

# Estudio sobre los efectos de la calendarización en la tecnología NB-IoT

DIEGO EMANUEL INOSTROZA MOLINA  
*diego.inostroza1@mail.udp.cl*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Contexto general . . . . .	2
1.2. Objetivos del trabajo . . . . .	2
<b>2. LPWAN</b>	<b>3</b>
2.1. Descripción general . . . . .	3
<b>3. NB-IoT</b>	<b>4</b>
3.1. Descripción general . . . . .	4
3.2. Estructura del canal . . . . .	5
3.2.1. Enlace ascendente . . . . .	5
3.2.2. Enlace descendente . . . . .	6
3.3. Despliegue . . . . .	6
3.3.1. Standalone . . . . .	6
3.3.2. In-band . . . . .	7
3.3.3. Band-guard . . . . .	7
3.4. Arquitectura de la red NB-IoT . . . . .	8
<b>4. Simulación</b>	<b>10</b>
4.1. Software y versiones . . . . .	10
4.2. Descripción del simulador . . . . .	10
4.2.1. 5G-air-simulator . . . . .	10
4.3. Calendarización . . . . .	11
4.3.1. FIFO . . . . .	11
4.3.2. Round Robin . . . . .	11
4.4. Parámetros clave . . . . .	11
4.5. Indicadores de rendimiento . . . . .	12
4.6. Resultados obtenidos y análisis . . . . .	12
4.6.1. Simulación 1 . . . . .	13
4.6.2. Simulación 2 . . . . .	16
4.6.3. Simulación 3 . . . . .	19
4.6.4. Simulación 4 . . . . .	22
<b>5. Conclusiones</b>	<b>25</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>26</b>

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto general

Internet de las Cosas o IoT es un fenómeno donde múltiples dispositivos desplegados en el entorno con diversos propósitos, desde objetos domésticos comunes, como los refrigeradores y las bombillas, hasta recursos empresariales, como las etiquetas de envío y los dispositivos médicos; todos estos conectados a internet.

Principalmente, la conexión de internet más con objetos que con personas, en otras palabras es un sistema donde estos dispositivos físicos transfieren y reciben información sin la necesidad de la intervención humana. Esto se logra mediante la integración de dispositivos informáticos con sensores en objetos cotidiano.

En general Internet de las cosas surge de la necesidad de conectar todo tipo de dispositivos cotidianos a internet, debido a esto con el pasar del tiempo han ido apareciendo múltiples iniciativas o tecnologías que buscan el satisfacer las necesidades que IoT presenta, como por ejemplo la capacidad de mantener conexiones masivas de dispositivos a internet.

Por todo esto surgen las redes LPWAN, siendo tecnologías para dispositivos que requieran una baja tasa de transmisión y que además entregue una amplia cobertura, llegando a cubrir kilómetros. Dentro de estas tecnologías se encuentra LoRa, Sigfox o NarrowBand-IoT(NB-IoT), siendo esta última objeto de nuestro estudio.

## 1.2. Objetivos del trabajo

Los principales objetivos son:

- 1.- Conocer y caracterizar las redes LPWAN.
- 2.- Realizar un estudio y analisis detallado de NarrowBand-IoT.
- 3.- Estudiar el efecto de la calendarización en la transmisión y recepción de información.
- 4.- Análisis de resultados de la simulación y conclusiones.

## 2. LPWAN

### 2.1. Descripción general

El Low Power Wide Area Network (LPWAN), es una tecnología surgida para satisfacer las necesidades que IoT requiere para su implementación, en palabras simples es una red de área amplia y de muy bajo consumo (es decir km/mW), centrada en conectar a internet dispositivos que requieran transmitir de manera esporádica (no constantemente) datos, y que además el tamaño en bits o bytes de los paquetes no sean tan grande. Dentro de las características que poseen este tipo de red encontramos:

- **Baja Tasa de bit:** La red está pensada para transmisión de pocos bits o bytes espaciados en el tiempo de manera esporádica.
- **Amplio rango de cobertura:** Está diseñada para la transmisión inalámbrica de datos entre dispositivos separados por grandes distancias, dando cobertura hasta 15km en entornos abiertos y hasta 2km en entornos urbanos.
- **Bajo consumo:** Las baterías utilizadas llegan a durar años, están pensadas para que las tecnologías lleguen a ser obsoletas antes de que caduquen las baterías.
- **Trabajar en sub GHz:** Al trabajar con frecuencia de sub GHz, le permite cubrir una amplia área o también atravesando obstáculos, como paredes o el subsuelo.
- **Múltiples dispositivos conectados:** Estas tecnologías están diseñadas para dar acceso a una gran cantidad de dispositivos a internet.

Por lo general se asocian a este tipo de red con sensores y/o dispositivos distanciados que solo requieran transmitir paquetes pequeños de información, de manera esporádica, es decir que no sea constante en el tiempo. Las redes LPWAN se pueden definir en dos grandes categorías las que utilizan lo que se conoce como servicio en espectro licenciado y de uso exclusivo y, por otra parte, aquellas que lo hacen dentro del espectro no licenciado. Actualmente las tecnologías LPWAN más conocidas son las siguientes:

1. **Sigfox**
2. **LoRa**
3. **NB-IoT**

## 3. NB-IoT

### 3.1. Descripción general

NarrowBand-IoT (NB-IoT) es la iniciativa del 3GPP, presentada en el Release 13, esta es la organización que está detrás de la estandarización de los sistemas de tecnología celular (móviles), para abordar las necesidades de los dispositivos de muy baja velocidad de datos que necesitan conectarse a redes móviles, a menudo alimentadas por baterías. Como estándar celular, el objetivo de NB-IoT es estandarizar los dispositivos de IOT para que sean interoperables y más fiables. A grandes rasgo se puede definir como una tecnología celular que hace parte de las redes LPWAN utilizando bandas licenciadas, basada en el protocolo **Long Term Evolution (LTE)**, sin embargo se reducen todas las funcionalidades al mínimo (para minimizar el consumo), eliminando todo aquello no vinculado con la transmisión de paquetes.

Al ser una tecnología LPWAN posee las mismas características que se mencionaron en la sección anterior, como el amplio rango de cobertura o su bajo consumo energético, sin embargo, NB-IoT posee características mas específicas que las diferencian de las otras tecnologías, como LoRa o Sigfox. Dentro de sus principales características se encuentran:

- Requiere un ancho de banda de 180 kHz tanto para el **uplink** como para el **downlink**, operando en HD-FDD.
- La capacidad de dar acceso a internet a mas 52000 dispositivos en una celda, aprovechando que la baja periodicidad de transmisión de datos, con la probabilidad de aumentar si se le agregan otras portadoras.
- La carga útil (payload) máxima es de 1600 bytes/mensaje.
- La vida útil de las baterías teóricamente es de 10 años, transmitiendo en promedio 200 bytes/día.
- Aumento en la cobertura en 10 dB respecto a GPRS, especialmente en interiores, 7 dB apoyándose en una reducción del ancho de banda o 13 dB en retransmisiones del bloque de transporte.
- Modelo de modulación QPSK, que hace a los terminales mas fáciles y baratos de fabricar.
- Coexiste con LTE a través de distintos modos de despliegue: standalone, in-band, band-guard.
- Capaz de aprovechar los espectros de LTE y GSM.
- Al operar en bandas licenciadas proporciona una alta seguridad en las comunicaciones.

NB-IoT se utiliza para enviar y recibir pequeñas cantidades de datos, unas pocas decenas o cientos de bytes al día, generados por dispositivos de IoT que producen pocos datos. Está basado en mensajes, similar a Sigfox y LoRa, pero con una velocidad de modulación mucho más rápida y puede manejar más datos que esas tecnologías. NB-IoT está asociado con aplicaciones de sensores simples, que constituyen la mayor parte del floreciente espacio de Internet de las cosas (IoT). Se considera un rival de las tecnologías de red LPWA patentadas como LoRaWAN y Sigfox, y tiende a combinarse con LTE-M, otra solución celular basada en LTE. De hecho, los cuatro ofrecen diferentes capacidades dentro del espacio LPWA y cada vez atienden más casos comerciales diferentes. NB-IoT proporciona una solución de alta densidad, duradera y de bajo costo, con buena penetración, incluida una cobertura en interiores de difícil acceso. Dentro de sus ventajas es importante mencionar que la cobertura es muy buena en entornos urbanos. Los dispositivos NB-IoT dependen de la cobertura 4G, por lo que funcionarían bien en interiores y en áreas urbanas densas.

## 3.2. Estructura del canal

Anteriormente se mencionó que una portadora NB-IoT requiere de 180 kHz de ancho de banda tanto para el uplink como para el downlink, sin embargo, es importante el comprender que esta portadora se divide en 12 canales de 15 kHz cada uno siendo este el espaciado estándar, o bien para trabajar con menor ancho y por lo tanto menor ruido este puede aumentar a 48 canales de 3.75 kHz, permitiendo incluso aumentar el rango de cobertura. A continuación se observarán las características tanto del uplink como del downlink.

### 3.2.1. Enlace ascendente

NarrowBand-IoT utiliza como método de acceso al medio, en el uplink o enlace ascendente, a **Frequency Division Multiple Access (FDMA)**, lo que hace que la portadora se divide en canales (12 canales de 15kHz o 48 canales de 3.75 kHz), que corresponde a distintos rangos de frecuencia, y se le asignan estos canales a distintos usuarios y comunicaciones a realizar sin interferirse entre sí. Los usuarios pueden acceder a estos canales por distintos métodos como TDMA, CDMA o SDMA. La siguiente figura ejemplifica de forma gráfica como debería ser FDMA.

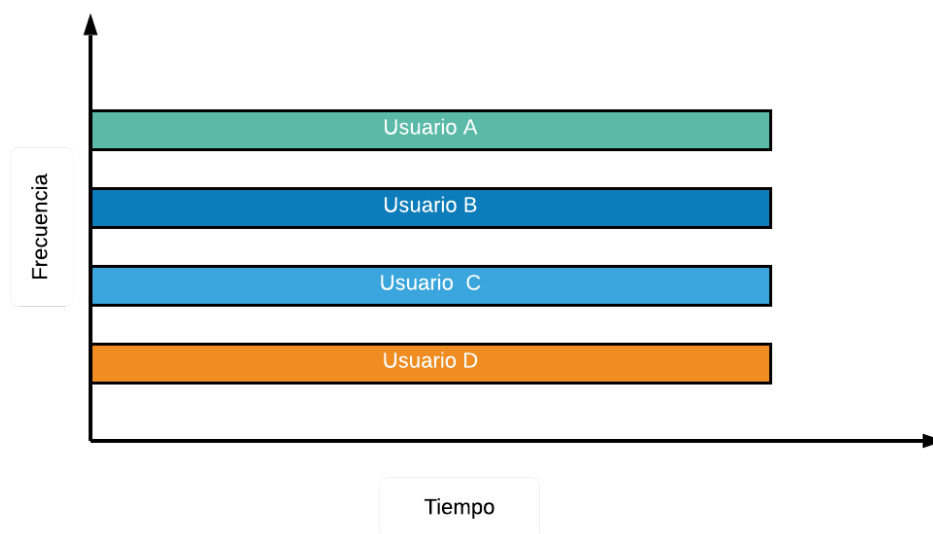


Figura 3.1: FDMA

Por otro lado, llega a presentar una tasa de transmisión entre 160 kbps hasta los 200 kbps y tiene una máxima velocidad de subida de 20 kbps. Además, tiene dos modos de operación:

- Multitono: Solo soporta un subespaciado de 15 kHz, permitiendo agrupar a las subportadoras en grupos de 3,6 o 12.
- Monómodo: Permitiendo de un subespaciado de 15 kHz o 3.75 kHz.

### 3.2.2. Enlace descendente

NarrowBand-IoT utiliza como método de acceso al medio, en el downlink o enlace descendente a **Orthogonal FDMA (OFDMA)**, esto permite asignar un número diferente de subportadores a cada uno de los usuarios garantizando así, una diferente calidad de servicio (QoS) en función del ancho de banda asignado. Es decir, OFDMA permite establecer una velocidad de conexión y una probabilidad de error individualmente para cada usuario.

Por otro lado, presenta una tasa de transmisión que puede variar entre 160 kbps hasta los 250 kbps.

## 3.3. Despliegue

Al momento de llevar al despliegue a NB-IoT, es importante el comprender que esta tecnología posee tres tipos de modos de funcionamiento o modalidades, dependiendo del tipo de portadora utiliza, ya sea GSM o LTE, como también el lugar en donde se alojara la portador NB-IoT, en primer lugar encontramos a:

### 3.3.1. Standalone

La modalidad standalone se utiliza cuando dentro de una portadora GSM se aloja una portadora NB-IoT o también cuando la portadora NB-IoT es independiente de otras, permitiéndole aumentar su ancho de banda a 200 KHz, dejando 10 KHz de intervalo de protección para ambos lados del canal. Esta implementación ofrece el mejor rendimiento. Para comprender mejor como es la modalidad standalone, en la siguiente figura se puede observar:

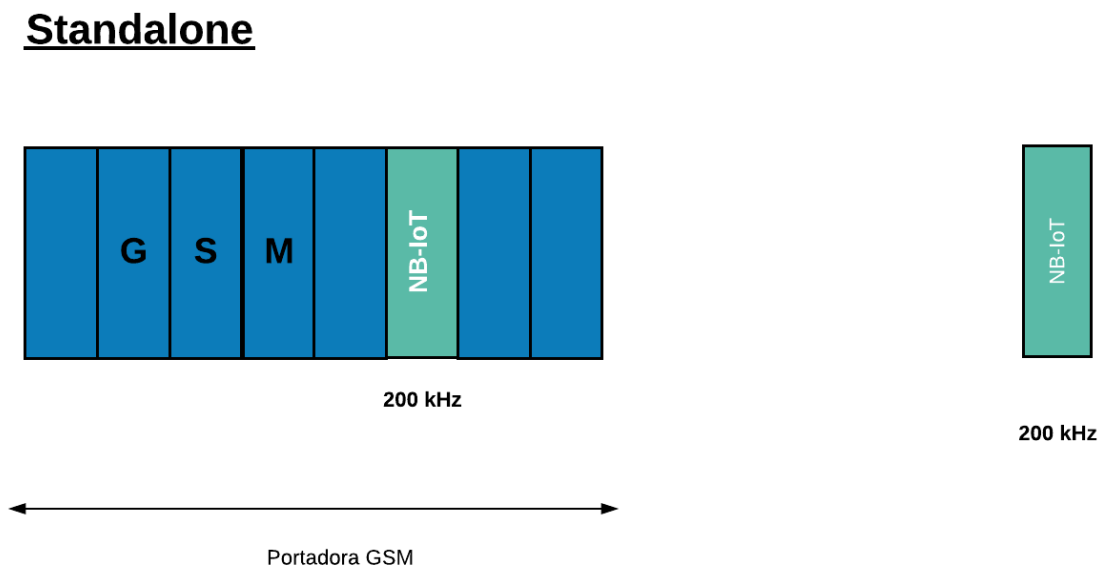


Figura 3.2: Standalone

### 3.3.2. In-band

La modalidad in-band, donde la portadora NB-IoT utiliza uno o mas bloques de recursos (frecuencias) dentro de una portadora LTE. Este método afecta el rendimiento de NB-IoT y LTE, ya que agrupa el primero directamente en los canales del segundo. En esta modalidad el ancho de banda no se ve aumentado, por ende se mantiene en los 180 kHz, tal y como se puede observar en la siguiente imagen:

#### IN BAND

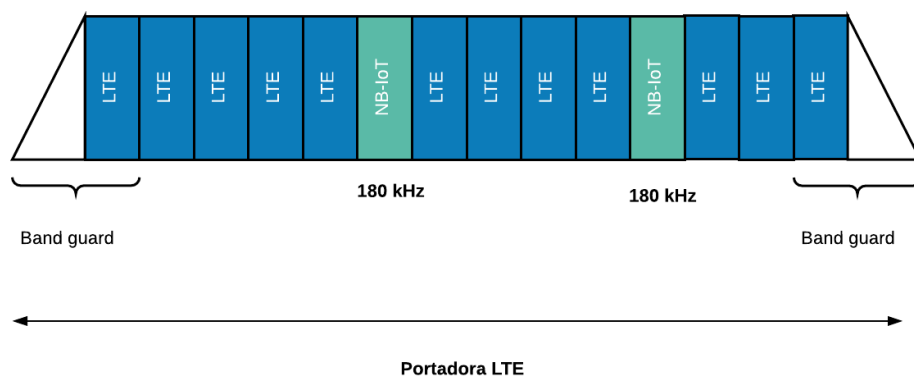


Figura 3.3: In-Band

### 3.3.3. Band-guard

Por último, en la modalidad band-guard la portadora NB-IoT es asignada a los canales de la banda de guarda de una portadora LTE. Las bandas de guarda existen por una razón y es la de detener la caída de la potencia de salida de las estaciones base a los canales LTE adyacentes. La relación señal-ruido aumenta para NB-IoT si coexiste con la caída de canales LTE, y el rendimiento se ve afectado y no alcanza los niveles que normalmente se reclaman en línea.



## **Band Guard**

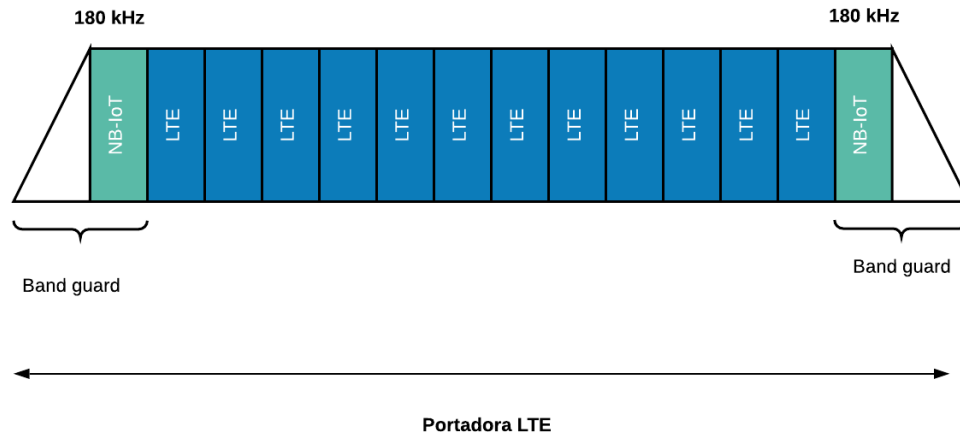


Figura 3.4: Band-guard

### **3.4. Arquitectura de la red NB-IoT**

La arquitectura de NarrowBand-IoT es la misma que utiliza la red LTE, también conocida como **Evolved Packet System (EPS)**, siendo una red IP extremo a extremo (E2E), la cual se divide en dos partes:

- 1.- La parte LTE que trata de la tecnología relacionada con una red de acceso de radio E-UTRAN.
- 2.- Evolved Packet Core (EPC) que trata de la tecnología relacionada con la red troncal.

Que sea una red IP E2E, extremo a extremo, significa que todo el tráfico fluye mediante IP desde el equipo de usuario (UE) hasta la red de paquetes o PDN (Packet Data Network) donde está conectada la entidad o entidades que proporcionan el servicio.

A pesar de utilizar la misma arquitectura NB-IoT posee ciertas variaciones, para empezar la red troncal EPC se optimiza para un despliegue masivo de dispositivo, permitiendo que las transmisiones sean cortas. En la figura 3.5 se ejemplifica de mejor forma de disposición de las entidades para la comunicación

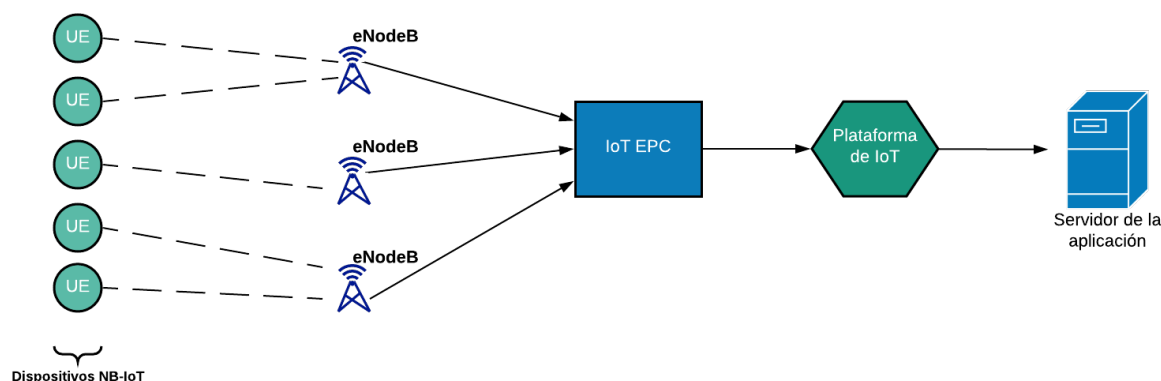


Figura 3.5: Arquitectura NB-IoT

El flujo de información transcurre desde el dispositivo NB-IoT al eNodeB y finalmente al EPC, básicamente ocurre de la siguiente forma:

El proceso de comunicación inicia desde que el dispositivo NB-IoT comienza a transmitir información enlazándose con un eNodeB usando la capa de acceso gestionado bajo el protocolo RRC, quien configura el plano de control y usuario para el resto del proceso. El eNodeB hace uso del protocolo NAS (Non-Access Stratum), el cual mejora la transmisión de datos a los nuevos elementos de la red para este tipo de dispositivos, permitiendo el pasar al EPC, posteriormente se pasa al plano de usuario en la plataforma IoT para llegar a las aplicaciones y sus servidores, bien sea con IP o Non-IP, siendo esta última la más adecuada debido a que reduce las cabeceras en el equipo de usuario haciendo la transmisión de información más segura.

## 4. Simulación

La realización de este estudio se lleva a cabo en dos partes, en primera instancia se encuentra la investigación sobre la tecnología NB-IoT, para así posteriormente ejecutar una serie de pruebas que permitieran observar y discernir, los efectos y desempeño que tiene esta tecnología al utilizar diferentes métodos de calendarización al momento de realizar un proceso de transmisión o recepción de información.

### 4.1. Software y versiones

Para esta segunda etapa se utilizó un simulador que solo es capaz de ejecutarse en el sistema operativo Linux, sin embargo debido a que el equipo utilizado para las simulaciones no contaba con este sistema operativo, se empleó el programa “Oracle VM Virtual Box” en su versión 6.1.16, y esta presente en el siguiente enlace: <https://www.virtualbox.org/wiki/Downloads>. Este software permite utilizar el sistema operativo Linux, en este caso se utiliza la versión 20.04.1 de Linux.

El equipo empleado para el estudio posee 8 Gb de memoria RAM, como también un procesador Intel Core i5-9300H y se le asignó a la máquina virtual la mitad de la memoria RAM para operar sin dificultades.

### 4.2. Descripción del simulador

#### 4.2.1. 5G-air-simulator

El 5G-air-simulator, creado por Sergio Martiradonna, Alessandro Grassia, Giuseppe Piroa y Gennaro Boggia pertenecientes al “Telematics Lab of the Polytechnic University of Bari”, es una herramienta de simulación que permite reproducir el comportamiento de la tecnología NB-IoT, siendo capaz de mostrar el tráfico de información que realizan los nodos presentes en una celda de tamaño específico. Para comenzar es importante mencionar que el 5G-air-simulator solo reproduce los eventos ocurridos en el “uplink”, es decir, que el destinatario siempre será la base central, esto se debe a que considerando que los dispositivos NB-IoT, principalmente son sensores que envían los datos captados de manera esporádica se repara en que lo más común y por ende lo más importante es el proceso de uplink.

Los tonos permiten definir la cantidad **Unidad de recursos (RU)** que existirán en la simulación, y esta es la unidad mínima para mapear un bloque de transporte, en caso de Single tone al tener un espaciado de subportadora de 3.75 KHz o 15 KHz, cada canal será una RU y por lo tanto los 180 KHz de ancho de banda se dividen en 48 o 12 RU, y en el caso de Multi tone como solo es posible trabajar con un espaciado de 15 KHz, la RU se definirán dependiendo del número de tonos asignados (3, 6 o 12), por ejemplo en el caso de ser 3 tonos, entonces tres subportadoras adyacentes pueden concurrir para formar una RU.

Por otro lado, se deben mencionar ciertas consideraciones y/o limitantes al momento de utilizar este software como que la herramienta solo está programada para funcionar con dos calendarizaciones, que son **FIFO** y **Round Robin**. Además, muchas variables son estáticas, como por ejemplo el tamaño de los paquetes (en bytes) o también el intervalo de tiempo entre dos transmisiones sucesivas por parte del mismo usuario.

El simulador original que se utiliza actualmente se encuentra en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/telematics-lab/5G-air-simulator>

Sin embargo debido a las limitantes que este posee, se realizaron pequeñas modificaciones a ciertos códigos, todo esto se puede observar en el siguiente repositorio de GitHub:

<https://github.com/DiegoInostroza/Practica-1-Estudio-NB-IoT.git>

## 4.3. Calendarización

La calendarización o planificación hace referencia a un conjunto de mecanismos que regulan el orden en que deben ser ejecutados los trabajos o procesos, el objetivo principal es optimizar el rendimiento del sistema. Considerando que estos mecanismos de calendarización permiten observar como la red NB-IoT prioriza o ordena los procesos de transmisión y recepción que realizan los dispositivos, se analizarán los dos tipos de calendarización que el simulador soporta (FIFO y Round Robin), para así comprender los resultados obtenidos posteriormente. A continuación se realizará una breve explicación del modo de operar de estos dos algoritmos.

### 4.3.1. FIFO

Este algoritmo es muy sencillo y simple, como su nombre lo implica **First In First out** el primer paquete que llega será el primer paquete que se envía, así que los paquetes irán formando una cola, de modo que cada paquete integrado en la cola espera a ser recibido por la estación base.

### 4.3.2. Round Robin

Por otro lado, encontramos a Round Robin este algoritmo de planificación es uno de los más complejos y difíciles de implementar, asigna a cada paquete un tiempo equitativo tratando a todos los paquetes por igual y con la misma prioridad, en otras palabras este algoritmo divide los paquetes en varias clases, y va enviando un paquete de cada clase de manera cíclica. Primero clase A, luego B, luego C, y vuelta a empezar suponiendo que hay tres clases.

## 4.4. Parámetros clave

Se debe considerar que el simulador acepta diversos parámetros que afectan de distintas formas a la simulación, sin embargo muchos de estos no se consideraron principalmente con enfoque del estudio se hubiera perdido, siendo lo principal el observar el comportamiento de la red NB-IoT con diferentes tipos de calendarización (siendo en este caso FIFO y Round Robin) y analizar el rendimiento de cada una de estas, por lo tanto el primer parámetro clave que se debe considerar es el tipo de calendarización que se desea utilizar.

Por otro lado, el tipo de espaciado de subportadoras, ya sean 12 canales de 15 kHz o 48 de 3.75 kHz, como también el número de usuarios o dispositivos NB-IoT presentes en la celda, que considerando que la tecnología se implementa dentro de un ambiente urbano, entonces el diámetro de la celda constará de 2 km.

En resumen los parámetros más importantes a considerar son los siguientes:

- Tipo de calendarización.
- Espaciado de las subportadoras.

- Número de usuario o dispositivos por celda.

De este modo se analizarán el rendimiento de cada uno de los tipos de calendarización, observando su **Packet Lost Rate (PLR)**, como también **Packet Delay**, el **GoodPut** y su **Average Random Access Collision Rate**. Todos estos conceptos serán explicados en la siguiente sección.

## 4.5. Indicadores de rendimiento

Como se menciona en la sección para poder medir el rendimiento de tipos de calendarización se observarán cada uno de los resultados obtenidos al simular las instancias, los principales indicadores de rendimiento considerado en este estudio son:

- **Packet Lost Rate (PLR):** es la tasa de paquetes perdidos. Se calcula como la proporción de paquetes perdidos sobre el total de paquetes transmitidos en la capa de aplicación. En este caso, los paquetes transmitidos corresponden al número de líneas que comienzan con TX, mientras que los paquetes recibidos se identifican por el número de líneas que comienzan con RX, y la diferencia entre ambos es la proporción de paquetes perdidos.
- **Average Packet Delay:** es el retraso promedio de los paquetes transmitidos. Se calcula al sumar los tiempos de todas las filas que inician con RX, y posteriormente se calcula su promedio.
- **Cell GoodPut:** es el rendimiento de la celda medidos en bps (bit por segundo). Se calcula al considerar todas las líneas que inician con RX, sumando los indicadores del tamaño de los datos de la aplicación en bytes. Luego, la suma debe multiplicarse por 8 y dividirse por duración de la simulación para obtener el buen rendimiento en bps.
- **Average Random Access Collision Rate:** es la tasa promedio de colisión por acceso aleatorio. De manera similar al PLR, se define como la relación entre las colisiones de preámbulos y las terminaciones exitosas. Es necesario considerar todas las líneas que comienzan con la palabra clave RACH.

## 4.6. Resultados obtenidos y análisis

Como se menciona en secciones anteriores se consideraron parámetros claves para poder realizar las simulaciones, considerando eso las simulaciones se realizaron una por una variando tanto los parámetros de calendarización, como también el número de nodos presentes en la celda, yendo desde 30 hasta 1200 nodos. Posteriormente, se graficaron utilizando como eje X a el número de nodos presente en la celda, y como eje Y uno de los cuatro indicadores de rendimiento, obteniendo un total 4 gráficos por simulación, en total de realizaron un total de 35 simulaciones para cada una de las siguientes secciones. A continuación observaremos los resultados obtenidos en cada una de estas simulaciones.

#### 4.6.1. Simulación 1

En esta primera instancia los parámetros utilizado durante el proceso de simulación fueron los presentes en la Tabla 4.1.

Parámetros	Valores
Calendarización	FIFO - Round Robin
Subespaciado de la portadora	3.75 kHz
Número de nodos	30 - 1200 dispositivos
Tamaño de paquetes	512 bytes
Radio de la celda	1000 metros

Tabla 4.1: Parámetros de simulación 1

Imponiendo estos parámetros en la simulación se guardaron los datos para posteriormente ser graficados, obteniendo un total de 4 gráficos que permiten discernir el desempeño de cada una de las calendarizaciones disponibles a utilizar. En primer lugar podemos el indicador de rendimiento Packet Lost Rate (PLR):

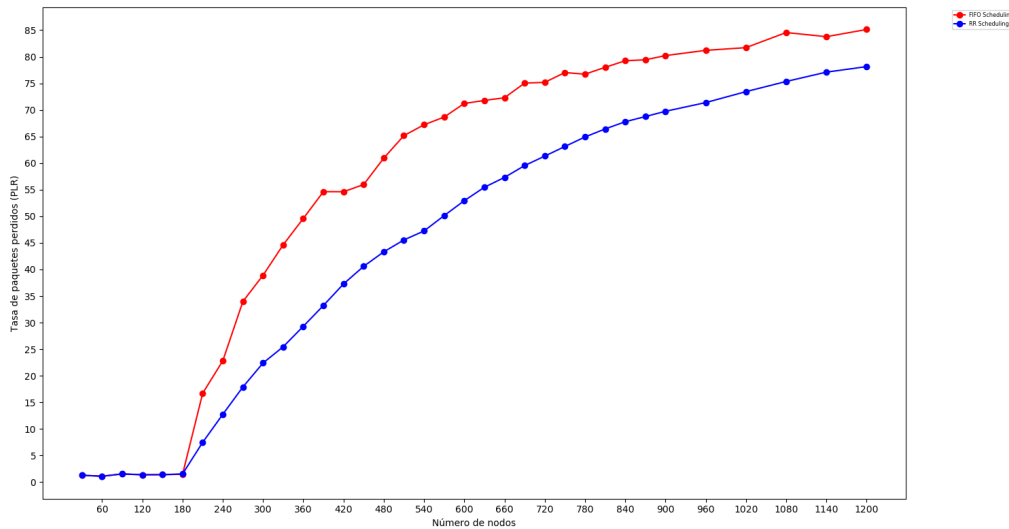


Figura 4.1: Packet Lost Rate (PLR) vs n° Nodos

Observando detenidamente se puede concluir que la calendarización Round Robin es más eficiente que FIFO, ya que con el aumento de dispositivos presentes en una celda la tasa de paquetes es mucho menor en Round Robin, esto se le puede atribuir a la manera de operar de FIFO, ya que al ir poniendo en cola todos los paquetes que se desean transferir, la estación centra es incapaz de poder recibirlo a todos y por ende muchos termina sin poder completar el proceso de comunicación. En segundo lugar se encuentra el indicador de eficiencia Average Packet Delay medido en segundos, obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

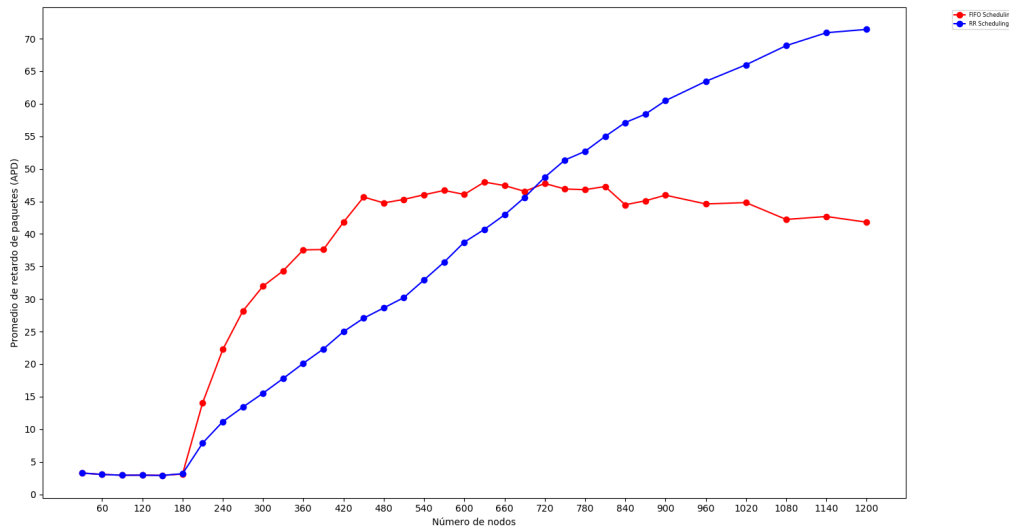


Figura 4.2: Average Packet Delay vs n° Nodos

En esta instancia se percibe un resultado totalmente contrario al anterior gráfico, ya que quien posee un menor retardo en el envío de paquetes es FIFO, nuevamente esto se debe al comportamiento de FIFO y Round Robin, ya que como se menciona en la 4.3 Round Robin asigna un tiempo específico de envío, y en caso de que el paquete no haya sido enviado en ese tiempo entonces deberá esperar a que el ciclo se termina y vuelva a ser su turno para terminar de enviarlo, por ende los paquetes no son enviados por completo, a diferencia de FIFO que cada paquete se transmite por completo antes de transmitir el siguiente en cola. En tercer lugar se encuentra el indicador Goodput medido en bps (bits por segundo), obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

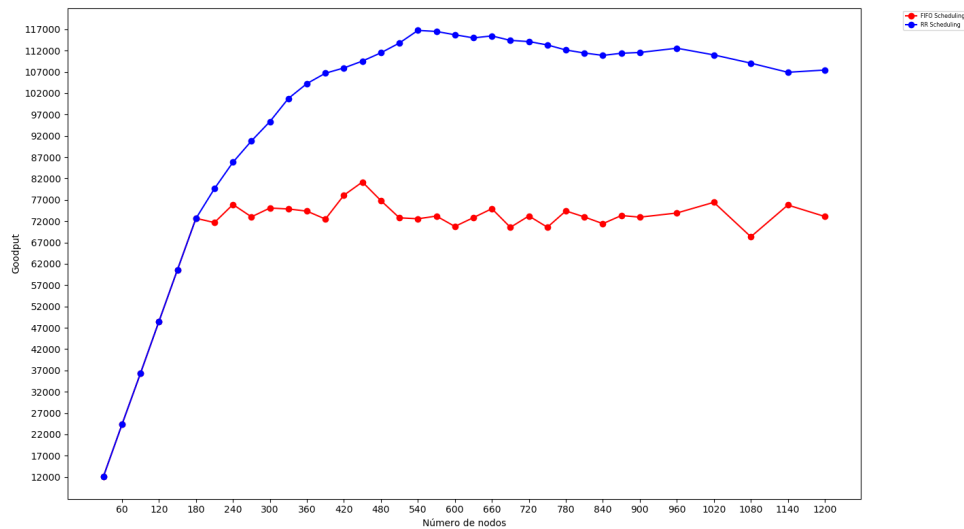


Figura 4.3: Goodput vs n° Nodos

Analizando detenidamente la figura 4.3 el rendimiento de Round Robin es mucho mayor al de FIFO, llegando a tener el primero tasas de transmisión de bytes mucho mayores que el segundo, principalmente

debido a que la pérdida de paquetes ocurrido en Round Robin es mucho menor que el de FIFO, observando como llegados hasta cierto número de nodos presentes en una celda las tasa de transmisión se mantienen en un rango constante. Y por último, en cuarto lugar se encuentra el indicador de eficiencia Average Random Access Collision Rate, el cual no posee una unidad de medida específica, obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

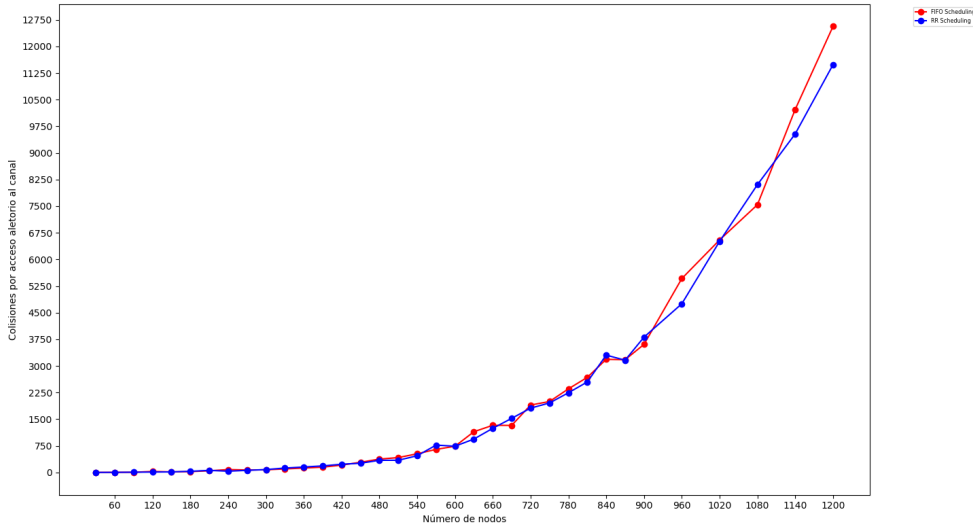


Figura 4.4: Average Random Access Collision Rate vs n° Nodos

Observando los resultados, se percibe un comportamiento muy similar entre casi sin variaciones, a excepción de último, mostrando que cuando existen 1200 usuarios Round Robin posee menos colisiones de RACH que FIFO.

Analizando cada uno de los resultados y figuras, se llega a la conclusión que la calendarización Round Robin es mucho más eficiente que FIFO, ya que aunque el segundo posea un menor promedio de retardo en los paquetes, los demás indicadores de eficiencia señalan que el primero se desempeña mucho mejor, teniendo menores tasas de pérdida en paquetes, como también una mayor tasa de transferencia en términos de bps.



### 4.6.2. Simulación 2

En esta segunda simulación, solamente se vario el subespaciado de la portadora transformándola de 3.75 kHz a 15 kHz, todo lo demás se mantuvo, tal y como se observa en la siguiente tabla.

Parámetros	Valores
Calendarización	FIFO - Round Robin
Subespaciado de la portadora	15 kHz
Número de nodos	30 - 1200 dispositivos
Tamaño de paquetes	512 bytes
Radio de la celda	1000 metros

Tabla 4.2: Parámetros de simulación 2

Al igual que en la ocasión anterior, se observaran los resultados obtenidos al realizar las simulaciones con los parámetros anteriormente señalados, teniendo en primer lugar a Packet Lost Rate.

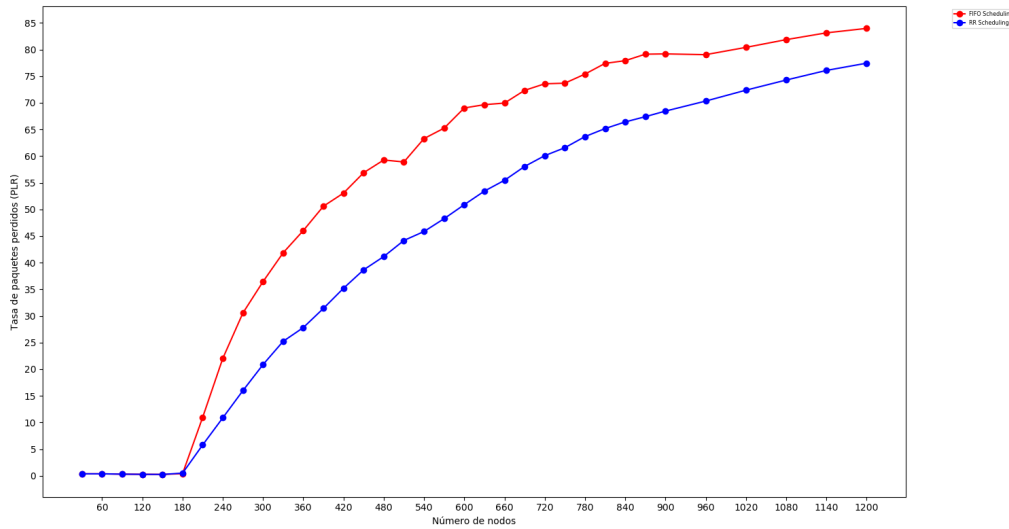


Figura 4.5: Packet Lost Rate (PLR) vs n° Nodos

Nuevamente se observa que la tasa de perdida de paquetes en Round Robin, es mucho menor a FIFO, siendo el motivo más probable la manera de funcionar del primer algoritmo, permitiendo a este último el completar el proceso de comunicación. En segundo lugar se encuentra el indicador de eficiencia Average Packet Delay medido en segundos, obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

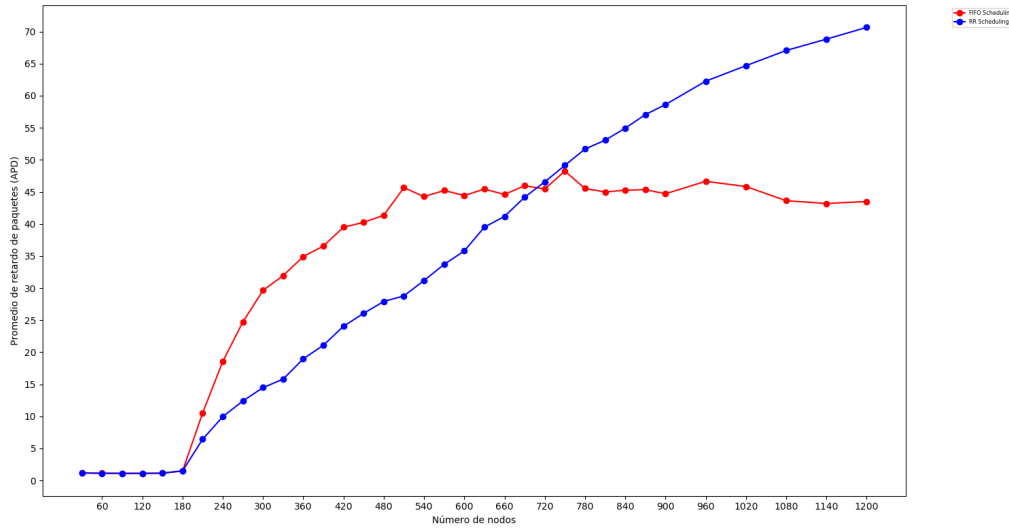


Figura 4.6: Average Packet Delay vs n° Nodos

Tal y como sucedió en la subsección 4.6.1 FIFO mantiene un menor promedio de retardo en envío de paquetes en comparación a Round Robin, nuevamente debido a la forma de operar que tienen ambos algoritmos, permitiendo a FIFO poseer un menor retardo. En tercer lugar se encuentra el indicador Goodput medido en bps (bits por segundo), obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

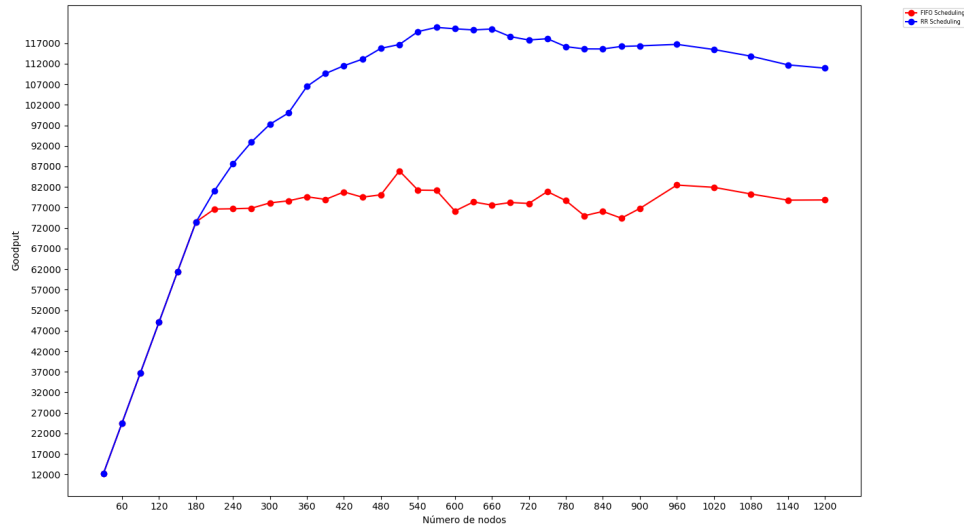
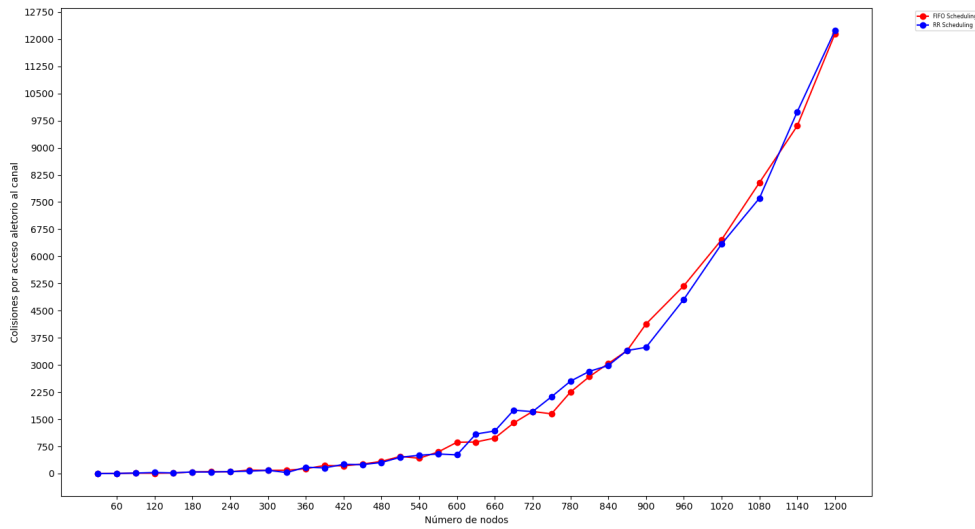


Figura 4.7: Goodput vs n° Nodos

Manteniendo el mismo comportamiento observado en la subsección anterior, se percibe un mejor rendimiento en Round Robin que en comparación a FIFO. Y por último, en cuarto lugar se encuentra el indicador de eficiencia Average RandomAccess Collision Rate, el cual no posee una unidad de medida específica, obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

Figura 4.8: Average Random Access Collision Rate vs  $n^\circ$  Nodos

Contemplando la figura 4.8 marca un resultado muy similar entre casi sin variaciones, al ambas tener un comportamiento igualitario no es posible discernir cual de ambas es más eficiente.

Al igual que la subsección 4.6.1 el algoritmo Round Robin es mucho más eficiente que FIFO, por que aunque el segundo posea un menor promedio de retardo en los paquetes, los demás indicadores de eficiencia señalan que el primero se desempeña mucho mejor, teniendo menores tasas de perdida en paquetes, como también una mayor tasa de transferencia en términos de bps.

### 4.6.3. Simulación 3

En este escenario se regreso al subespaciado de 3.75 kHz, sin embargo se aumento de tamaño de los paquete a 1 Kb (Kilo byte), para poder observar algún cambio o variación en comportamiento, tal y como se observa en la siguiente tabla.

Parámetros	Valores
Calendarización	FIFO - Round Robin
Subespaciado de la portadora	3.75 kHz
Número de nodos	30 - 1200 dispositivos
Tamaño de paquetes	1 Kb
Radio de la celda	1000 metros

Tabla 4.3: Parámetros de simulación 3

Al igual que en la ocasión anterior, se observaran los resultados obtenidos al realizar las simulaciones con los parámetros anteriormente señalados, teniendo en primer lugar a Packet Lost Rate, obteniendo a la figura 4.9 como resultado.

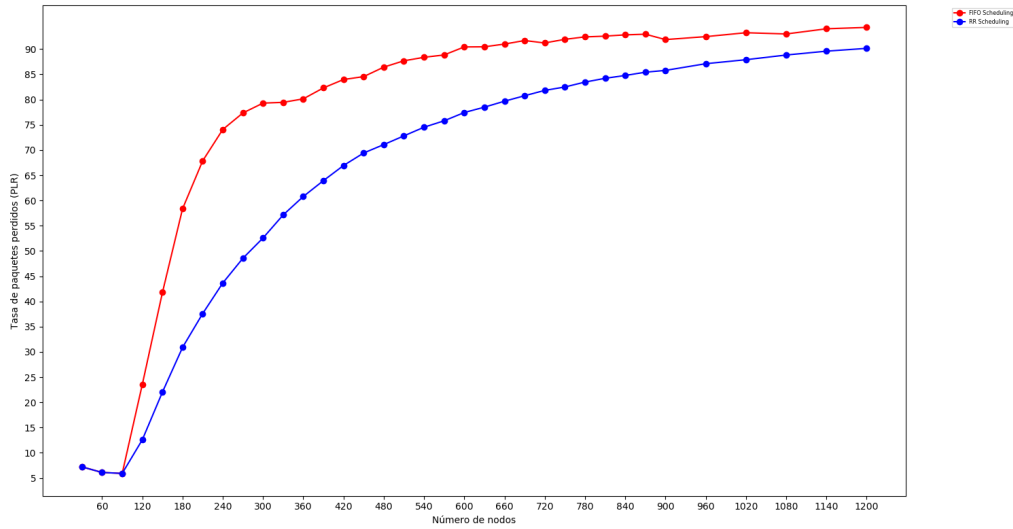


Figura 4.9: Packet Lost Rate (PLR) vs n° Nodos

Nuevamente se observa que la tasa de perdida de paquetes en Round Robin, es mucho menor a FIFO, siendo el motivo más probable el modo de operar del primer algoritmo. En segundo lugar se encuentra el indicador de eficiencia Average Packet Delay medido en segundos, obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

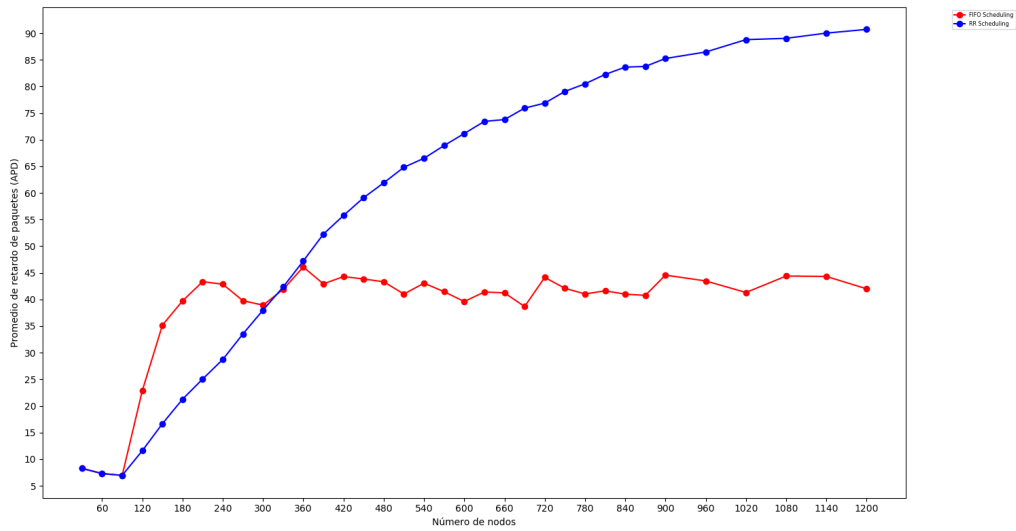


Figura 4.10: Average Packet Delay vs n° Nodos

Al igual que en las secciones anteriores el comportamiento es similar y presenta ninguna variación en los resultados dejando a FIFO como el algoritmo que presenta una menor tasa de retardos en los paquetes transmitidos. En tercer lugar se encuentra el indicador Goodput medido en bps (bits por segundo), obteniendo como resultado el siguiente gráfico.

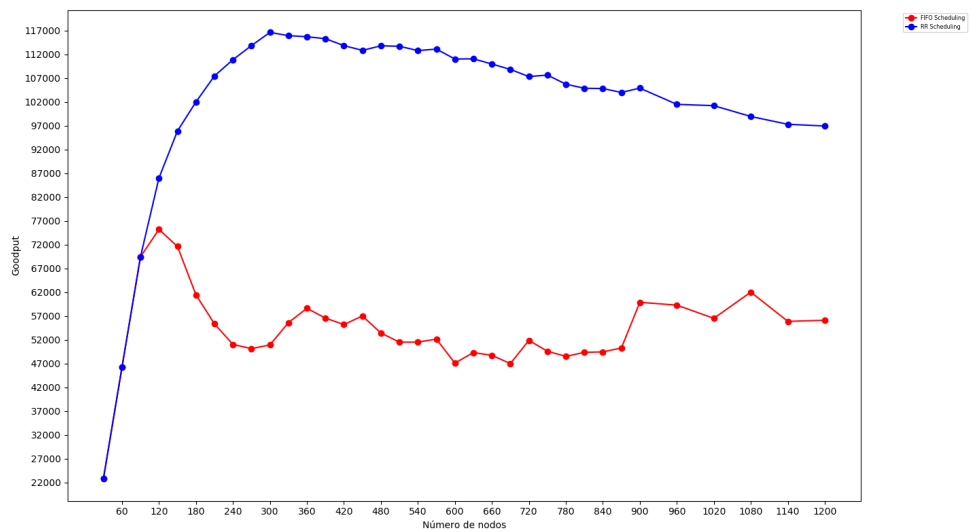


Figura 4.11: Goodput vs n° Nodos

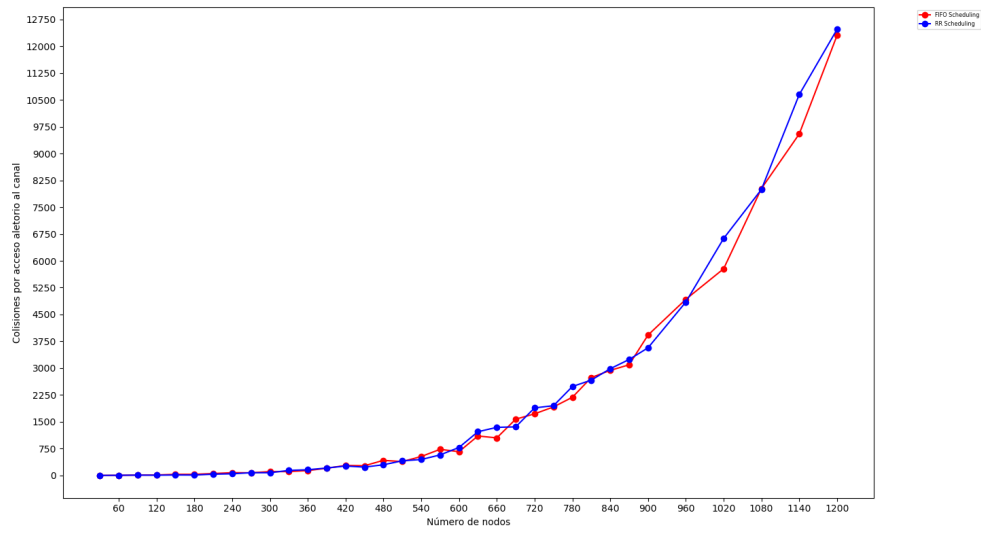


Figura 4.12: Average Random Access Collision Rate vs n° Nodos

Por último se logra apreciar que el comportamiento tanto de FIFO como de Round Robin es el mismo que en la simulaciones anteriores, manteniendo el veredicto de que el segundo algoritmo es mucho mas eficiente.

#### 4.6.4. Simulación 4

En este escenario se cambió al subespaciado de 3.75 kHz a 15 kHz, manteniendo el tamaño de los paquete a 1 Kb (Kilo byte), tal y como se observa en la siguiente tabla.

Parámetros	Valores
Calendarización	FIFO - Round Robin
Subespaciado de la portadora	15 kHz
Número de nodos	30 - 1200 dispositivos
Tamaño de paquetes	1 Kb
Radio de la celda	1000 metros

Tabla 4.4: Parámetros de simulación 4

Al igual que en la ocasión anterior, se observaran los resultados obtenidos al realizar las simulaciones con los parámetros anteriormente señalados, teniendo en primer lugar a Packet Lost Rate, obteniendo a la figura 4.13 como resultado.

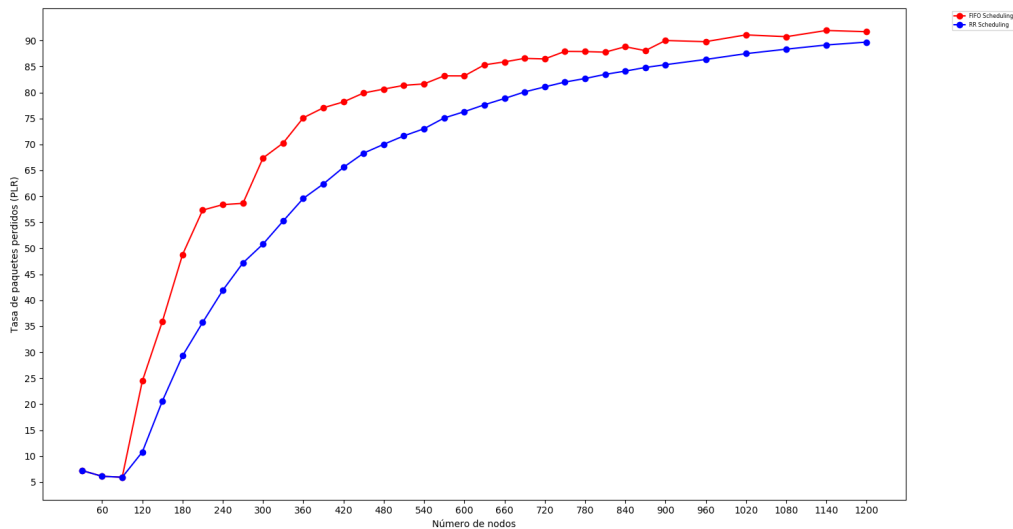


Figura 4.13: Packet Lost Rate (PLR) vs n° Nodos

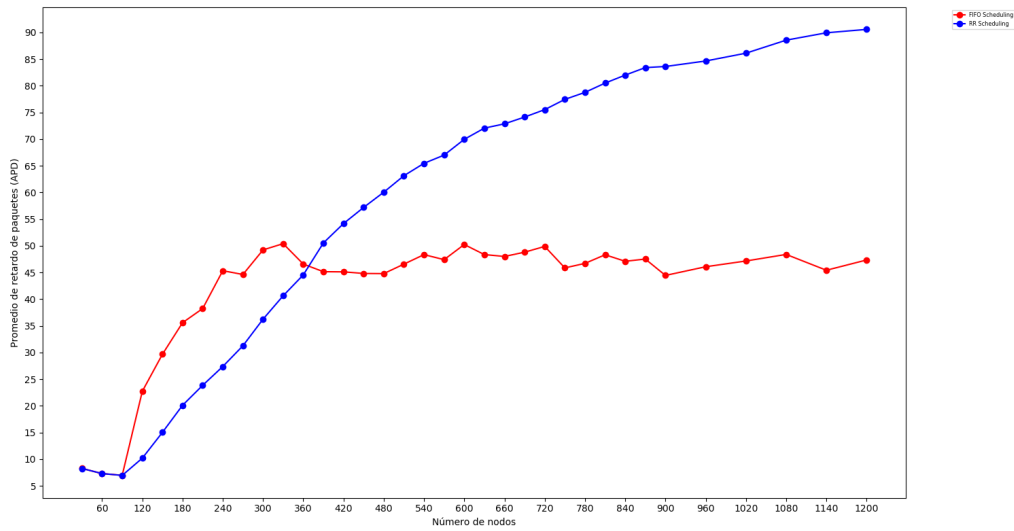


Figura 4.14: Average Packet Delay vs n° Nodos

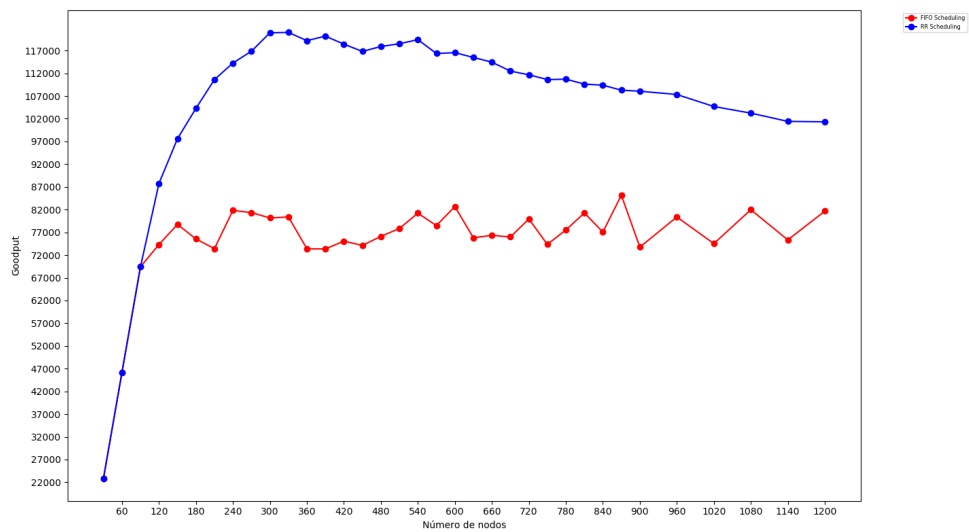


Figura 4.15: Goodput vs n° Nodos



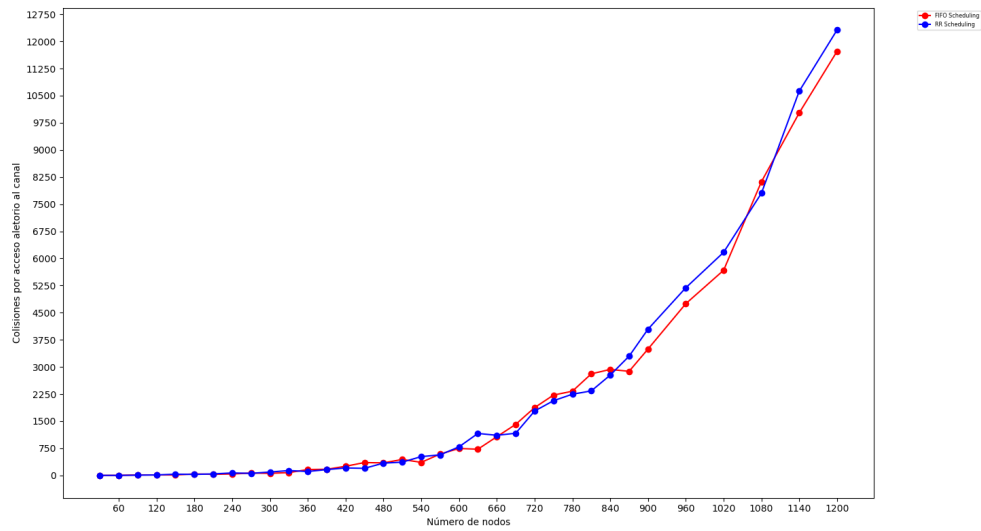


Figura 4.16: Average Random Access Collision Rate vs n° Nodos

Observando cada uno de gráficos de la sección 4.6.4 se percibe el mismo comportamiento que la secciones anteriores, casi sin ninguna variación en los resultados, dando como conclusión que Round Robin tiene un desempeño mucho mejor que FIFO.

## 5. Conclusiones

Observando cada uno de los resultados obtenidos al simular con 5G-air-simalutar se llega a la conclusión que al momento de implementar la tecnología NarrowBand-IoT en un ambiente, es importante que el mecanismo de transmisión y priorización de paquetes sea el de Round Robin. Principalmente, debido a su baja tasa de pérdida de paquetes transmitidos, como también en su rendimiento de transmisión.

Durante esta investigación se lograron crear un amplio interés en las tecnologías y redes 5G, siendo capaz de observar una gran cantidad de ideas e iniciativas para modernizar el día a día de la gente común, permitiéndoles comunicarse de maneras nunca antes pensadas. Las tecnologías LPWAN y más concretamente NarrowBand-IoT, son redes que actualmente se están estableciendo como las predilectas para la modernización de ciudades.

NarrowBand-IoT a demostrado ser un paso más hacia un futuro donde las comunicaciones inalámbricas estén presentes en todos los ambientes y ciudad del planeta, pudiendo mantener a todo el mundo conectado y comunicado. Se espera que en un futuro, Chile sea capaz de implementar esta tecnologías tanto en sus grandes ciudades como en los lugares más rurales, ya que seria de mucha utilidad en estos últimos, ayudando a mantener en mejores condiciones la plantaciones, de tal modo que se reduzcan la perdidas de estos productos.

En cuanto a las simulaciones realizadas, el principal problema que se observar es lo rígido de la simulación, siendo incapaz de variar los parámetros para crear un escenario un poco mas realista, provocando en muchos caso tener que desechar la idea de variar otros parámetros que podrían influir en los resultados por que traen muchas mas consideraciones al estudio. Si es posible, en un futuro encontrar simuladores que alteren variables como el tamaño de paquetes, para continuar con el estudio.

## 6. Bibliografía

- Miguel Ángel Cassanova González. NB-IoT vs LoRa vs SigFox. Alfaiot. Recuperado de <https://alfaiot.com/blog/ultimas-noticias-2/post/nb-iot-vs-lora-vs-sigfox-1>
- Javier Saiz Miranda (Junio 2019). Estudio en detalle NB-IoT. UOC. Recuperado de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/94946/6/jsaizmiTFM0619memoria.pdf>
- Javier Morales (21 de Septiembre, 2016). Algoritmos de planificación de procesos. Jmoral. Recuperado de <http://jmoral.es/blog/planificacion-procesos>: :text=Empezaremos
- Telecapp C.A. (8 de abril, 2020). Narrowband IoT (NB-IoT) - MasterClass. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=qDHjx7RdoLYt=641s>
- SEMAK S.A. (10 de Julio, 2019). WEBINAR 2: ¿Qué es LTE-M y NB-IoT? Introducción a conceptos técnicos y teóricos. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=9uSiCe-PXHwt=3236s>
- Sergio Martiradonna, Alessandro Grassia, Giuseppe Piroa y Gennaro Boggia. Understanding the 5G-air-simulator: a Tutorial on Design Criteria, Technical Components, and Reference Use Cases. Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Información - Politecnico di Bari, Bari, Italia
- Sergio Martiradonna, Alessandro Grassi, Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco y Gennaro Boggi. An open source platform for exploring NB-IoT system performance. Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Información - Politecnico di Bari, Bari, Italia
- Sergio Martiradonna, Giuseppe Piro y Gennaro Boggia (23 de Julio, 2019). On the Evaluation of the NB-IoT Random Access Procedure in Monitoring Infrastructures. Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Información - Politecnico di Bari, Bari, Italia