



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# **Comunicaciones Máquina-a-Máquina Eficientes en LTE-A, Caso de Estudio: Trenes de Alta Velocidad**

*Autor:* María Gabriela Moyano Jácome

*Director 1:* Miguel Rodríguez Hernández

*Director 2:* Israel Leyva Mayorga

*Fecha de comienzo:* 3/04/2017

*Lugar de trabajo:* Instituto de Aplicaciones de Tecnologías Avanzadas de la Información y  
la Comunicación.



### *Objetivos*

- Modelar el tráfico ofrecido en el canal de acceso aleatorio debido al paso de un tren de alta velocidad.
- Identificar los escenarios en los que puede ocurrir congestión en el canal de acceso de LTE-A debido al paso de un tren de alta velocidad. Por ejemplo, al pasar por un puente o al cruzar dos trenes en dirección contraria.
- Seleccionar un esquema de control de acceso para mejorar el desempeño del canal de acceso aleatorio.

*Metodología* — El presente trabajo consiste en una metodología teórica y práctica. En primer lugar, se efectuó una revisión teórica acerca de la tecnología Machine to Machine (M2M) así como también la tecnología LTE-A, por otra parte, se revisó el procedimiento de acceso aleatorio de LTE-A, aplicándolo al caso de estudio a trenes de alta velocidad. Para posteriormente diseñar y ejecutar un método en el que un tren de alta velocidad pasa a través de un puente activando las transmisiones de un gran número de dispositivos inalámbricos, analizando cuatro escenarios en los cuales se verificará cuántos sensores y a qué velocidad debe ir el tren para evitar congestiones en la comunicación, se ha realizado un gran número de simulaciones para obtener resultados más apegados a un entorno real.

*Desarrollos teóricos realizados* — Como paso inicial para nuestro estudio, se ha efectuado una revisión teórica sobre el procedimiento de acceso aleatorio LTE-A y las oportunidades de acceso aleatorio (RAO), se propusieron y simularon escenarios donde pueden ocurrir congestiones, el estudio brinda una idea de los puntos claves de cómo mejorar en el extenso campo de las comunicaciones máquina a máquina gracias a la ayuda de los resultados obtenidos en las simulaciones desde el punto de vista práctico.

*Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio* — Con base en la recolección de información, se realizaron varias simulaciones de cuatro escenarios, ajustándonos a los requerimientos planteados en el marco teórico en el ámbito del procedimiento de acceso aleatorio LTE-A y las oportunidades de acceso aleatorio (RAO), se realizó, además un análisis de los resultados tanto de la capacidad, periodo de distribución y la probabilidad de éxito para diferentes cargas combinando los distintos valores obtenidos que pueden ser utilizados en un ambiente real.

*Resultados* — Se logró identificar los escenarios de posibles congestiones como el tren al pasar por un puente y al encontrarse dos trenes, donde se determinó que si a un futuro se desea incrementar la cantidad de sensores e ir a una velocidad máxima de 350Km/h la intensidad de tráfico sobrepasaría la capacidad del sistema ocasionando una congestión. Para resolver los problemas de congestión se utilizó el método Access Class Barring (ACB) para tratar la congestión de los escenarios con problemas la cual permite controlar la sobrecarga y así poder prevenir fallos de acceso. Finalmente, para que el ACB funcione se debe cambiar los parámetros de  $P_{acb}$  y  $T_{cb}$  los cuales nos ayudan a controlar a que la intensidad de tráfico este por debajo de la estimada y así poder tener una red sin congestión.

*Líneas futuras* — Promover la generación de desarrollo, partiendo del presente estudio como base para futuros análisis a medida del avance de la tecnología y la manipulación automática por medio de filtros adaptativos de

los parámetros del ACB y evaluación de otros esquemas de control de acceso como el Extended Access Barring (EAB).

*Abstract* — Actualmente, la nueva tecnología de telecomunicaciones conocida como LTE-A va teniendo un crecimiento mayor a nivel mundial. A pesar de que es una tecnología nueva pueden ocurrir fallos uno de esos motivos son los accesos por ranura que pueden sobrepasar la capacidad ya sea de subida o de bajada, esto indicaría que el sistema empieza a tener inconvenientes, ya que para acceder va a necesitar varias transmisiones y su funcionalidad va a ser baja. En este estudio se va a trabajar con los preámbulos (códigos ortogonales) y con las oportunidades de acceso aleatorio (RAO), con lo cual se podrá identificar si dos o más equipo de usuarios (UE) transmiten el mismo preámbulo en la misma RAO, produciendo una colisión. Se da a conocer los posibles escenarios en donde ocurre una congestión utilizando como parte del estudio a trenes de alta velocidad. Mediante el método Access Class Barring (ACB) se propone un mecanismo de control de sobrecarga para prevenir fallos de acceso. Finalmente, se cambian los parámetros de  $P_{acb}$  y  $T_{cb}$  controlando que la intensidad de tráfico este por debajo de la estimada y así poder tener una red sin congestión.

**INDICE**

I.	INTRODUCCIÓN.....	4
I.1.	TECNOLOGÍA M2M.....	4
I.1.1.	ARQUITECTURA.....	4
I.2.	TECNOLOGÍA LTE-A .....	5
I.2.1.	PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO DE LTE-A .....	6
I.2.2.	RANDOM ACCESS OPPORTUNITIES (RAO).....	7
I.2.3.	PREÁMBULOS .....	8
I.3.	ACCESS CLASS BARRING (ACB) .....	9
II.	TRENES DE ALTA VELOCIDAD.....	10
II.1.	SISTEMA DE CONTROL .....	11
II.2.	CARACTERISTICAS TECNICAS .....	11
III.	MÉTODO .....	12
III.1.	ESCENARIOS DE POSIBLES CONGESTIONES .....	12
III.2	CÁLCULO DE RANDOM ACCESS OPPORTUNITIES (RAO).....	15
IV.	RESULTADOS .....	17
I.V.1.	RESULTADOS CON ACB .....	24
V.	CONCLUSIONES.....	31
	BIBLIOGRAFÍA.....	32

## **I. INTRODUCCIÓN**

### *1.1. TECNOLOGÍA M2M*

M2M son las siglas de Machine to Machine, es decir, máquina a máquina. La tecnología o concepto de M2M permite a diferentes aparatos comunicarse de forma autónoma entre ellos, ya sea para transmitir o intercambiar información o para llevar a cabo tareas. [1]

El concepto de “Machine to Machine” se refiere al intercambio de información o comunicación en forma de datos entre dos máquinas remotas. Todo entorno M2M debe contar con los siguientes elementos: las máquinas que se encargan de gestionar la información entre ellas; los dispositivos M2M que se conectan a una máquina remota y proveen de comunicación al servidor; el servidor que gestiona el envío y la recepción de la información, y la red de comunicación por cable o a través de redes inalámbricas.

Estos procesos reducen el tiempo y los costes, y amplían servicios que hasta ahora no teníamos. Esta comunicación se realiza de manera telemática (por la convergencia entre las tecnologías de las Telecomunicaciones y de la Informática) a través de redes privadas e inalámbricas. Estas herramientas aumentan la productividad, automatización, haciéndonos la vida más cómoda y segura.

M2M tiene la capacidad de mejorar los procesos en muchas industrias como las de energía, seguridad pública, salud, automotora, manufactura, entre muchas otras; lo mismo ocurre con las tecnologías de red de acceso que van desde las redes de corto alcance como ZigBee, BlueTooth, RFID hasta redes de gran cobertura como las redes móviles celulares GPRS, UMTS y LTE, o redes satelitales. El alcance geográfico de las aplicaciones M2M no tiene límite, puede ser local como el que utiliza una persona para controlar los electrodomésticos en su hogar, o global en el caso de un sistema de monitorización de fallas en un vehículo que puede circular por todo el territorio nacional o incluso internacional. [2]

#### *1.1.1. ARQUITECTURA*

En la tecnología M2M la estandarización tecnológica tiene un papel indispensable en el desarrollo a largo plazo. La estructura de cinco elementos propuesta por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) forma los tres dominios interrelacionados:

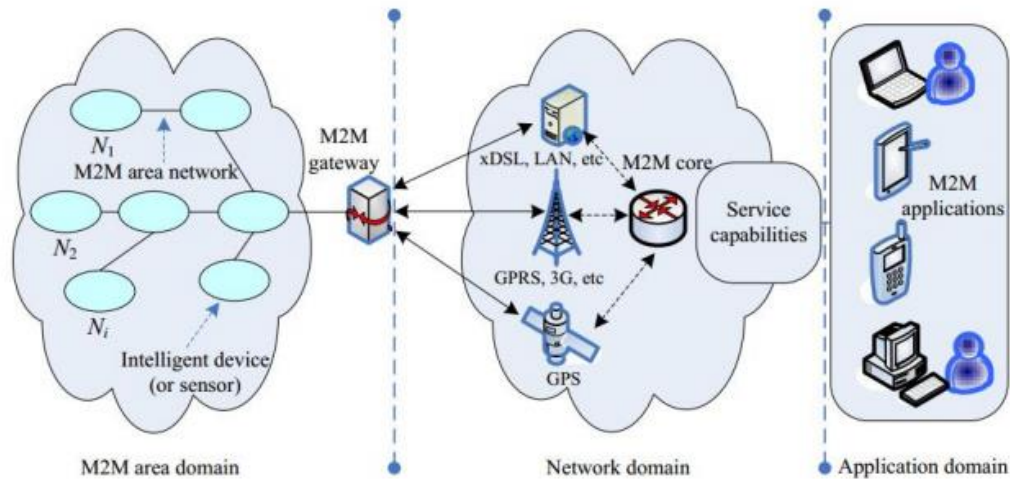


Fig.1. Ilustra los 3 dominios de arquitectura M2M establecidos por el ETSI [3].

- 1. Dominio de área M2M:** Formado por una red de área M2M y una pasarela M2M, que contienen una gran cantidad de dispositivos. Los dispositivos transmiten de manera autónoma los paquetes de datos mediante una topología de red en estrella (single-hop) o multihop.
- 2. Dominio de la red de comunicaciones:** Consta de todo tipo de redes cableadas e inalámbricas (se incluyen todas las redes troncales).
- 3. Dominio de aplicación:** Es el encargado del procesamiento, almacenamiento, y visualización de los datos recolectados. Además, sirve como proveedor de información a una gran cantidad de aplicaciones para el manejo y monitorización remota de datos [3].

## 1.2. TECNOLOGÍA LTE-A

LTE Advanced es un estándar de comunicación móvil y una importante mejora de la evolución a largo plazo del estándar LTE. Fue presentado oficialmente como candidato 4G por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) a finales de 2009 con el cumplimiento de los requisitos de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT-Advanced). Fue estandarizado por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP) en marzo de 2011 como el 3GPP Release 10 [4].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) estableció en 2008 los requisitos oficiales, entre ellos se incluyen, por ejemplo, el del funcionamiento con canales de radio de más de 40 MHz, así como una eficiencia espectral extremadamente alta (con picos de 15 bits por hercio en enlace descendente y de 6.75 en el ascendente).

Dado que ninguna tecnología cumplía estos requisitos, se desarrolló LTE-Advanced (LTE-A) como una ampliación de LTE y como paradigma de lo que debería ser el 4G. LTE-A, en teoría, debe ser capaz de ofrecer altas capacidades de transmisión con anchos de banda de más de 100

MHz obtenidos mediante agregación de canales de 20 MHz, tecnologías de antenas múltiples basadas en MIMO y transmisiones coordinadas multipunto.

Gracias a estas técnicas deberá ser capaz de alcanzar una tasa teórica máxima de 1 Gbps en movilidad de baja velocidad (usuario quieto o a pie) y de 100 Mbps en movilidad de alta velocidad (usuario en vehículo). Más allá de las nuevas capacidades de transmisión, LTE-Advanced permitirá alcanzar nuevas cotas de eficiencia espectral, llegando a picos de 30 bits por hercio en canales de 40 MHz [5].

### 1.2.1. PROCEDIMIENTO DE ACCESO ALEATORIO DE LTE-A

El procedimiento de acceso aleatorio LTE-A se compone de cuatro etapas las cuales son necesarias para poder acceder a la red.

Cuando por primera vez se enciende o se activa un Equipo de Usuario (UE), primero se sincroniza con los canales de enlace descendente LTE decodificando la señal de sincronización primaria y secundaria. Posteriormente el UE decodifica el Master Information Block (MIB), que contiene información sobre la ubicación de las configuraciones de enlace descendente y de enlace ascendente, obteniendo así la información de los bloques independientes de servicio (SIB).

El procedimiento de acceso aleatorio de LTE-A consta de cuatro pasos principales como se muestra en la Fig.2.

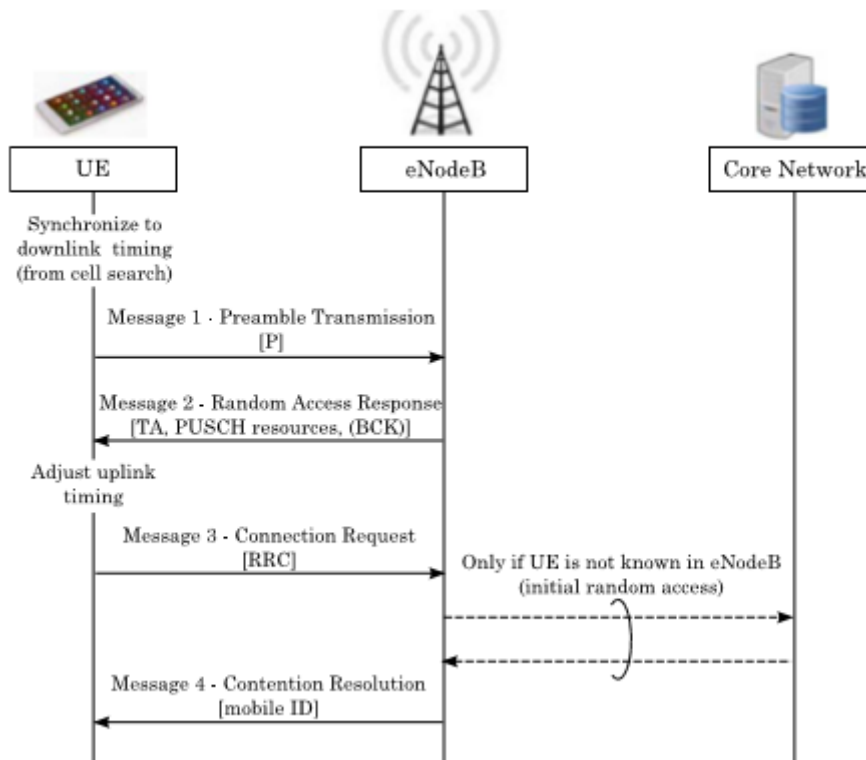


Fig.2. Proceso de acceso aleatorio en LTE-A [6].



1. **Transmisión del preámbulo desde el UE al eNB:** Para iniciar una oportunidad de acceso aleatorio (RAO), el UE va seleccionando aleatoriamente uno de los preámbulos disponibles de entre los 64 existentes y lo envía a la estación base (eNB). Sin embargo, debido a las propiedades ortogonales de los preámbulos, varios UEs pueden acceder al eNB en la misma RAO ocasionando una colisión.
2. **La respuesta de acceso aleatorio desde el eNB al UE:** Después de recibir los preámbulos en el canal físico de acceso aleatorio (PRACH) el cual es utilizado por UE para solicitar una asignación de enlace ascendente desde la estación base, el eNB calcula el perfil de retardo de potencia (PDP). Después de eso, el eNB envía el mensaje de respuesta (RAR) a los UEs decodificados en el control de enlace descendente. Sin embargo, si varios UEs transmiten el mismo preámbulo en la misma ranura RAO, recibirán el mismo mensaje RAR si el eNB no pudo detectar la colisión. Pero para tener un mejor funcionamiento de red se envía una sola respuesta en cada subtrama la cual tendrá un Uplink Grant por cada preámbulo decodificado, teniendo en cuenta que cada mensaje de respuesta tendrá un máximo de 3 Uplink Grants ( $N_u$ ), con lo cual se puede enviar hasta 15 Uplink grants por RAO.  
 Si el UE no recibe ningún Uplink Grant volvería a empezar el procedimiento de acceso aleatorio regresando al paso 1.
3. **Solicitud de conexión de UE a eNB:** Si el UE ya recibe un mensaje RAR correspondiente a la transmisión del preámbulo en el paso 1, se envía el mensaje de petición inicial del Uplink grants especificado en el RAR en el cual se indican los recursos reservados para la transmisión.
4. **Resolución de contienda:** Si el eNB decodifica satisfactoriamente el mensaje de petición de configuración de conexión, enviará el mensaje de resolución de contención al UE. El procedimiento RAO se completa cuando el UE recibe el mensaje de resolución de contención. De lo contrario, el UE asume que falló y los intentos de un nuevo procedimiento RAO comenzarían desde el paso 1. [6]

### *1.2.2. RANDOM ACCESS OPPORTUNITIES (RAO)*

Las oportunidades de acceso aleatorio (RAO), son secuencias periódicas de recursos asignados en tiempo y frecuencia, están reservadas en el canal de enlace ascendente de la red para la transmisión de solicitudes de acceso. En el dominio de tiempo, la duración de cada RAO depende del formato de las peticiones de acceso. En el dominio de la frecuencia, cada RAO ocupa 1.08 Mhz, lo que corresponde al ancho de banda de 6 Bloques de Recursos Físicos (PRBs). El eNB difunde la periodicidad de las RAO mediante una variable denominada índice de configuración RACH (PRACH) físico. La periodicidad varía entre un mínimo de 1 RAO cada 2 tramas, es decir, cada 20ms, y un máximo de 1 RAO por cada subtrama, es decir, cada 1 ms. La Fig.3 ejemplifica algunas

configuraciones RACH, en las que los cuadrados de color representan RAOs donde las solicitudes de acceso pueden ser transmitidas por los dispositivos M2M.

LTE define 64 configuraciones posibles. Es importante señalar que el RACH se asigna en el enlace ascendente y, por lo tanto, el diseño del planificador debe equilibrar la compensación entre la cantidad de oportunidades de acceso que se programarán por trama y la cantidad de recursos disponibles para la transmisión de datos. Esto puede convertirse en un factor crítico en las aplicaciones M2M donde el número de dispositivos solicitantes puede ser muy alto y el ancho de banda disponible está limitado [7].

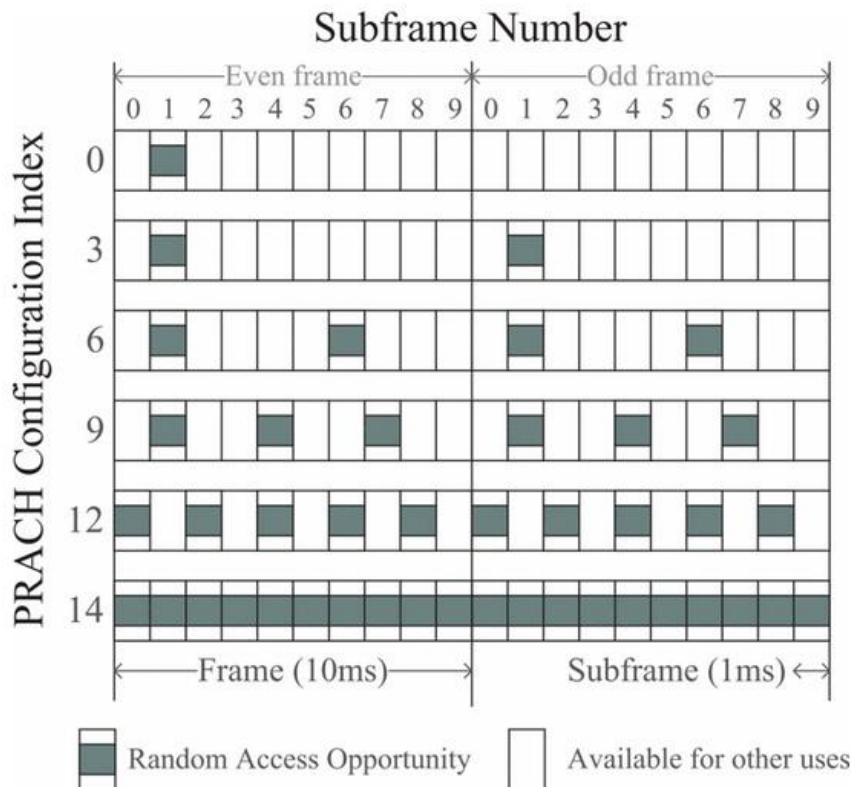


Fig.3. Ejemplos del índice de configuración RACH [7].

### 1.2.3. PREÁMBULOS

El preámbulo tiene un patrón de repetición en el dominio del tiempo, del cual una estación de abonado puede adquirir la temporización de trama y el desplazamiento de frecuencia portadora. Los preámbulos de células vecinas usan un conjunto idéntico de subportadoras que están moduladas con diferentes códigos en el dominio de la frecuencia. A partir de las correlaciones cruzadas con un conjunto de códigos candidatos, la estación de abonado puede monitorizar las señales de preámbulo recibidas para encontrar la mejor célula a la que asociarse. Las simulaciones por ordenador se realizan para verificar los resultados de las sincronizaciones iniciales y la búsqueda de células.

El número total de preámbulos RACH disponibles en LTE es 64. Estos preámbulos son compartidos entre los usuarios para el acceso inicial y la entrega. El acceso a sistemas LTE puede

ser clasificado en base a la reserva o no de preámbulos para acceso. Cuando los usuarios tienen una firma reservada para acceder al sistema, se dice que usan el acceso aleatorio sin restricciones (CFRA).

Por el contrario, cuando los usuarios no tienen una firma reservada para el acceso, se dice que utilizan el acceso aleatorio basado en la limitación. CFRA se utiliza típicamente durante el traspaso. Algunos de los 64 preámbulos normalmente se reservan para el traspaso solamente. Los 64 preámbulos no son comunicados implícitamente a los UEs por el eNodeB, sino más bien, el UE es informado sobre el proceso de cómo generarlos a través de parámetros emitidos en SIB2. Estos parámetros son

- **RootConfigurationIndex**

En LTE, hay 838 raíces Zadoff-Chu secuencias disponibles para preámbulos. La longitud de cada secuencia raíz es 839. RootConfigurationIndex, informa al UE a través de SIB2 qué secuencia se va a utilizar.

- **ZeroCorrelationZoneConfig**

Una secuencia raíz puede generar varios preámbulos por cambio cíclico. Se necesitan una o más secuencias de raíz para generar todos los preámbulos en una célula. El UE comienza con el índice raíz difundido y aplica cambios cíclicos para generar preámbulos. ZeroCorrelationZoneConfig apunta a una tabla donde se obtiene el cambio cíclico.

Cuanto más pequeño sea el desplazamiento cíclico, más preámbulos pueden ser generados a partir de una secuencia raíz [8].

### *1.3. ACCESS CLASS BARRING (ACB)*

En LTE-Advanced, entre los diversos métodos propuestos para mejorar la operación RACH basada en contención, el 3GPP adopta la Access Class Barring (ACB) como un mecanismo adicional de control de sobrecarga para prevenir fallas de acceso. En caso de sobrecarga de red, el eNodeB difunde a las diferentes clases de tráfico un conjunto de parámetros relacionados con ACB, como parte de la información del sistema, esto incluye un factor de tasa de restricción y un temporizador de restricción para el retroceso.

Cada dispositivo realiza un ensayo de Bernoulli para determinar si está prohibido o no, basado en el valor de la tasa de restricción. El esquema ACB y sus modificaciones subsiguientes, por ejemplo, ACB dinámico para restricción adaptativa y ACB extendida para la priorización de retrasos, se basan en períodos de retroceso para dispersar los intentos simultáneos de acceso en el tiempo y aliviar la congestión [9].

Cuando se inicia el procedimiento de acceso aleatorio, la eNB transmite un parámetro ACB entre [0, 1], a los dispositivos que proporcionan comunicaciones tipo máquina (M2M). Cada dispositivo M2M activo (el dispositivo M2M que intenta enviar una solicitud a la eNB) también genera un número aleatorio, si el número generado es menor que el transmitido por la eNB. Entonces el dispositivo M2M activo procede al acceso aleatorio, de lo contrario, el dispositivo M2M activo permanecerá bloqueado por una duración de restricción de tiempo. Por lo tanto, la eNB puede controlar la congestión estabilizando el sistema para maximizar el rendimiento.

En las redes celulares existentes, cada dispositivo M2M se conectará a una eNB. En LTE-Advanced, cada dispositivo M2M sólo puede enviar solicitudes (acceso) a la eNB a la que está conectado el dispositivo M2M. Por lo tanto, en la ACB ordinaria, cada BS determina individualmente el parámetro ACB necesario para la estabilización individual en cada "célula" (formada por una eNB). Sin embargo, si una congestión severa ocurre en una célula, la eNB puede fijar un valor extremadamente bajo, que da lugar a un retardo de acceso inaceptable experimentado por los dispositivos M2M. Como resultado, en la ACB ordinaria, el retraso no es mejorado en absoluto [10].

La ACB se realiza en la capa terminal del Radio Resource Control (RRC). Basándose en la información de velocidad de restricción transmitida por la red, el terminal determina si se permite transmitir la solicitud de conexión basada en su clase de acceso (CA). Además, hay dos tipos de transmisiones de paquetes de datos controlables con la transmisión ACB de la solicitud de conexión para llamadas generales de paquetes y llamadas de emergencia.

## II. TRENES DE ALTA VELOCIDAD

AVE es la marca comercial utilizada por la compañía ferroviaria española Renfe Operadora para sus trenes de alta velocidad de mayor gama. Son trenes que circulan a una velocidad máxima de 350 km/h por líneas de ancho internacional (1.435 mm) electrificadas a 25 kV y 50 Hz en recorridos de larga distancia [11].



Fig.4. Tren de alta velocidad.

## II.1. SISTEMA DE CONTROL

Para el estudio realizado en el presente TFM se ha tomado como referencia los valores de los trenes de la serie 103. El tren de la serie 103 está equipado con un sistema de señalización según el Sistema de Gestión de Tráfico Ferroviario Europeo (ERTMS) niveles 1 y 2, con un sistema compatible con la influencia lineal del tren (LZB) y que le permitirá circular a altas velocidades. Todas las funciones del tren están gestionadas por un sistema integrado que recoge, trata y transmite los datos, lo que permite simplificar y acelerar las tareas de mantenimiento, y obtener todos los datos de funcionamiento e incidencias del tren. Estos datos se transmiten vía telefonía móvil al centro de mantenimiento, de modo que se puedan prever con antelación las tareas a realizar para su mantenimiento o reparación [11].

## II.2. CARACTERISTICAS TECNICAS

Las características más comunes en los trenes de alta velocidad para que puedan funcionar bien a sus altas velocidades y dar un mejor servicio a todos sus usuarios se muestra en la tabla 1. De los datos de la tabla 1, en este TFM se van a utilizar los referentes a velocidad, longitud y número de sensores.

Ya que son trenes de alta velocidad necesitan bogies que son un conjunto de pares de ruedas montadas sobre ejes paralelos formando un carretón. La evolución de dichos elementos ha sido consecuencia, en la mayoría de los casos, de la aparición de la Alta Velocidad y el propósito de no aumentar los esfuerzos verticales y, consecuentemente, el deterioro de la vía [11].

Composición mínima	Ochos coches
Composición múltiple	Dos composiciones
Ancho de vía	1.435 mm
Estructura de la caja	Aluminio
Velocidad máxima (km/h)	350 km/h
Plazas sentadas por unidad	404/405
Motores de tracción	16 asíncronas
Aceleración (0 a 320 km/h)	380 s
Nº de bogies	16
Sistema de señalización	ERTMS niveles 1 y 2, ASFA, STM de LZB
Longitud total del tren	200 m
Longitud de coches extremos	25.675 m
Longitud de coches intermedios	24.775 m
Altura	3.890 m
Sensores	3000

Tabla 1: Características del tren.

### III. MÉTODO

Actualmente, la nueva tecnología de telecomunicaciones conocida como LTE-A va teniendo a nivel mundial un crecimiento mayor, por tal motivo los operadores desarrollan su capacidad para ofrecer los mejores beneficios que trae dicha tecnología. Aunque LTE-A es una tecnología nueva que ofrece grandes beneficios que por sus características funciona al 100% siempre y cuando no haya congestiones. A pesar de que es una tecnología nueva pueden ocurrir fallos, uno de esos motivos son los accesos por ranura que pueden sobrepasar la capacidad ya sea de subida o de bajada esto indicaría que el sistema va mal ya que para acceder va a necesitar muchas transmisiones y su funcionalidad va a ser baja. Esta tiene limitaciones ya que el sistema cuenta con diversos recursos, uno de ellos son los preámbulos (códigos ortogonales) los cuales se envían a las estaciones base.

Posteriormente se ponen en marcha las oportunidades de acceso aleatorio (RAO) que son recursos de frecuencia de tiempo en los que se permiten transmisiones de preámbulos. Cada UE selecciona aleatoriamente uno de los preámbulos disponibles y lo envía al eNB. Debido a la ortogonalidad de los diferentes preámbulos, múltiples UEs pueden acceder al eNB en el mismo RAO usando diferentes preámbulos. Este estudio supone que, si dos o más UE transmiten el mismo preámbulo en la misma RAO, en este punto se produce una colisión. El eNB analiza los preámbulos recibidos y a través del Uplink grants (Nu) envía una respuesta a los UEs.

En consecuencia, el 3rd Generation Partnership Project (3GPP) menciona un escenario particular en el que un tren de alta velocidad pasa a través de un puente activando las transmisiones de un gran número de dispositivos inalámbricos [12]. Partiendo del escenario que menciona 3GPP se analizara tres escenarios más, en los cuales se verificara cuántos sensores y a qué velocidad debe ir el tren ya que en estos escenarios es donde existe una congestión.

#### *III.1. ESCENARIOS DE POSIBLES CONGESTIONES*

Con la nueva tecnología de comunicación de máquina a máquina es muy importante que todo esté conectado, enviando y recibiendo información de forma eficiente.

En este estudio la fiabilidad en la transmisión de la información es especialmente importante que los sensores envíen información y que toda esta información llegue completa con el objetivo de prevenir algún inconveniente por el recorrido del tren.

Como se mencionó anteriormente la tecnología óptima para comprobar si hay una congestión es LTE-A ya que por sus características se puede verificar cuántos sensores o a qué velocidad debe ir el tren para que no haya una congestión.

Los escenarios que se proponen a continuación son escenarios donde puede ocurrir una congestión de red. Tomando en cuenta que en este estudio se incluye el escenario que nombra el estándar 3GPP.

### Escenario 1

- Un solo tren transmitiendo a diferentes velocidades: Como se muestra en la Fig.5, los trenes de alta de velocidad van hasta los 350 km/h y con esta velocidad es muy probable que al pasar por una radio base no se demore más que un par de segundos y en estos segundos los miles de sensores que hay en el tren deben transmitir sin ningún inconveniente, para verificar, se toma muestras de intervalos de 50km/h para comprobar si en los cambios de velocidad generan congestión de red.



Fig.5. Tren viajando a distintas velocidades.

### Escenario 2

- Dos trenes transmitiendo al mismo tiempo: Como se muestra en la Fig.6, al pasar un solo tren junto a una radio base a altas velocidades y con miles de sensores transmitiendo uno tras otro, puede haber colisión, pero más aún cuando en los mismos segundos se doble el número de sensores que van a transmitir esto puede pasar cuando por la misma estación base eNB pase otro tren.

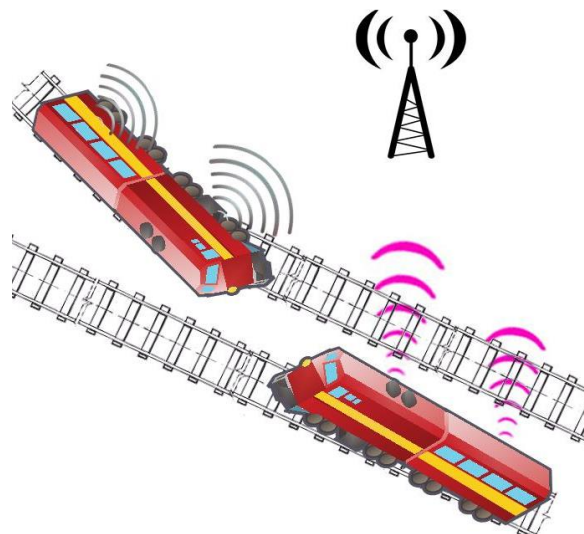


Fig.6. Dos trenes transmitiendo.

### Escenario 3

- Un tren al pasar por un puente: Como se muestra en la Fig.7, en este caso el puente como el tren tiene miles de sensores. Al pasar el tren por el puente los sensores del puente se activan y empiezan a transmitir el mismo instante que los sensores del tren, doblando así la información que está recibiendo la estación base (eNB) pudiendo provocar una congestión.

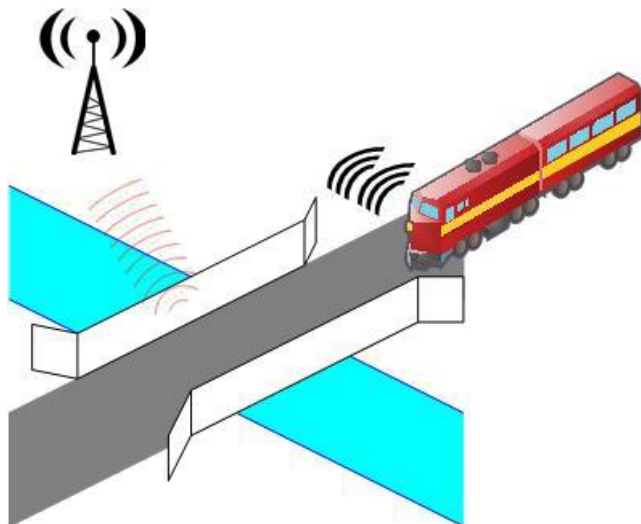


Fig.7. Tren pasando por un puente.

### Escenario 4

- Primer vagón con más sensores que los demás vagones: Como se muestra en la Fig.8, al pasar por la radio base más cercana el primer vagón es el primero que entra en contacto para transmitir. Si el primer vagón tiene más sensores que los demás, puede haber la posibilidad que la estación base al estar recolectando la información del primer vagón este saturada y no se permita que la información de los demás vagones no se reciba adecuadamente.

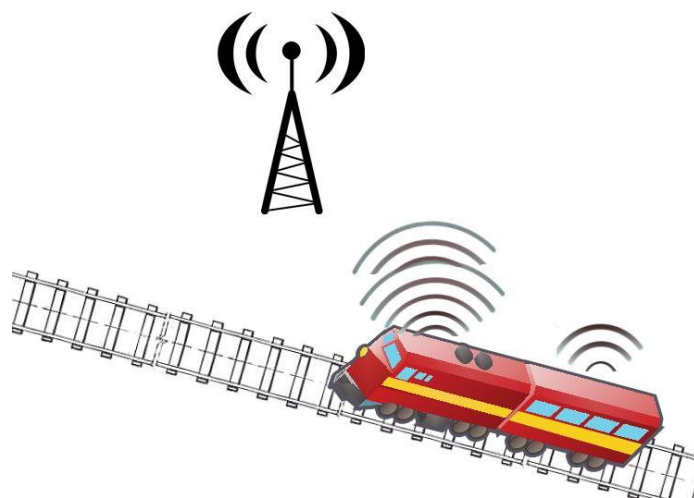


Fig.8. Primer vagón con más sensores.



### III.2 CÁLCULO DE RANDOM ACCESS OPPORTUNITIES (RAO)

Para estos escenarios se hace uso de la ecuación 1 que depende tanto de las velocidades del tren y de la longitud, esto se llevara a cabo para obtener el tiempo en milisegundos (ms) y los periodos de distribución necesarios para cada escenario propuesto.

$$V = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que, si falla la transmisión del preámbulo o no se ha alcanzado el número máximo de transmisiones de preámbulo, se espera un tiempo aleatorio de 0 a 20 ms, y luego se realiza una nueva transmisión de preámbulo en el siguiente RAO, con lo consiguiente los UE sólo tienen conocimiento de una transmisión fallida de preámbulo si no se ha recibido ninguna concesión de enlace ascendente al final de la ventana RAR.

Los preámbulos de acceso aleatorio son las secuencias de bits ortogonales, denominadas firma digital, utilizadas por los UE para iniciar el intento de RA. Los preámbulos RA se generan desplazando cíclicamente una secuencia raíz, de tal manera que cada preámbulo es ortogonal entre sí. Hay un total de 64 preámbulos que se dividen inicialmente en dos grupos, es decir, preámbulos RA libres de contención y los preámbulos RA basados en contención. El eNB reserva algunos preámbulos, para RA libre de contención, y asigna preámbulos distintos a diferentes UEs.

En la tabla 2 se detallan todos los valores utilizados para llevar a cabo los cálculos. Teniendo en cuenta que con el tren que se va a trabajar es un tren muy común hoy en día en su longitud y su velocidad, mientras que la longitud del puente es un promedio de los puentes más comunes que existen [13].

<b>Longitud del tren (d)</b>	200 m
<b>Longitud del puente (d)</b>	75 m
<b>Velocidades (V)</b>	100, 150, 200, 250, 300, 350
<b>Total sensores tren</b>	3000
<b>Total sensores puente</b>	1000

Tabla 2: Valores para los cálculos propuestos.

Los valores del total de sensores del tren y puente por el sistema que tienen hoy en día implementado se toma como base para estimar en un futuro el número de sensores que tendrán. Por tal motivo para este estudio se toma en cuenta el número de sensores que se tiene en la actualidad.

A continuación, en la tabla 3 se muestran los valores obtenidos, por la ecuación (1) que corresponden al tiempo que tarda el tren al entrar a transmitir en la radio base más cercana, y el periodo de distribución que se obtiene en RAOs.

Escenarios	Tiempo (ms)	Periodo de distribución dado en RAOs
<u>Escenario 1</u>		
V=100	7200	1440
V=150	4800	960
V=200	3600	720
V=250	2880	576
V=300	2400	480
V=350	2057	411
<u>Escenario 2</u>	2400	480
<u>Escenario 3</u>		
Tren	2400	480
Puente	900	180
<u>Escenario 4</u>		
Primer vagón	300	60
Segundo vagón	600	120

Tabla 3: Valores del tiempo que tarda el tren.

Con los datos obtenidos en el apartado anterior con un número máximo de sensores, se han realizado simulaciones para obtener la probabilidad de éxito de acceso, número medio de transmisiones de preámbulo y retardo medio de acceso. La cual para poder obtener datos más confiables se realiza el cálculo para una y 100 simulaciones. Obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 4 y 5.

UNA SIMULACIÓN				
Escenarios	Probabilidad de acceso	Número medio de transmisiones de preámbulo	Retardo medio de acceso	
1	V=100	1	1.5020	26.9697
	V=150	1	1.5140	27.1723
	V=200	1	1.5860	28.7377
	V=250	1	1.6170	29.5167
	V=300	1	1.6807	31.2517
	V=350	1	1.7397	32.5687
2	0.9988		2.3032	44.7836
3	1		1.8863	35.7757
4	1		1.5987	28.8981

Tabla 4: Una simulación de transmisión.

Para realizar las pruebas de los escenarios 2, 3 y 4 se tomó la velocidad estándar de 300km/h.

100 SIMULACIONES			
Escenarios	Probabilidad de acceso	Número medio de transmisiones de preámbulo	Retardo medio de acceso
1	V=100 1	1.4895	26.6061
	V=150 1	1.5284	27.5231
	V=200 1	1.5685	28.5127
	V=250 1	1.6151	29.6227
	V=300 1	1.6605	30.7160
	V=350 1	1.7196	32.0631
2	0.9994	2.2631	43.9868
3	0.9999	1.8963	35.9666
4	0.9998	2.0253	38.7625

Tabla 5: 100 simulaciones de transmitiendo.

La capacidad del sistema se define como el máximo número medio de accesos satisfactorios que se pueden obtener por RAO. Esto a su vez define la intensidad de tráfico máxima que el sistema puede atender adecuadamente [14].

En relación al cálculo de la capacidad quien nos indica los puntos máximos de accesos promedios se puede obtener el número máximo esperado de accesos satisfactorios por RAO, con el número de preámbulos  $R$ , y el número de Uplink Grants disponibles por RAO, esto se realiza mediante la ecuación 2 así se podrá saber cuántos accesos de sensores por RAO es capaz de soportar el canal de subida. Mientras que la ecuación 3 define la capacidad del sistema, la cual está dada por el mínimo entre la capacidad de subida ( $c$ ) y la de bajada.

$$c = \left[ \log \left( \frac{R}{R-1} \right) \right]^{-1} \left( 1 - \frac{1}{R} \right)^{\left[ \log \left( \frac{R}{R-1} \right) \right]^{-1} - 1} \quad [15] \quad (2)$$

$$C = \min\{N_u, c\} \quad (3)$$

#### IV. RESULTADOS

En este capítulo se lleva a cabo el análisis de los resultados tanto de la capacidad, periodo de distribución y la probabilidad de éxito para diferentes cargas. Los resultados obtenidos se realizaron utilizando la herramienta Matlab, combinando los distintos valores obtenidos en los apartados anteriores. Dicha herramienta es similar a la utilizada en el estudio realizado por I. Leyva [16].

Esta herramienta se manejó a base de simulaciones, en ella podemos ir comprobando que los datos ingresados tengan una diferencia significativa entre las diferentes velocidades y preámbulos utilizados, y así se puede obtener una modelización más concreta del tráfico. Donde un periodo de

distribución es el espacio de tiempo donde los sensores empiezan su transmisión realizando así su primer intento de acceder al sistema en este caso al eNB.

En esta parte del cálculo se obtienen un máximo de accesos promedios que se pueden obtener por ranuras. Por tanto, para el cálculo de la capacidad se trabaja con los preámbulos 54 y 27.

Así se podrá saber cuál es la limitante tanto para subida como para bajada, teniendo en cuenta que para los preámbulos de 54 se tiene una capacidad de 20.0523 y el número de Uplink Grant es de 15 con esto se puede decir que la capacidad total es de 15, de tal manera se prueba el sistema con una unidad por debajo de la capacidad, una justo al igual de la capacidad y una unidad por arriba de la capacidad, el mismo procedimiento es cuando se tiene 27 preámbulos con una capacidad de 10.12 y el número de Uplink Grant es de 15 con una capacidad total de 10.

Las tablas 6 y 7 muestran el número máximo de sensores que generan una intensidad de tráfico.

<b>UNA SIMULACIÓN/ PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	480	7680	0.9134	3.9361	78.8476
15	480	7200	0.9529	3.5282	70.0684
14	480	6720	0.9890	2.8417	55.9642
<b>UNA SIMULACIÓN/ PREÁMBULO 27</b>					
11	480	5280	0.2928	5.2671	104.5142
10	480	4800	0.4677	4.9938	98.8570
9	480	4320	0.8380	4.0367	79.4856

Tabla 6: Número de sensores máximos.

<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	480	7680	0.9126	3.9210	78.0676
15	480	7200	0.9625	3.4335	68.2150
14	480	6720	0.9925	2.8091	55.3411
<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 27</b>					
11	480	5280	0.3204	4.8774	96.6665
10	480	4800	0.4865	4.7836	94.6616
9	480	4320	0.8331	4.2699	84.2085

Tabla 7: Número de sensores máximos.

Como se puede verificar en las tablas 6 y 7 que cuando se tiene un número de sensores que equipara con la intensidad de tráfico la probabilidad de acceso se mantiene un nivel muy alto para el preámbulo de 54 mientras que para el preámbulo de 27 su probabilidad de acceso es baja.

Mientras cuando se dobla la cantidad de sensores la probabilidad de acceso disminuye considerablemente como se muestra en las tablas 8 y 9. Esto está relacionado con nuestros escenarios 2 y 3 ya que estos en cualquier momento puede variar de sensores uno del otro, así que este análisis se realiza duplicando los sensores.

<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
32	480	15360	0.0705	5.3657	108.2909
30	480	14400	0.0988	5.2966	106.4125
28	480	13440	0.1161	5.4042	108.2992
<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 27</b>					
22	480	10560	0.0302	5.4013	108.5862
20	480	9600	0.0315	5.4238	109.0563
18	480	8640	0.0486	5.5429	112.8619

Tabla 8: Una simulación con doble de sensores.

<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
32	480	15360	0.0714	5.1895	104.5886
30	480	14400	0.0906	5.2960	106.2831
28	480	13440	0.1171	5.2650	105.4180
<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 27</b>					
22	480	10560	0.0277	6.3520	130.3048
20	480	9600	0.0363	5.7062	116.1544
18	480	8640	0.0503	5.5605	112.2447

Tabla 9: 100 simulaciones con doble de sensores.

En otro punto al hablar del escenario que propone 3GPP al pasar un tren por un puente en este caso como se mencionó anteriormente se trabajó con un puente de longitud de 75 m y 1000 sensores, tomando en cuenta que la intensidad de tráfico mostrada corresponde a la intensidad de tráfico pico, que ocurre durante los primeros instantes i.e. entre los 0 a los 75 m.

Se calculó un nuevo periodo de distribución para los primeros 75m del tren el cual es de 180 RAOs, este nos sirve para verificar el total de sensores que habría en el momento en el que el tren va a pasar por un puente de 75 m y es aquí donde primero empezaran a transmitir al mismo instante que el puente los sensores que estén en los primeros 75m de longitud del tren, donde se verificara si habría un colapso de red ya que al entrar el tren en el puente los dos empiezan con la transmisión. Como se muestra en las tablas 10 y 11 la probabilidad de acceso está dentro de un rango que satisface a los UEs.

<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores en los 200 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	180	5013	0.9733	2.7553	54.0712
15	180	4533	0.9884	2.5304	49.3792
14	180	4053	0.9972	2.2455	43.4471
<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 27</b>					
11	180	2613	0.6954	3.1163	60.5032
10	180	2133	0.8178	3.1466	61.0999
9	180	1653	0.9668	2.9004	55.9922

Tabla 10: Escenario 3, 100 simulaciones.

<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores en los 200 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	180	5013	0.9790	2.7566	54.0904
15	180	4533	0.9928	2.4728	48.0734
14	180	4053	0.9992	2.1113	40.6968
<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 27</b>					
11	180	2613	0.6720	2.9860	57.7006
10	180	2133	0.7922	3.0919	59.8662
9	180	1653	0.9691	2.7472	52.8993

Tabla 11: Escenario 3, Una simulación.

Mientras que en la tabla 12 y 13 nos indica que en un futuro puede ocurrir que al doblar el número de sensores que tendría tanto el tren como el puente, habría un problema en la red y esto ocasionaría que no sea satisfactorio el procedimiento de acceso aleatorio.

<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores en los 200 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
32	180	10026	0.2264	5.3838	107.7404
30	180	9066	0.3393	5.1081	102.0460
28	180	8106	0.5134	4.8862	97.4314
<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 27</b>					
22	180	5226	0.1752	5.3300	105.7406
20	180	4266	0.3908	4.8455	96.411
18	180	3306	0.6191	3.1928	62.3473

Tabla 12: Doble de sensores, Una simulación.

<b>100 SIMULACIÓN / PREÁMBULO 54</b>					
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Numero de Sensores en los 200 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
32	180	10026	0.2235	5.5319	110.3210
30	180	9066	0.3326	5.2921	105.4872
28	180	8106	0.5189	4.8975	97.7540
<b>100 SIMULACIÓN / PREÁMBULO 27</b>					
22	180	5226	0.1818	5.2929	105.1296
20	180	4266	0.4122	4.1142	81.4872
18	180	3306	0.6016	3.0848	60.0308

Tabla 13: Doble de sensores, 100 simulaciones.

En las tablas 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos para el escenario 4. Donde se calculó un nuevo periodo de distribución para los 25m del primer vagón el cual es de 60 RAOs, este nos sirve para verificar el total de sensores que habría en el momento en el que el primer vagón del tren va a entrar a la zona de transmisión y es aquí donde primero empezaran a transmitir los primeros sensores del primer vagón y mientras siga circulando el tren se ira transmitiendo los demás sensores de los demás vagones, donde se verificara si habría un colapso de red.

<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 54</b>						
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Número de Sensores total del tren</b>	<b>Numero de Sensores en los 25 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	60	7680	960	0.6780	4.3516	86.8469
15	60	7200	900	0.7454	3.9331	78.3710
14	60	6720	840	0.8065	3.3159	65.6100
<b>UNA SIMULACIÓN / PREÁMBULO 27</b>						
11	60	5280	660	0.1964	5.6809	112.7551
10	60	4800	600	0.3035	5.6122	111.6911
9	60	4320	540	0.5507	4.7091	93.2497

Tabla:14 Escenario 4, Una simulación.

<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 54</b>						
<b>Intensidad de Tráfico</b>	<b>Periodo de distribución dado en RAOs (300km/h)</b>	<b>Número de Sensores total del tren</b>	<b>Numero de Sensores en los 25 m del tren</b>	<b>Probabilidad de acceso</b>	<b>Número medio de transmisiones de preámbulo</b>	<b>Retardo medio de acceso</b>
16	60	7680	960	0.6825	4.3727	87.4197
15	60	7200	900	0.7493	3.8619	77.0012
14	60	6720	840	0.8022	3.4432	68.3101
<b>100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 27</b>						
11	60	5280	660	0.2077	5.4947	109.3572
10	60	4800	600	0.3091	5.4584	108.3858
9	60	4320	540	0.5142	4.7485	94.1655

Tabla 15: Escenario 4, 100 simulación.

El primer análisis está enfocado en el parámetro de distintas velocidades de transmisión, como se muestra en la Fig.9 el período de distribución con respecto a la velocidad del tren.

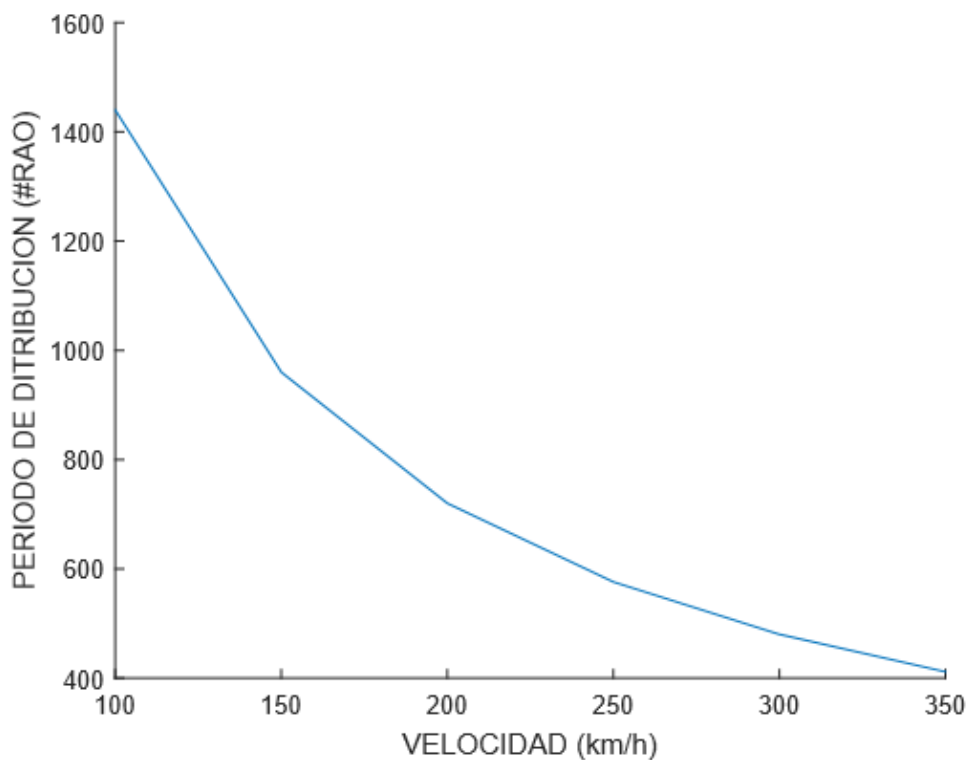


Fig.9. Período de distribución según la velocidad del tren.

Tras evaluar los resultados se verifica que mientras el tren vaya aumentando la velocidad el periodo de distribución va ir disminuyendo esto nos indica que el espacio de tiempo que tienen para acceder al sistema disminuye.



En el segundo análisis se evalúa un número aproximado de sensores a distintas velocidades como se muestra en la Fig.10. las llegadas de RAO dependen del número de sensores que van a diferentes velocidades

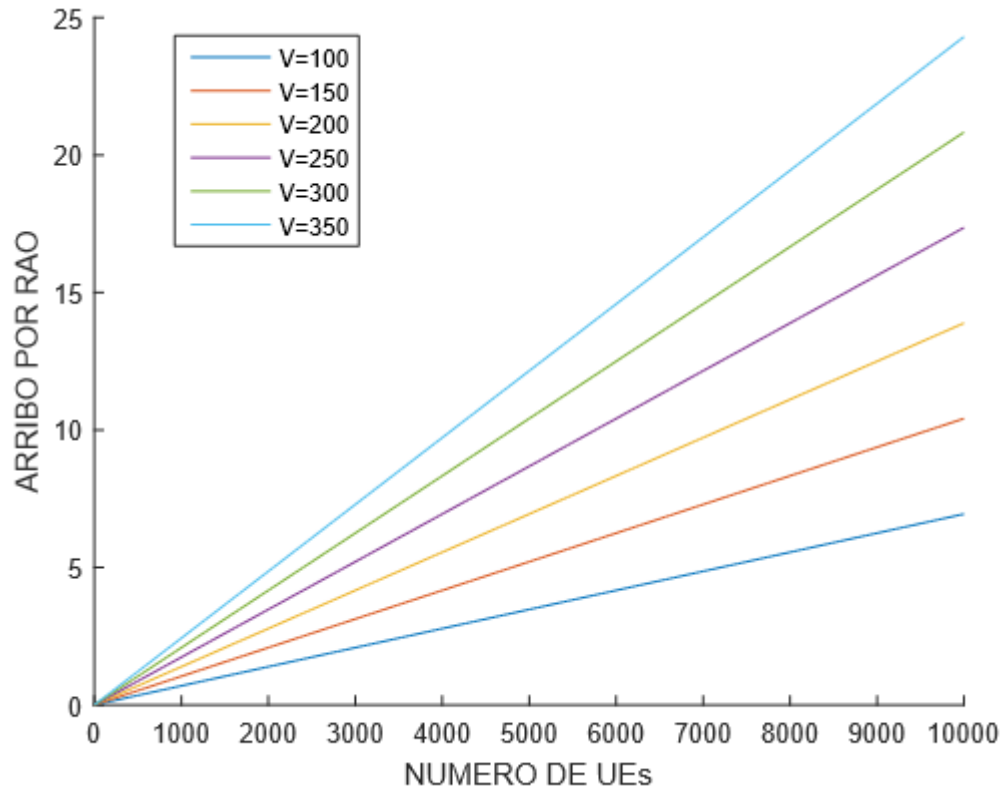


Fig.10. Intensidad del tráfico (llegadas por RAO) para diferentes números de dispositivos desplegados y velocidades del tren.

En esta gráfica se puede argumentar lo dicho anteriormente que a distintas velocidades y al tener un doble de sensores con los que se trabajó inicialmente (3000 sensores) la intensidad de tráfico o arribos por RAO va a ir sobrepasando nuestra capacidad limitante. Teniendo en cuenta que si en futuro se desea colocar más sensores en este caso unos 10000 sensores a una velocidad de 350km/h la intensidad de tráfico sobre pasa a 25.

Tercer análisis como se muestra en la Fig. 11, se muestra la probabilidad de acceso con respecto a la intensidad de tráfico para 1 y 100 simulaciones.

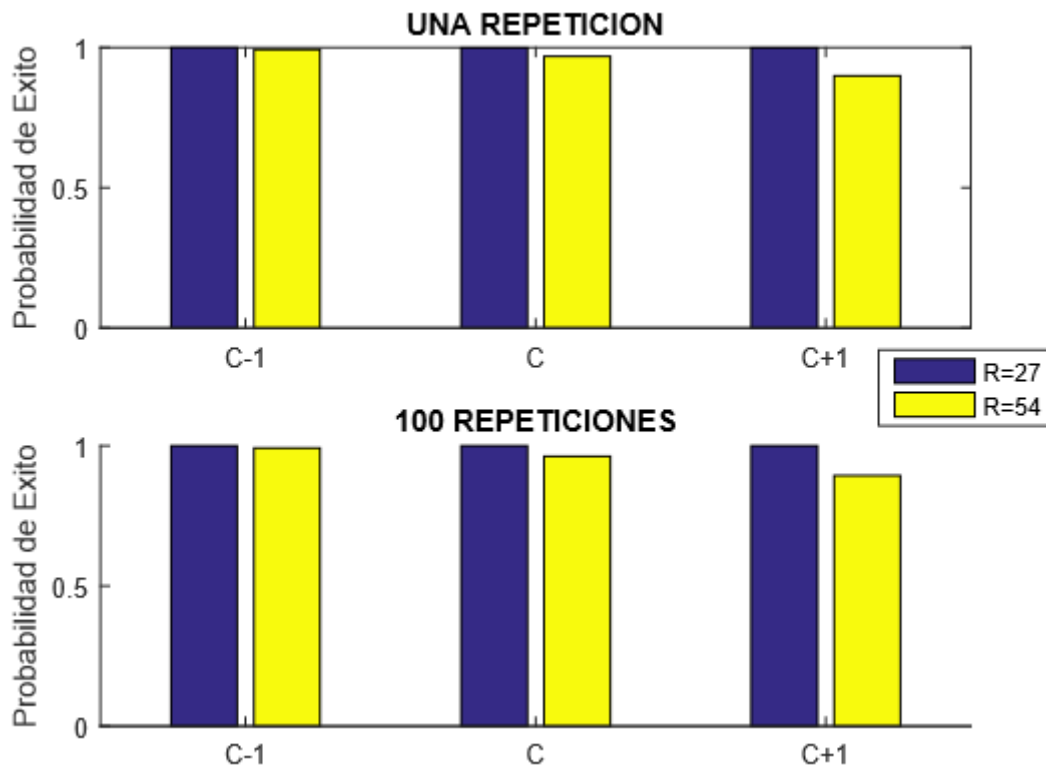


Fig.11. Probabilidad de éxito para diferentes cargas de tráfico.

Para llevar a cabo un estudio más minucioso de la capacidad del canal se realiza no sola una vez la simulación sino 100 simulaciones con lo cual se puede mostrar que los resultados obtenidos varían muy poco. Por lo tanto, no es necesario realizar miles de simulaciones para obtener resultados confiables,

Una vez finalizado estos análisis se puede adquirir una visión más precisa y realista al problema mencionado anteriormente, entendiendo las prestaciones que ofrece la tecnología, además el uso de distintos cálculos para verificar la capacidad, funcionamiento para poder mejorar si es que existe una congestión o no.

#### *1.V.1. RESULTADOS CON ACB*

Como último caso se incluyó el sistema ACB el cual nos ayudara a controlar la sobrecarga en la red de acceso de los distintos escenarios presentados.

Para realizar las siguientes pruebas se tomó en cuenta la velocidad de 300km/h ya que esta es una velocidad muy común en los trenes de alta velocidad, mientras que los valores de los sensores irán variando dependiendo de cada escenario presente.

Los escenarios donde se aplica el ACB son los escenarios donde habrá más problemas de congestión. Con lo cual se va a probar el Barring Rate ( $P_{acb}$ ) que se define como la probabilidad de

no retrasar el acceso y el Barring Time (Tacb) que es el tiempo medio que se retrasará el acceso en ms.

Las pruebas se realizaron para 100 simulaciones. En la Tabla 16 se muestra los valores de los escenarios con posibles congestiones y los cambios que ocurren con el Pacb y el Tacb.

100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 54							
Escenarios	Intensidad de tráfico	Pacb	Tacb	Número de Sensores	Probabilidad de acceso	Número medio de transmisiones de preámbulo	Retardo medio de acceso
1	20	1	4e3	9600	0.4519	4.9168	98.0736
		0.7	4e3		0.9962	2.3367	1.7700e3
	15	1	4e3	7200	0.9705	3.3439	66.3719
		0.9	1e3		0.9981	2.3732	490.8661
	10	1	4e3	4800	1	1.8832	35.8443
		0.7	4e3		1	1.6153	1.7384e3
2	40	1	4e3	19200	0.0342	5.2782	107.9454
		0.6	4e3		0.5283	2.5006	5.1452e3
	30	1	4e3	14400	0.0904	5.4666	109.7389
		0.7	4e3		0.5582	3.1471	3.1043e3
	20	1	4e3	9600	0.4483	5.1416	102.5569
		0.7	4e3		0.9961	2.3481	1.7624e3
3	20	1	4e3	Tren=6933	0.7688	3.7595	74.7841
		0.7	4e3	Puente=1000	0.9987	1.9987	1.7579e3
	15	1	4e3	Tren=4533	0.9918	2.4651	48.0265
		0.9	4e3	Puente=1000	0.9993	2.0313	486.3405
	10	1	4e3	Tren=2133	1	1.7504	32.7622
		0.9	4e3	Puente=1000	1	1.6705	473.7964

Tabla 16: Pruebas del ACB en 54 preámbulos.

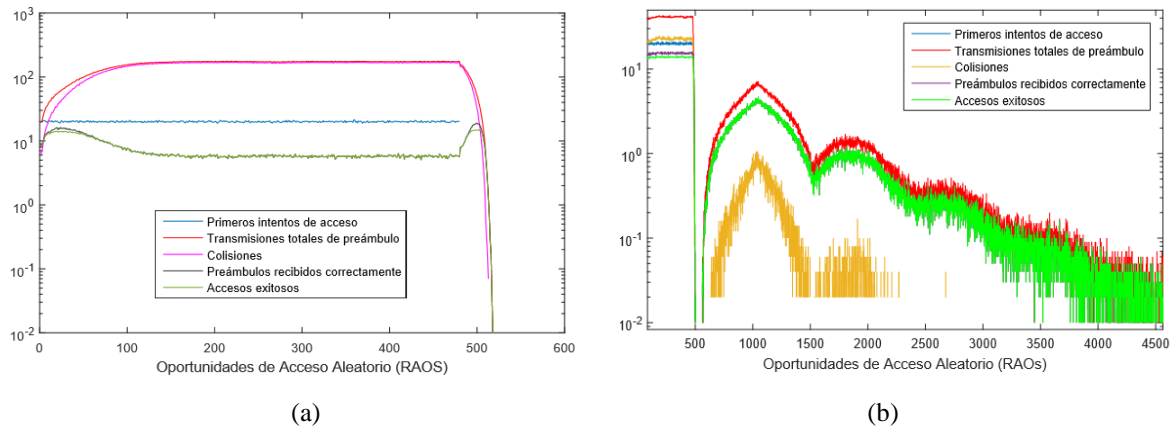


Fig.12 Escenario 1 con intensidad de tráfico de 20.

Como se puede observar en la Fig.12 (a) teniendo una intensidad de tráfico de 20 la probabilidad de acceso es muy baja, mientras que en la Fig.12 (b) al cambiar el Pacb menor que uno se obtuvo una intensidad de tráfico de 14 se verifica que la probabilidad de acceso mejora en un 60%.

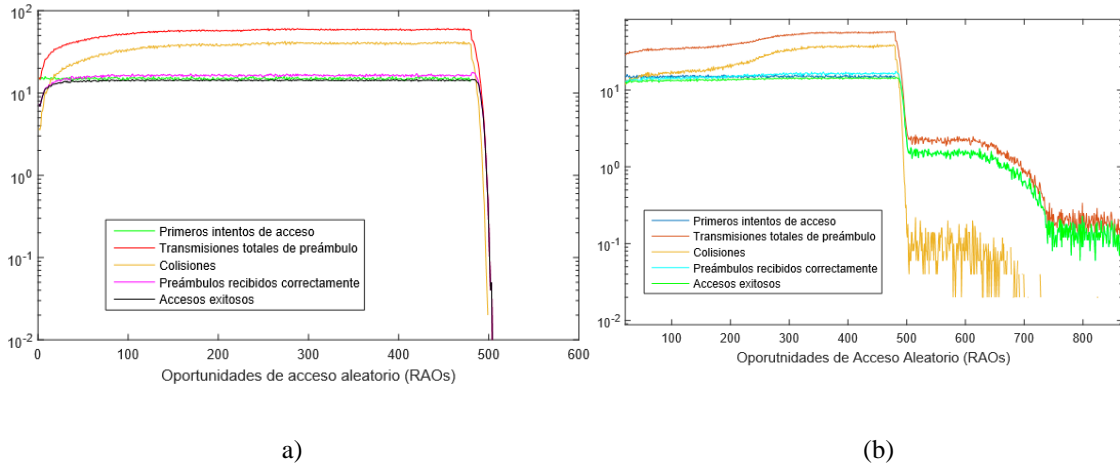


Fig.13 Escenario 1 con intensidad de tráfico de 15.

En la Fig.13 (a) se puede observar que se tiene una probabilidad muy buena esto puede suceder que al no tener muchos sensores en una intensidad de tráfico de 15 no habría un problema de congestión. Pero para poderla mejorar como se muestra en la Fig.13(b) se cambió el  $P_{acb}$  a 0.9 y  $T_{acb}$  a  $1e3$  teniendo así una intensidad de tráfico de 13.5 y se obtuvo una mejora estimadamente del 100%.

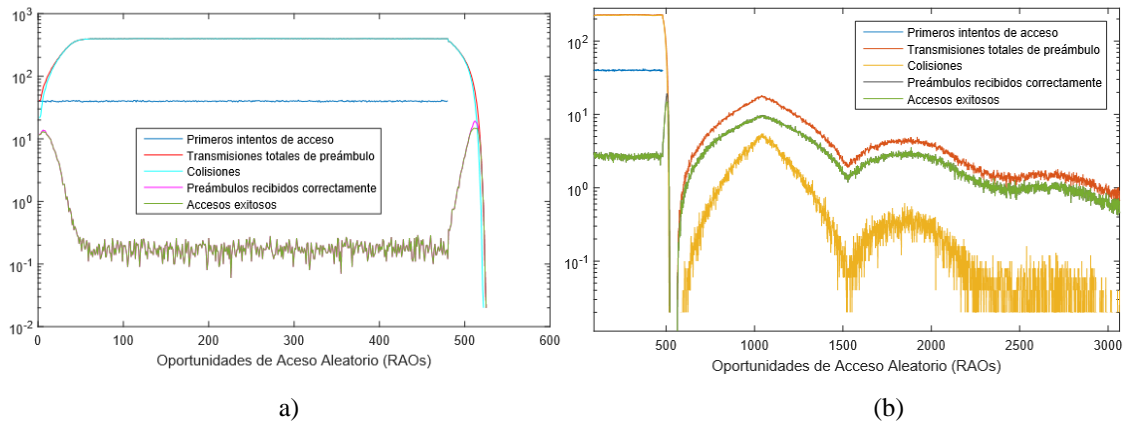


Fig.14 Escenario 2 con intensidad de tráfico de 20.

En la Fig.14(a) se puede observar que al tener un número mayor de sensores para una intensidad de tráfico de 20 tenemos una probabilidad de acceso demasiado baja ocasionando congestión, mientras que si observamos en la Fig.14(b) al cambiar el  $P_{acb}$  a 0.6 se mejora la probabilidad de acceso en un 48% dando así mejor servicio.

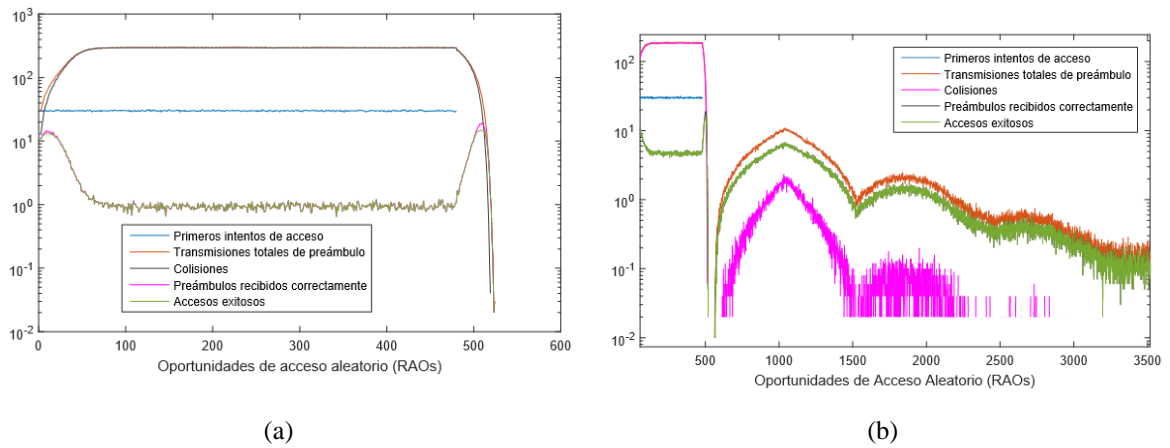


Fig.15 Escenario 2 con intensidad de tráfico de 15.

Como se muestra en la Fig.15(a) teniendo una intensidad de tráfico de 15 con un valor de sensores elevado se tiene igual una probabilidad de acceso demasiado baja para mejorarla se cambia el  $P_{ach}$  a 0.7 teniendo como resultado una mejora del 44% y así ya no se va a tener por completo una congestión.

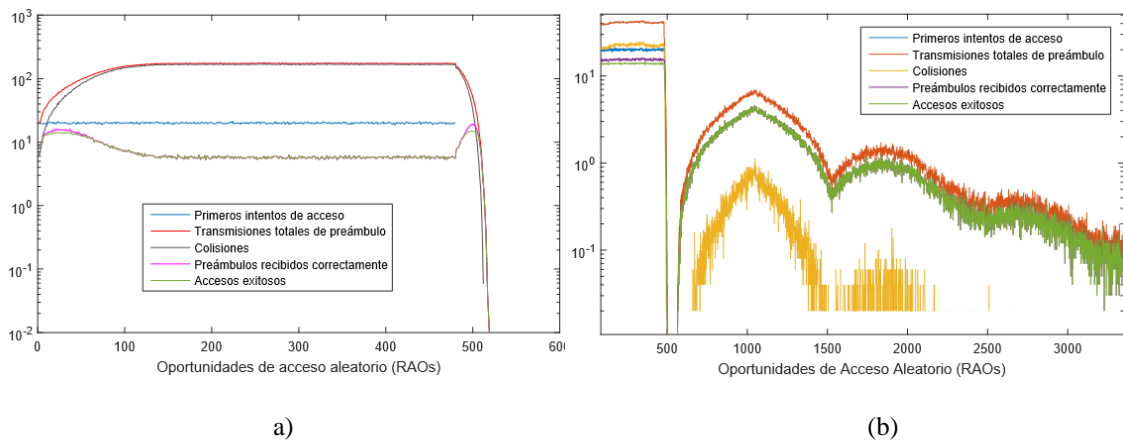
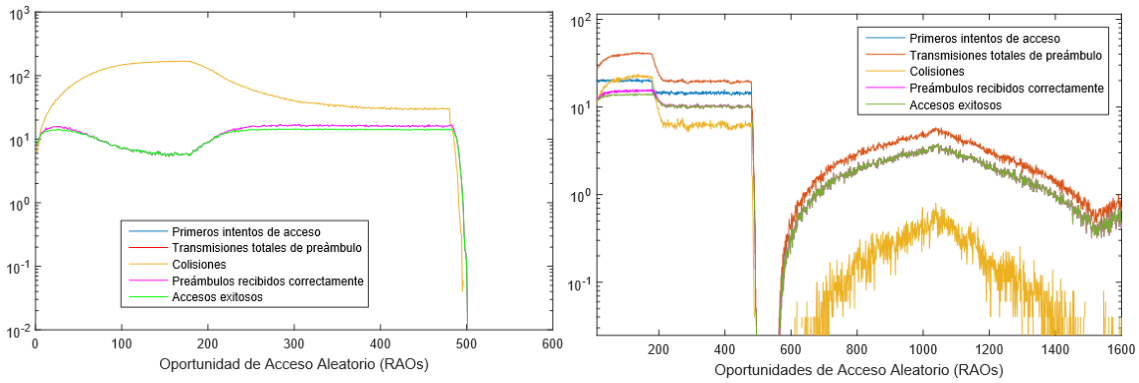


Fig.16 Escenario 2 con intensidad de tráfico de 10.

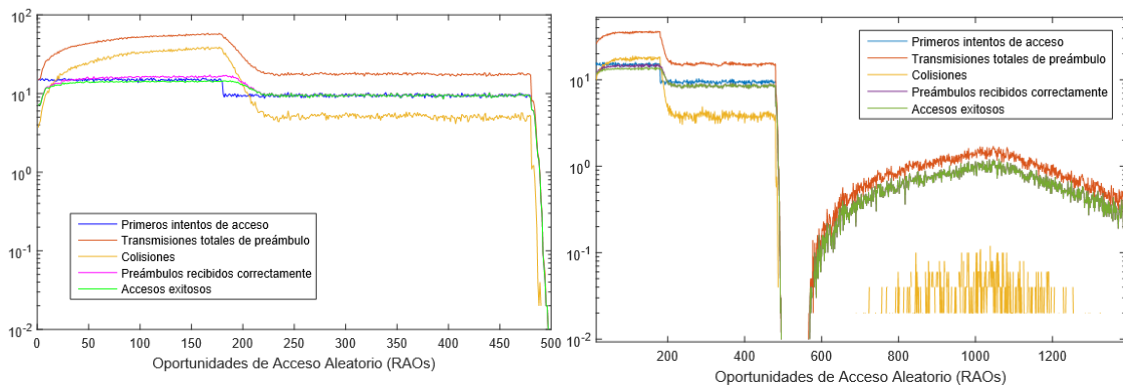
En este escenario para que no haya ninguna colisión deberían cada tren tener la mitad de sensores con lo cual sería similar al escenario 1 y puedan tener una intensidad de tráfico similar a dicho escenario.



a) (b)

Fig.17 Escenario 3 con intensidad de tráfico de 20.

Como se muestra en la Fig.13(a) nuestra probabilidad de acceso es aceptable a pesar de tener sensores en el tren y puente, pero esta se puede mejorar, como se muestra en la Fig.17(b) al cambiar el  $P_{acb}$  nuestra intensidad de tráfico disminuye con lo cual la probabilidad de acceso aumenta un 26.6%.



(a) (b)

Fig.18 Escenario 3 con intensidad de tráfico de 15.

Como se muestra en la Fig.18, este escenario al cambiar el  $P_{acb}$  tuvo una mejora dejando a la probabilidad de acceso al 100% de mejora, pero fue en cambio mínimo ya que al no cambiar el  $P_{acb}$  su probabilidad de acceso es muy buena y sin congestiones.

En la Tabla 17 podemos observar los valores que se obtienen para cada escenario, ahora no solo cambiando el  $P_{acb}$  o el  $T_{acb}$  sino ahora se trabajó con el preámbulo 27.

100 SIMULACIONES / PREÁMBULO 27							
Escenarios	Intensidad de tráfico	Pacb	Tacb	Número de Sensores	Probabilidad de acceso	Número medio de transmisiones de preámbulo	Retardo medio de acceso
1	10	1	4e3	4800	0.4908	4.8332	95.6846
		0.9	4e3		0.8665	3.5189	559.7539
	15	1	4e3	7200	0.0947	5.1066	102.0749
		0.6	4e3		0.9034	3.0147	3.1065e3
2	20	1	4e3	9600	0.0357	5.6286	114.6405
		0.7	4e3		0.3854	2.4028	4.4972e3
	30	1	4e3	14400	0.0131	5.9085	123.9111
		0.6	4e3		0.4293	2.0350	6.3264e3
3	10	1	4e3	Tren=6933	0.0686	5.3672	107.6655
		0.9	4e3	Puente=1000	0.1909	3.4779	2.4586e3
	15	1	4e3	Tren=4533	0.3160	5.1044	101.2657
		0.7	4e3	Puente=1000	0.8339	2.5056	2.0354e3

Tabla 17: Pruebas del ACB en 27 preámbulos.

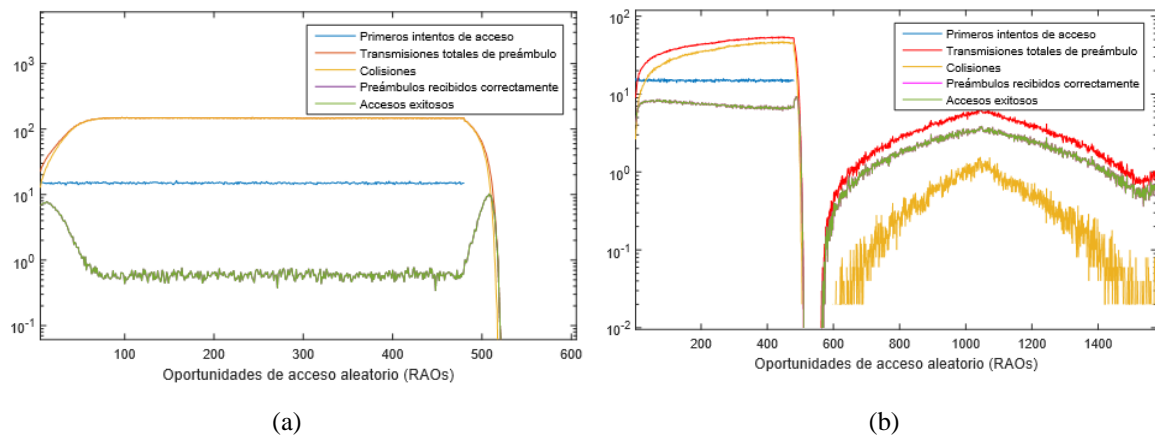


Fig.19 Escenario 1 con intensidad de tráfico de 15.

Como se muestra en la Fig.19 (a) la probabilidad de acceso es demasiado baja con lo cual puede ocurrir una congestión, pero esto puede cambiar como se muestra en la Fig.19(b) que la cambiar el Pacb tiene una mejora del 81% ocasionando así un mejor servicio.

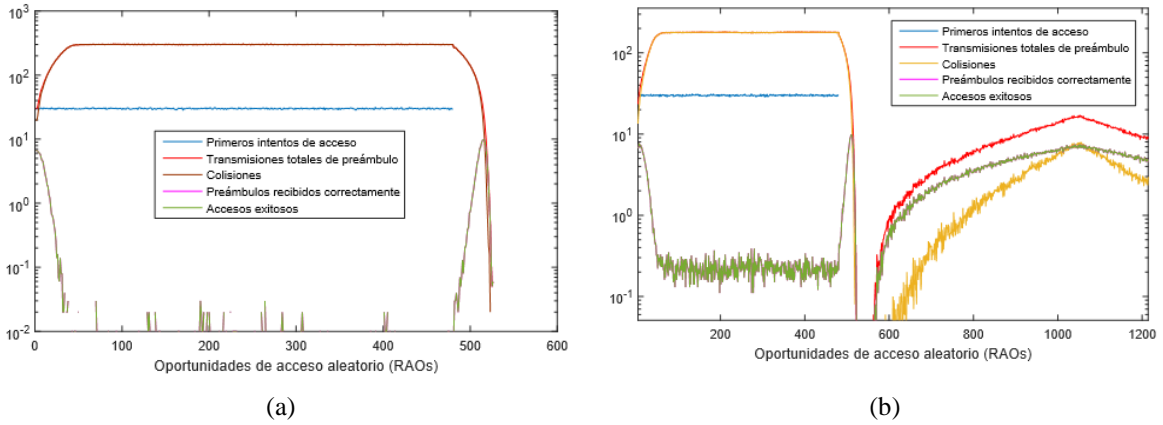


Fig.20 Escenario 2 con intensidad de tráfico de 15.

En este escenario al tener el doble de sensores que el escenario 1 va a tener más baja la probabilidad de acceso. Esto puede variar cambiando el  $P_{ac}$  y así la probabilidad de acceso aumentaría en 41% pero también puede aumentar más la probabilidad de acceso cambiando la cantidad de sensores de cada tren a la mitad y así evitaría una congestión.

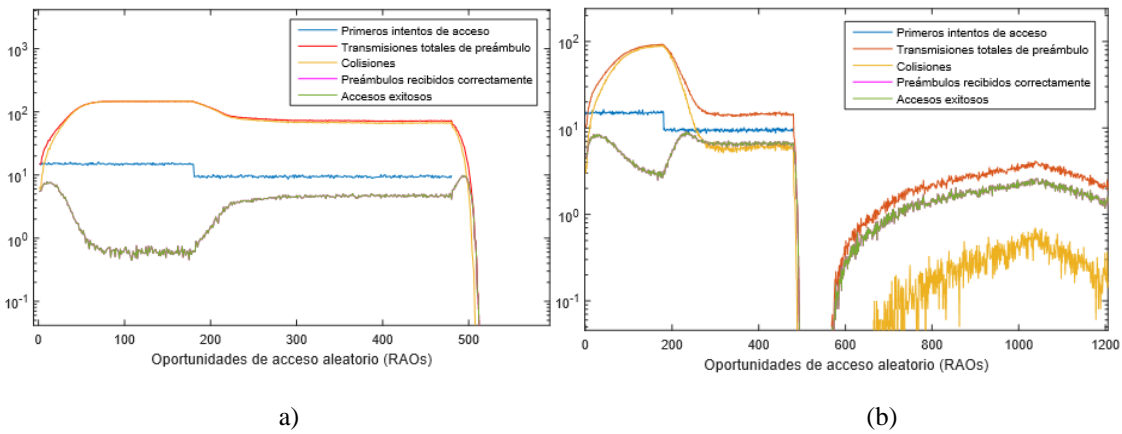


Fig.21 Escenario 3 con intensidad de tráfico de 15.

Al ser un escenario donde hay demasiados sensores ya que son del tren y puente como se muestra en la Fig.21(a) la probabilidad de acceso es baja y puede ocasionar una congestión, por tal motivo en la Fig.21(b) al cambiar el  $P_{ac}$  se muestra que probabilidad de acceso aumenta en un 52%.



## V. CONCLUSIONES

Mediante el presente trabajo se han estudiado las comunicaciones de los sensores de trenes de alta velocidad en un entorno de comunicaciones LTE-A en donde se logró identificar los escenarios de posibles congestiones específicamente un tren al pasar a altas velocidades, al encontrarse dos trenes, un tren al pasar por un puente y un tren al tener más sensores en un vagón que en los demás.

Cada escenario juega un papel importante, uno es más problemático que otro, uno de ellos es el escenario de dos trenes en este al duplicar los sensores de transmisión ocasionaría una congestión en la red.

Se determinó a partir del sistema actual de cada tren que cuenta con 3000 sensores que, si en un futuro se desea incrementar la cantidad de sensores en cada escenario propuesto, ocasionaría problemas de congestión.

Se logró identificar que dada la velocidad máxima de 300Km/h que alcanzan en la actualidad los trenes ocasionarían que la intensidad de tráfico sobrepase la capacidad del sistema.

Para resolver los problemas de congestión se utilizó el método Acces Class Barring (ACB) para tratar la congestión de los escenarios con problemas la cual permite controlar la sobrecarga y así poder prevenir fallos de acceso.

Finalmente, para que el ACB funcione se debe cambiar los parámetros de  $P_{acb}$  y  $T_{cb}$  los cuales nos ayudan a controlar a que la intensidad de tráfico este por debajo de la estimada y así poder tener una red sin congestión.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Danny, "omicron," 18 11 2012. [Online]. Available: Referencia<http://omicron.elespanol.com/2012/11/todo-sobre-el-m2m-cualquier-cosa-se-puede-conectar-a-internet/>. [Accessed 2017].
- [2] J. M. Roca, "InformeTICfacil," [Online]. Available: [http://www.tendencias21.net/telefonica/Que-es-la-comunicacion-M2M\\_a801.html](http://www.tendencias21.net/telefonica/Que-es-la-comunicacion-M2M_a801.html). [Accessed 2017].
- [3] J. Wan, "Machine to Machine Communications: Architectures, Standards and Applications," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2012.
- [4] S. Parkvall, E. Dahlman and A. Furuskar, "LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, Calgary, 2009.
- [5] T. Nakamura, "Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced)," *ITU-R WP 5D Workshop on IMT-Advanced*, 17 09 2009.
- [6] M. Faezeh and G. Abdorasoul, "Learning automaton based adaptive access barring for M2M communications in LTE network," in *Electrical Engineering (ICEE)*, Iran, 2016.
- [7] A. Laya, L. Alonso and J. Alonso-Zarate, "Is the Random Access Channel of LTE and LTE-A Suitable for M2M Communications? A Survey of Alternatives," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014.
- [8] Lauro, "Expert Opinion," 10 2011. [Online]. Available: [http://lteuniversity.com/get\\_trained/expert\\_opinion1/b/lauroortigoza/archive/2011/10/20/rach-preamble-planning.aspx](http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/lauroortigoza/archive/2011/10/20/rach-preamble-planning.aspx).
- [9] C. Kalalas and J. Alonso-Zarate, "Reliability Analysis of the Random Access Channel," in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2017.
- [10] "DocSlide," 19 12 2016. [Online]. Available: <http://documents.tips/documents/cooperative-access-class-barring-for-machine-to-machine-communications.html>. [Accessed 2017].
- [11] Renfe, "Renfe," [Online]. Available: [http://www.renfe.com/viajeros/nuestros\\_trenes/](http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/).
- [12] 3GPP, "Architectures enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications," vol. V13.2.0, no. TS 22.368.
- [13] J. M. Armisen and M. A. Astiz, "Puentes de Ferrocarril de Alta Velocidad," *Obras publicas*, vol. 3.386.
- [14] T.-M. Lin, "Prioritized Random Access With Dynamic Access Barring for MTC in 3GPP LTE-A Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. Volume 63 Issue 5.
- [15] J.-P. Cheng, "Prioritized Random Access with Dynamic Access," *International Workshop on Machine-to-Machine Communications*.
- [16] I. Leyva, "Performance Analysis of Access Class Barring for Handling Massive M2MTrafficin LTE-Networks," in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016.