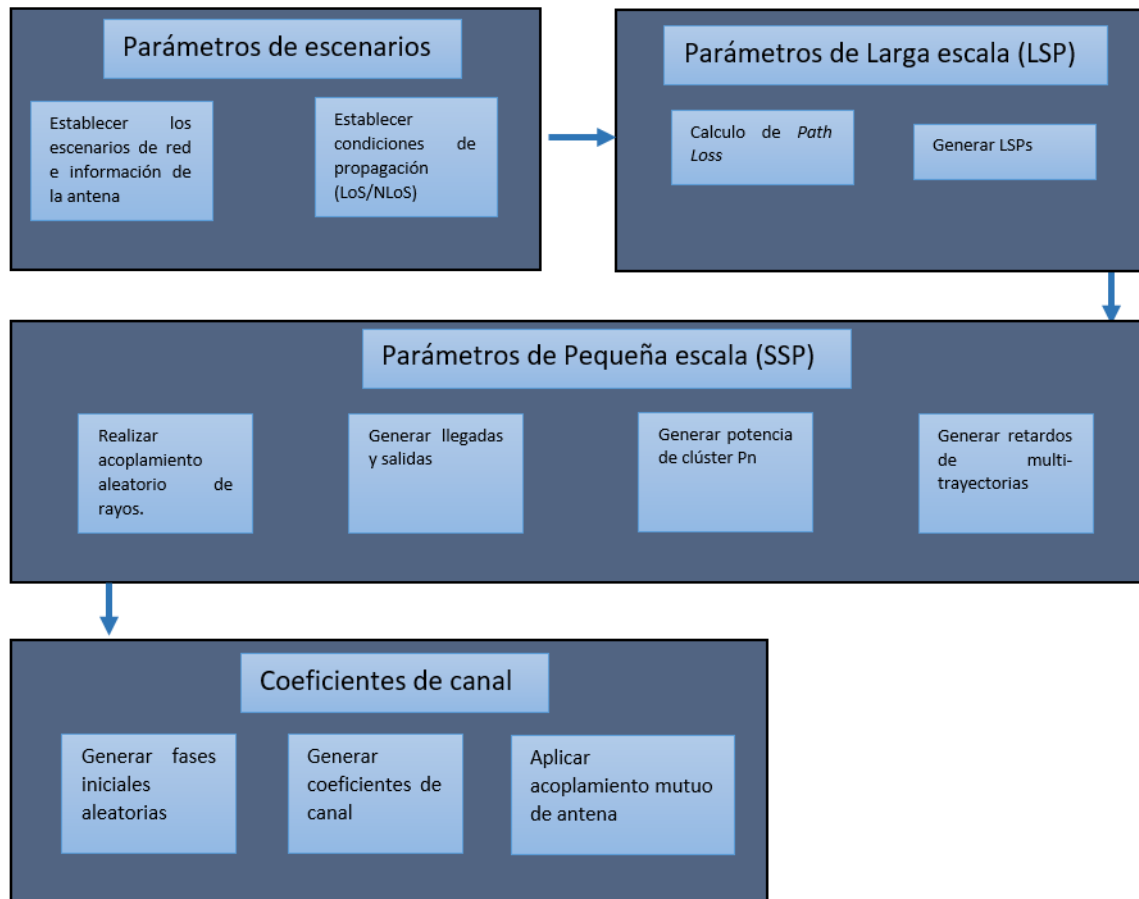


FIGURA 2.1: Procedimiento de generación de coeficientes de canal [Fuente: 3GPP TR36.873]

las relaciones con el entorno de transmisión, la distancia y la frecuencia, etc.

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) [12]. 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*)**

**2.2.3. Caracterización del canal de radio**

## **2.3. GEOMETRÍA CLÁSICA CELULAR**

**2.3.1. Planeación Celular**

**2.3.2. Planeación de frecuencia**

## **2.4. INTERFERENCIA EN SISTEMAS CELULARES**

## **2.5. CAPACIDAD EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES**

## **2.6. INTERFAZ DE RADIO**

**2.6.1. Esquemas de Acceso Múltiple al Medio**

**2.6.2. Generaciones anteriores de sistemas de comunicaciones móviles**

## **2.7. TELETRÁFICO**

**2.7.1. Caracterización del Tráfico**

**2.7.2. Notación Kendall**

## **2.8. SIMULACIONES ORIENTADAS A EVENTOS DISCRETOS**

## **2.9. SIMULACIONES A NIVEL DE SISTEMA**

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

**2.10.1. Python**

**2.10.2. Librería Simpy**

## **2.11. ORGANISMOS INTERNACIONALES DE ESTANDARIZACIÓN**

## 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 *italicas* 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

#### 4.6.3. ESQUEMA DE ACCESO MÚLTIPLE AL MEDIO

## 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 italias en este capitulo



## Capítulo 7

# Resultados

7.1.

7.2.

TODO: Faltan palabras en ingles en *italicas* en este capitulo





## Capítulo 8

# Conclusiones

8.1.

8.2.



## **Apéndice A**

# **Simulación - Geometría celular hexagonal**

### **A.1.**



# Bibliografía

- 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).
- 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).
- Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative (2015). «5G White Paper». En: *A Deliverable by the NGMN Alliance*, pág. 124. ISSN: 0027-9684. DOI: [10.1021/1a100371w](https://doi.org/10.1021/1a100371w). 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](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).
- 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).
- 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).