

JDIE. 2024.1.05.01

Ciudad de México, a 13 de mayo de 2024.

DR. ROMÁN LINARES ROMERO
PRESIDENTE DEL CONSEJO DIVISIONAL
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
P R E S E N T E

Asunto: Solicitud de Registro de Proyecto de Investigación.

Por este medio le solicito incluir en el orden del día de la próxima sesión del Consejo Divisional que usted, acertadamente, preside, el registro del Proyecto de Investigación

Béleguí: Modelo matemático y simulación de una red de radios cognitivos con tecnología de última generación

cuyo responsable es el **DR. Luis Alberto Vázquez Toledo**, adscrito a este Departamento , en particular al Área de Redes y Telecomunicaciones.

Le agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

A t e n t a m e n t e
"Casa abierta al tiempo"

M. en C. Omar Lucio Cabrera Jiménez
Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa

**Protocolo de Investigación correspondiente a la
Convocatoria para Postulación de Proyectos de
Investigación por Personal Académico de Ingreso Reciente**

Béleguí: **Modelado matemático y simulación de una red de
radios cognitivos con tecnología de última generación**

Responsable: **Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo**
Institución de adscripción: **UAM - Unidad Iztapalapa**

Enero 2024

Índice general

“BÉLEGUÍ: Modelado matemático y simulación de una red de radios cognitivos con tecnología de última generación”	3
1. Resumen	3
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. Antecedentes de la propuesta	5
4. Descripción del proyecto de investigación	5
4.1. Definición de los radios cognitivos (CR)	6
4.2. Descripción de NOMA (Acceso Múltiple No Ortogonal)	9
5. Hipótesis o pregunta(s) de investigación	11
6. Metas, Metodología y Resultados esperados	11
6.1. Metas	12
6.2. Metodologías	12
6.3. Producción y resultados esperados	13
7. Integrantes participantes del proyecto	13
7.1. Profesor responsable	13
7.2. Profesores Investigadores Participantes	14
7.3. Alumnos Participantes	14
8. Recursos disponibles para el desarrollo del proyecto	14
9. Infraestructura necesaria y disponible	15
10. Pertinencia de la propuesta:	15
11. Cronograma de actividades	15
12. Propuesta económica	17
Referencias	18

“BÉLEGUÍ: Modelado matemático y simulación de una red de radios cognitivos con tecnología de última generación”

1. Resumen

Los nuevos sistemas de quinta generación (**5G-NR**) están impulsando el despliegue masivo de redes celulares y liderando el camino hacia las ciudades inteligentes del mañana. La cobertura y la confiabilidad en toda la ciudad es la clave para implementar cualquier ciudad inteligente exitosa. La tecnología inalámbrica es la clave y la única solución viable para el despliegue de toda la ciudad. Los operadores inalámbricos están implementando nuevos sistemas y procesos comerciales internos para enfrentar los desafíos de construir y administrar una red 5G [1].

En la actualidad, las nuevas tecnologías de telecomunicaciones siguen una tendencia hacia la integración de toda clase de servicios, mediante una red global de comunicaciones. Actualmente, se pretende que dicha red tenga una accesibilidad total, es decir, que cualquier usuario pueda acceder a ella desde cualquier parte, sin estar atado a una red fija, simplemente mediante la utilización de un terminal móvil. Un informe de *Wireless World Research*, revela que el tráfico de datos móviles se duplica (al menos) cada año [2].

La introducción de nuevos servicios de comunicaciones con mayores requerimientos de ancho de banda y mejor **calidad de servicio** (QoS, por sus siglas en inglés), las exigencias de altas tasas de transmisión de datos y alta eficiencia espectral se vuelven cada vez más importantes en los sistemas de comunicaciones móviles. Un desafío importante para las nuevas tecnologías de telecomunicaciones será mejorar la eficiencia espectral para ofrecer altas velocidades de transferencia de datos a más dispositivos inteligentes. Una opción para lograr esta mejora es el uso de las redes de radio cognitivo (**CR**), que requieren algoritmos y protocolos para una gestión del espectro a partir de operaciones de detección, coordinación y cooperación entre los equipos terminales. Otra opción es utilizar *nuevos esquemas de acceso al medio*.

El espectro de radio frecuencias es un recurso limitado y que se encuentra prácticamente completa-



mente asignado. Por la complejidad de estos sistemas, son necesarias metodologías de análisis matemático precisas y de complejidad reducida para su evaluación.

Debido a la amplia gama de servicios y redes involucradas en los 5G-NR, es necesario considerar diferentes esquemas de transmisión de información en las redes futuras considerando los servicios en el **Internet de las cosas** (IoT, por sus siglas en inglés). Debido a esto, modelar matemáticamente este tipo de redes es crucial para garantizar un funcionamiento adecuado de este tipo de servicios. Adicionalmente, dada la gran cantidad de información que se generará por este tipo de dispositivos autónomos, es necesario hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico, por lo que el concepto de radio cognoscitivo jugará un papel central en el diseño de las comunicaciones futuras.

En la primera etapa de este proyecto, nos centramos en desarrollar metodologías de análisis matemático que faciliten y reduzcan la complejidad computacional para la asignación de recursos para las nuevas tecnologías de telecomunicaciones que opere en una *red de CR*, utilizando nuevos esquemas de acceso al medio, garantizando la **calidad de servicio** en el sistema.

Estudios en esta dirección pueden generar aportaciones importantes en esta rama y apoyar la operación práctica de sistemas de comunicaciones móviles eficientes, confiables y de menor costo, accesibles a más amplios sectores de la población. Por esta razón, en la segunda y tercera etapa del proyecto, nos centramos en implementar una *red de CR*, utilizando nuevos esquemas de acceso al medio, mediante el uso de tarjetas SDR programables, para validar los modelos analíticos desarrollados en la primera etapa.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo analítico para evaluar el desempeño y dimensionamiento de una *red de CR*, utilizando distintos esquemas de acceso al medio, que reduzca el tiempo computacional para lograr su implementación en los futuros sistemas de comunicaciones.

2.2. Objetivos específicos

1. Realizar un estudio detallado de las propuestas y soluciones para los sistemas de última generación, resaltando principalmente la técnica de Acceso Múltiple No Ortogonal **NOMA** y las *redes de radio cognitivo*.
2. Proponer metodologías de análisis de teletráfico eficientes y matemáticamente tratables para la evaluación realista del desempeño de sistemas de comunicaciones de **CR**, usando *cadena de Markov*.
3. Encontrar una solución de forma cerrada para la asignación óptima de recursos y comparar los tiempos computacionales para la viabilidad de implementación.
4. Proponer una arquitectura e implementar una *red de radio cognitivo* utilizando tarjetas de desarrollo *SDRs*.
5. Validar el modelo desarrollado mediante simulaciones.



3. Antecedentes de la propuesta

Se ha trabajado en el área de investigación en la creación de un modelo analítico, validado por simulaciones, para redes inalámbricas de las nuevas tecnologías de telecomunicaciones y redes de radio cognitivo, tomando como parámetro de calidad de servicio la probabilidad de bloqueo. En el desarrollo de los modelos analíticos se han utilizado el análisis de teletráfico y las estadísticas de orden.

Ejemplos de publicaciones relacionadas a este tema donde hemos participado:

Dic. 2020

Briones-Reyes, A., Vásquez-Toledo, L. A., Prieto-Guerrero, A., & Aguilar-Gonzalez, R. (2020). Mathematical evaluation of spectrum sharing in cognitive radio networks for 5G systems using Markov processes. *Computer Networks*, 182, 107521.

Dic. 2020

Vasquez-Toledo, L. A., Borja-Benítez, B., Marcelin-Jiménez, R., Rodríguez-Colina, E., & Tirado-Mendez, J. A. (2020). Mathematical analysis of highly scalable cognitive radio systems using hybrid game and queuing theory. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 127, 153406.

Mar. 2020

Borja Benítez, M. A., Vasquez Toledo, L. A., Tirado Méndez, J. A., Borja Benítez, B., & Marcelin Jiménez, R. (2020). A novel mathematical teletraffic method to evaluate the interoperation of different standards with NOMA systems using order statistics. *International Journal of Communication Systems*, 33(11), e4406.

Abr. 2018

Vasquez-Toledo, L. A., & Lara-Rodríguez, D. (2018). Teletraffic analysis of OFDMA cellular systems with persistent VoIP users and maximum SIR scheduling based on order statistics. *IEEE Access*, 6, 25517-25531.

Jul. 2017

Vasquez-Toledo, L. A., & Lara-Rodríguez, D. (2017, July). A coordinated operation access scheme for 5G cellular systems. In 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) (pp. 604-606). IEEE.

4. Descripción del proyecto de investigación

Cisco predijo en su informe anual de Internet (2018-2023), que para finales del año 2023 la cantidad de usuarios móviles alcanzaría los 13,100 millones, así como la cantidad de dispositivos habilitados para internet, con un aproximado de 18,400 millones en 2018, y finalizaría para 2023 con 29,300 millones [3]. Esta tendencia creciente no muestra signos de desaceleración en la próxima década, ya que esta demanda es causada por alrededor del 70% de la población mundial. Por lo tanto, proporcionar acceso masivo es uno de los objetivos más importantes para las redes inalámbricas de próxima generación.



Para implementar el **Internet de Todo** (IoT, por sus siglas en inglés) e Internet móvil, las redes de última generación tienen varios objetivos de rendimiento: a) La velocidad máxima de datos debe ser de al menos un terabit por segundo; b) la latencia de la interfaz aérea oscilará entre 0.01 y 0.1 milisegundos para usuarios con gran movilidad; c) la densidad de conectividad será 10 veces mayor que en los sistemas actuales; d) la **eficiencia espectral** (SE, por sus siglas en inglés) y la **eficiencia energética** (EE, por sus siglas en inglés) deben ser 5-10 y 10-100 veces mayores que los sistemas actuales, respectivamente; y e) la confiabilidad debe ser superior al 99.99999 % [4-5].

La *industria 4.0* es un paradigma comercial introducido por el gobierno alemán que moderniza la forma en que se utilizan las tecnologías emergentes en varios dominios de aplicaciones (como atención médica, fabricación, ciberseguridad, integración de sistemas, robótica, conectividad en la nube, venta minorista, etc.) basado en los datos en tiempo real y la conectividad. En la *industria 4.0*, **IoT** es la base para construir sistemas industriales con numerosas aplicaciones para mejorar la productividad y el rendimiento con menos errores humanos. **IoT** es una tecnología revolucionaria que se refiere a una red inalámbrica de dispositivos interconectados que significa el futuro de la comunicación, la informática y la inteligencia [6].

Con el Informe de movilidad de Ericsson de 2017, se previó que el tráfico de video móvil crecería alrededor de un **50 %** anual hasta 2023, para así representar casi el **75 %** de todo el tráfico de datos móviles. Además, se especuló que las redes sociales crecerían un **34 %** anual en los próximos 6 años, es decir, para el año 2023. Se espera que otras categorías de aplicaciones tengan tasas de crecimiento anual que oscilen entre el **20 %** y el **32 %**, esto se muestra en la **Figura 1**.

Debido al *crecimiento* observado de los dispositivos para redes inalámbricas de nueva generación, en este proyecto de investigación, nos centramos en *desarrollar un esquema de asignación de recursos para un sistema que opere en una red de radio cognitivo*.

4.1. Definición de los radios cognitivos (CR)

Una de las preguntas que se puede plantear es:

¿Cómo mejoramos la eficiencia espectral de las redes inalámbricas?

Antes de responder a esta pregunta, debemos observar las ineficiencias del uso actual del espectro. En primer lugar, los organismos reguladores nacionales asignan el espectro de manera fija, y su principio principal es evitar la interferencia de radio, que se logra dividiendo el espectro en bandas (por ejemplo, división de frecuencia) que se asignan a uno o más servicios.

Estos servicios de radio incluyen móvil, satélite, radioaficionado, navegación y otros. Una licencia otorga un derecho exclusivo para operar (transmitir y recibir señales inalámbricas) en una banda de frecuencia específica, en una ubicación específica o área geográfica. Pero gran parte del espectro con licencia permanece sin usar en diferentes momentos y/o ubicaciones. Esas ranuras temporales del espectro (también conocidas como *agujeros del espectro* o *espacios en blanco*) pueden alcanzar el **15 %-85 %** del

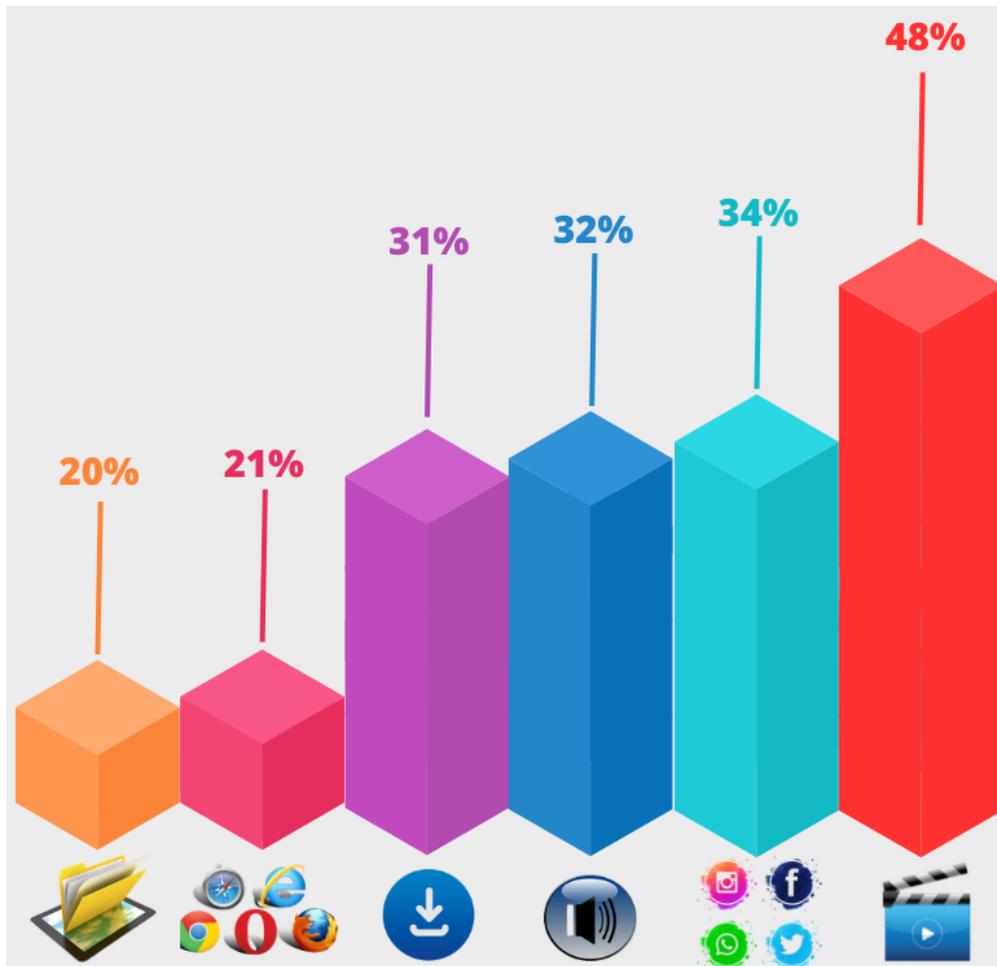


Figura 1: Crecimiento esperado de tráfico por categoría entre 2017-2023.

espectro con licencia [7-9].

Claramente, para mejorar la eficiencia espectral general, los usuarios sin licencia pueden acceder a tales agujeros de espectro. Por lo tanto, este hecho sugiere la necesidad de acceso oportunista al espectro sin causar interferencia indebida a los usuarios con licencia [10-11]. Dicha capacidad es la característica definitoria de los nodos de radio cognitivo (**CR**), que requieren algoritmos y protocolos para la detección, coordinación y cooperación para el uso compartido del espectro.

En las *redes de CR*, los nodos **CR** pueden reconocer las partes no utilizadas del espectro y adaptar sus comunicaciones para utilizarlas mientras minimizan la interferencia en los usuarios con licencia. En consecuencia, la *red de CR* mejora el uso general del espectro, alejándose de las asignaciones estáticas hacia formas más dinámicas de acceso al espectro.

Los usuarios de espectro con licencia se denominan *usuarios primarios* (**PU**) y los usuarios sin licencia se denominan *usuarios secundarios* (**SU**) o *nodos CR*. Por lo tanto, los **SU** deben ser oportunistas y

acceder a los agujeros del espectro, manteniendo la interferencia en los receptores **PU** a cero o por debajo de un nivel prescrito.

La **Figura 2** muestra la coexistencia de un grupo de *redes CR secundarias* y una *red primaria*.

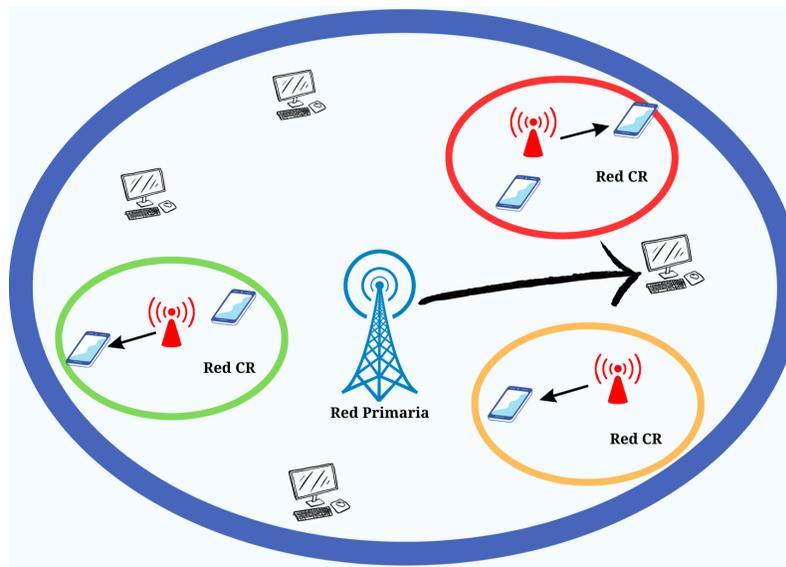


Figura 2: Coexistencia de redes CR con redes primarias.

Para permitir el acceso oportunista al espectro, las funciones clave de las *redes CR* son **(1) detección del espectro**, **(2) gestión y decisión del espectro** y **(3) movilidad del espectro**, los cuales se describen brevemente a continuación.

1. Detección de espectro: Esto se refiere a la detección de agujeros de espectro con precisión. Además, debe ser continuo y de modo que siempre que un **PU** acceda al espectro, indique a los *nodos CR* que cesen la transmisión de inmediato.

2. Gestión del espectro y decisión: Cuando se distribuyen múltiples agujeros de espectro en un amplio rango de frecuencias, la gestión del espectro implica seleccionar el mejor posible. La elección se realiza considerando la potencia de transmisión, el ancho de banda, los esquemas de modulación, los esquemas de codificación y la calendarización. La elección también depende de los criterios de calidad de servicio (**QoS**) para las necesidades de comunicación de *nodos CR*, como la tasa de error de paquete, la latencia y el rendimiento.

3. Movilidad del espectro: Esto se refiere a la capacidad de los *nodos CR* para saltar entre diferentes agujeros de espectro sin problemas dependiendo de las condiciones. La transición entre diferentes agujeros de espectro se denomina transferencia de espectro. Estos son análogos a las transferencias celulares tradicionales.



4.2. Descripción de NOMA (Acceso Múltiple No Ortogonal)

Un parámetro importante en los sistemas inalámbricos de comunicación es el *control de potencia*, el cual se usa para compensar la pérdida de intensidad de la señal transmitida y las variaciones de la interferencia. La calidad del canal de los usuarios depende de la SIGNIFICADO (SIR, por sus siglas en inglés), que está en función de la potencia de transmisión, los desvanecimientos del canal y la interferencia. En esquemas convencionales de **Acceso Múltiple Ortogonal** (OMA, por sus siglas en inglés), como el **Acceso Múltiple por División de Frecuencia** (FDMA, por sus siglas en inglés), el **Acceso Múltiple por División de Tiempo** (TDMA, por sus siglas en inglés), el **Acceso Múltiple por División de Código** (CDMA, por sus siglas en inglés) y el **Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal** (OFDMA, por sus siglas en inglés) utilizados para 1G, 2G, 3G y 4G respectivamente, los usuarios se asignan a recursos de radio ortogonales en el dominio del tiempo, la frecuencia, el código o sus combinaciones. En consecuencia, sigue siendo un desafío para **OMA** satisfacer la eficiencia espectral y los requisitos de conectividad masiva de 5G [12].

Recientemente, el Acceso Múltiple No Ortogonal (**NOMA**), también conocido como *técnicas de acceso al medio de nueva generación* (**NGMA**), se ha revelado como una técnica prometedora de acceso múltiple para los sistemas inalámbricos de última generación [13]. **NOMA** permite interferencias controlables para la asignación de recursos no ortogonales con el aumento tolerable en complejidad del receptor. En comparación con **OMA**, las principales ventajas de **NOMA** incluyen los siguientes [11]:

- Mejora de la eficiencia espectral.
- Conectividad masiva
- Baja latencia de transmisión y el costo de señalización

La tendencia de **NGMA** es pasar de la ortogonalidad a la no ortogonalidad, es decir, servir a múltiples usuarios/dispositivos permitiéndoles compartir los mismos recursos en lugar de asignarlos a recursos ortogonales dedicados. La razón detrás de esta tendencia se puede explicar de la siguiente manera. Por un lado, los esquemas de transmisión ortogonales son estrictamente subóptimos en comparación con los esquemas de transmisión no ortogonales, ya que cada usuario puede utilizar solo una parte de los bloques de recursos disponibles. Por otro lado, dado el crecimiento del número de usuarios/dispositivos en las redes inalámbricas de próxima generación, los esquemas de transmisión ortogonales solo pueden soportar un número limitado de usuarios/dispositivos para determinados recursos ortogonales disponibles. Esto requiere el desarrollo de esquemas de transmisión no ortogonales para **NGMA**.

La idea básica de **NOMA** reside en el uso simultáneo del mismo espectro de radio por parte de múltiples usuarios a costa de pequeñas interferencias entre los usuarios. Las redes que emplean **NOMA** pueden atender a un mayor número de usuarios en las bandas de espectro disponibles y pueden servir a los usuarios individuales con mayor ancho de banda. Una de las ideas clave para una operación exitosa de **NOMA** es formar grupos de usuarios (explotando las diferencias en las ganancias de sus canales) y permitirles transmitir en el mismo recurso de radio con la potencia apropiada, y luego usar **Cancelación de Interferencia Sucesiva** (SIC, por sus siglas en inglés) en el(los) receptor(es) para decodificar la señal de mensaje de diferentes usuarios [14].

La **Figura 3** ilustra el esquema **NOMA** básico a través de multiplexado de dominio de potencia con **SIC** en el receptor. El *receptor SIC* se utiliza comúnmente para realizar la detección multiusuario. Debido al efecto cercano-lejano, las condiciones de canal pueden variar significativamente entre los usuarios. **SIC** se aplica a los usuarios con una **SIR** relativamente alta. Por simplicidad se supone el caso de una sola antena transmisora y una receptora. La estación base transmite una señal (x_i) al usuario $UE - i$, con potencia P_i (la suma de $P_i = P$). La señal recibida está dada por: $x_i = h_i x + w_i$, donde $x = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2$, h_i es el coeficiente del canal entre el usuario $UE - i$ y la estación base, w_i denota el ruido AWGN incluyendo la interferencia inter-celda [11].

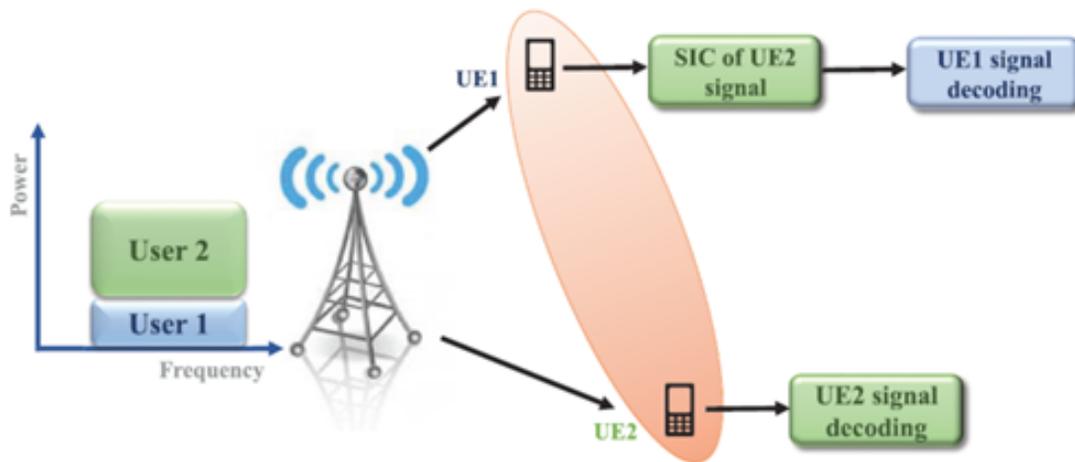


Figura 3: NOMA con SIC en el receptor.

En **NOMA**, el proceso **SIC** se implementa en el receptor del UE . El orden óptimo para la decodificación está en el orden decreciente de la ganancia del canal normalizado por el ruido y la potencia de interferencia entre celdas (llamado simplemente *ganancia del canal*). Basado en este fin, se supone que cualquier usuario puede decodificar correctamente las señales de otros usuarios cuyo orden de decodificación viene antes del usuario correspondiente. Por lo tanto, $UE - i$ puede eliminar la interferencia del usuario j cuya ganancia de canal $|h_j|^2$ es menor a la del usuario i , $|h_i|^2, (j < i)$, es decir, las ganancias de los canales se ordenan de mayor a menor [11].

En la **Figura 4**, $UE - 1$ presenta mejores condiciones de canal y por lo tanto la potencia asignada al usuario 1 es menor que la asignada al usuario 2 ($P_1 < P_2$). El $UE - 2$ no realiza la cancelación de interferencia ya que es el primero en el orden de decodificación. El $UE - 1$ primero decodifica x_2 y resta de su componente de señal recibida y_1 , y a continuación se decodifica x_1 sin interferencia de x_2 .

En este proyecto se propone desarrollar un modelo utilizando un *proceso Markoviano* considerando ráfagas de arribos para modelar los esquemas **OMA** y **NOMA**, aplicados a una *red de CR*. Este procedimiento no ha sido publicado antes, ya que otros trabajos representan estos parámetros asumiendo modelos basados en la función generatriz de momentos y/o modelos de aproximación, sin obtener una solución de forma cerrada. El modelo será validado con un simulador de eventos discretos, considerando distintos escenarios y condiciones de simulación. Debido a la precisión del modelo matemáti-

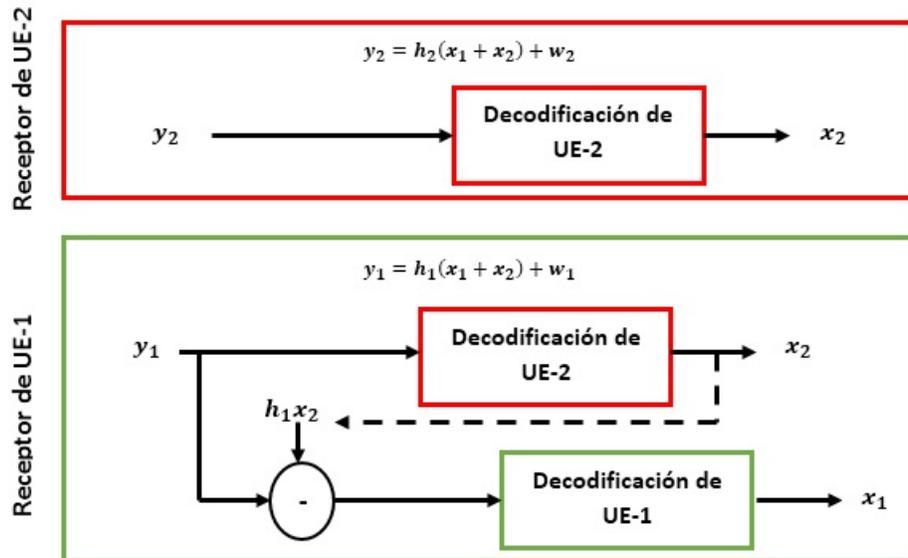


Figura 4: Proceso SIC.

co, se realizará la simulación de un sistema real para diferentes escenarios como se muestra en la **Figura 5**.

5. Hipótesis o pregunta(s) de investigación

Creemos que son necesarios estudios y modelos de análisis eficientes y matemáticamente tratables para la adecuada evaluación del desempeño de sistemas basados en **CR**, y de esta manera lograr su implementación, para distintos esquemas de acceso al medio. Por esta razón, se proponen las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo se puede evaluar analíticamente una *red de CR* mediante *cadena de Markov*, conservando una buena calidad de servicio (QoS)?
2. ¿Cómo se puede integrar un *análisis de una red de CR* con esquemas de accesos de nueva generación?
3. ¿Se puede simular y evaluar una *red de CR* con esquemas de acceso **OMA** y/o **NOMA**?

6. Metas, Metodología y Resultados esperados

A continuación, se describen las actividades que se desarrollaran en el proyecto.

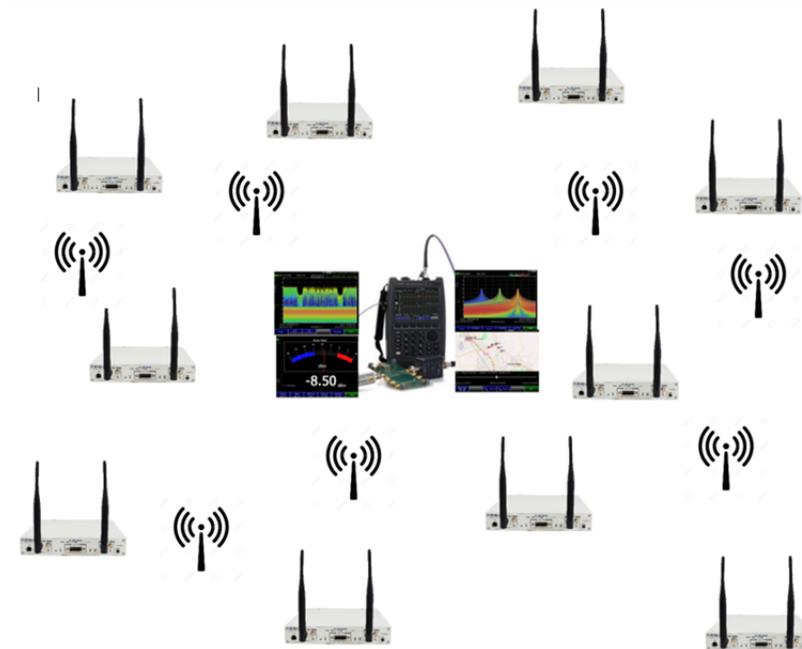


Figura 5: Propuesta de implementación.

6.1. Metas

- Proponer un método de análisis de teletráfico para evaluar el desempeño de *sistemas de CR* con esquema **NOMA**, mediante un diagrama de transición de estados considerando una cola de espera de tamaño **Q** ($M^{[X]}/M/S/Q$).
- Calcular las tasas de cambios basados en el diagrama de estados.
- Calcular la probabilidad de estados del sistema.
- Proponer un esquema de operación considerando una *red de CR*, usuarios primarios para esquemas **OMA** y usuarios secundarios para esquemas **NOMA**.
- Evaluar la probabilidad de bloqueo, la probabilidad de interrupción de un usuario secundario, la probabilidad de espera en la cola, etc.
- Proponer una arquitectura para simular una *red de CR*, que permita validar la solución analítica desarrollada.
- Publicación de resultados a través de foros, revistas y congresos.

6.2. Metodologías

Para alcanzar los objetivos planteados se seguirán pasos del método científico y en particular haciendo énfasis en reunir información adecuada y hacer un estudio del arte profundo. Además, se hará una comparación de diversas soluciones y planteamientos para su análisis, así como la selección de metodologías adecuadas basadas en la experimentación.

El desarrollo de la presente propuesta se efectuará secuencialmente a través de cinco enfoques metodológicos:

- (1) **Exploratorio:** buscará documentar toda la información necesaria para conocer el “estado del arte”.
- (2) **Descriptivo:** permitirá detallar cada una de las características de las variables de interés.
- (3) **Analítico:** permitirá definir la influencia de cada una de las variables de interés en el sistema.
- (4) **Predictivo:** buscará aplicar soluciones de otras situaciones al contexto de interés, y finalmente.
- (5) **Experimental:** permitirá la realización de pruebas de comprobación y validez a los desarrollos y análisis efectuados.

Las herramientas de análisis matemático necesarias para este proyecto son de amplio conocimiento del investigador responsable de este proyecto y de los investigadores participantes y han sido utilizados en trabajos de investigación previos.

6.3. Producción y resultados esperados

Durante el desarrollo de este proyecto se promoverá la colaboración con otros investigadores interesados en la línea de investigación descrita. El trabajo propuesto, será objeto de al menos los siguientes productos:

- Dos publicaciones en una revista indexada en JCR.
- Una publicación en congreso.
- Un proyecto para tesis de maestría en función de la existencia de posibles candidatos.
- Un proyecto para tesis de doctorado en función de la existencia de posibles candidatos.
- Dos proyectos terminales (tesis de licenciatura) para estudiantes de licenciatura en función de la existencia de posibles candidatos.
- Un proyecto de servicio social para estudiantes de licenciatura en función de la existencia de posibles candidatos.
- Una plataforma de simulación para evaluar el desempeño de una *red de CR*, con esquemas **OMA** y **NOMA**.

7. Integrantes participantes del proyecto

7.1. Profesor responsable

Profesor responsable



Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo, Profesor Asociado D de la UAM-Iztapalapa. Miembro del **SNI I**.



7.2. Profesores Investigadores Participantes

- **Dr. Enrique Rodríguez de la Colina.** Profesor Titular C de la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI II.
- **Dr. Ricardo Marcelín Jiménez.** Profesor Titular C de la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI I.
- **Dr. Alfonso Prieto Guerrero.** Profesor Titular C de la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI I.
- **Dr. Miguel López Guerrero.** Profesor Titular C de la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI I.
- **Dr. Michael Pascoe Chalke.** Profesor Asociado D de la UAM-Iztapalapa. Miembro del SNI I.

7.3. Alumnos Participantes

- **Balam Rodríguez González.** Matrícula: 2193054029. Alumno de la Licenciatura en Ingeniería Electrónica de la UAM-Iztapalapa.
- **Jonathan Santiago Cuamatzin.** Matrícula: 2203009798. Alumno de la Licenciatura en Ingeniería Electrónica de la UAM-Iztapalapa

En la **Tabla 1.1**, se muestra las actividades que cada participante desempeñará, así como el tiempo de dedicación por semana.

Tabla 1.1: Actividades a desarrollar de los participantes del proyecto.

Participante	Actividades	Tiempo Hrs/Semana
Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo	Desarrollo de modelos matemáticos.	15
Dr. Enrique Rodríguez de la Colina	Implementación de algoritmos de gestión del espectro para redes CR.	10
Dr. Ricardo Marcelín Jiménez	Diseño de la base de datos y análisis de los datos generados por usuarios de la red CR.	10
Dr. Alfonso Prieto Guerrero	Desarrollo de los esquemas de operación de la red CR.	10
Dr. Miguel López Guerrero	Implementación de algoritmos que permitan optimizar la operación de NOMA.	10
Dr. Michael Pascoe Chalke	Estudio y elección de los dispositivos primarios y secundarios para la red CR.	10
Estudiantes: Balam Rodríguez González y Jonathan Santiago Cuamatzin	Interfaz de la plataforma de simulación.	5

8. Recursos disponibles para el desarrollo del proyecto

Se cuenta con equipo de cómputo adquiridos bajo el proyecto **PRODEP** de apoyo a la incorporación de nuevos PTC (con folio: **UAM-PTC-701**) y el Programa Especial de Apoyo a Proyectos de Docencia



e Investigación (2021) de la UAM, Iztapalapa. Además, se cuenta con la licencia institucional para el software MATLAB y acceso a la base de datos de revistas indexadas.

9. Infraestructura necesaria y disponible

Los laboratorios del área (UAM-Iztapalapa) que se encuentran ubicados en el Edificio T, 3er piso, se utilizará para la realización de este proyecto. En algunos casos se utilizarán compartidos con otros proyectos que se realizan en el área. Cubículo de trabajo que cuente con una estación de trabajo (impresora y computadora con herramientas de simulación) y acceso a la base de datos de revistas indexadas.

10. Pertinencia de la propuesta:

En este proyecto se propone una *solución novedosa y original*, y los resultados serán compartidos con la comunidad internacional a través de foros, revistas y congresos. Se solicita un apoyo de recursos económicos para desarrollar una propuesta de operación de los sistemas modernos de comunicaciones, los resultados se publicarán como parte de la contribución de conocimiento.

Actualmente se tienen propuestas para evaluación de desempeño de redes de última generación, éstas propuestas son a través de métodos de aproximación. La desventaja de estas propuestas es el tiempo de evaluación, es muy alto, y esto lo hace físicamente irrealizable, es decir, no se pueden implementar en un sistema real, debido a que los servicios de comunicaciones son servicios en tiempo real. Debido a esta problemática, proponemos una solución de forma cerrada que *garantice el buen funcionamiento del sistema* y se pueda *evaluar en tiempos tolerables* para una buena calidad de servicio, lo que lo hace viable para su implementación.

Esto ayudara a expandir las fronteras del conocimiento, teniendo un impacto en el desempeño de las redes modernas de comunicaciones, ayudando a incrementar la capacidad del sistema, mejorar la calidad de servicios, disminuir la probabilidad de bloqueo, mejorar los tiempos de retardo, logrando una mejor calidad de servicio para el usuario.

Durante el desarrollo de este proyecto se promoverá la colaboración con otros investigadores interesados en la línea de investigación descrita. También, se buscará impulsar la generación de recursos humanos a través de estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado y/o posdoctorado.

Con el desarrollo del proyecto se busca la formación y consolidación de un nuevo grupo de investigación, formando un nuevo grupo de cuerpo académico, capaces de emprender un ejercicio independiente, con el compromiso de contribuir al acceso universal del conocimiento.

11. Cronograma de actividades

El inicio de este proyecto se planea para principios de 2024. Las actividades por etapas propuestas en el proyecto se planean acorde a los objetivos y se pueden resumir como se indica en el cronograma:



12. Propuesta económica

Tabla 1.2: Presupuesto.

Elemento	Descripción	No. de unidades	Costo por unidad	Costo total
Viáticos	Pago de hospedaje, alimentación y pasajes, para asistencia a congreso o eventos para difusión del trabajo de investigación.	1	\$20,000.00	\$20,000.00
Estación de trabajo (laptop ThinkPad X1 Nano 3ra Gen - Black)	Equipo para implementar y validar por simulación el modelo analítico.	3	\$38,000.00	\$114,000.00
Monitor Samsung 34' Curvo Wqhd Ultrawide 1000r 100hz 5ms	Para establecer un centro de control y monitoreo, que permita observar en tiempo real el comportamiento de la red modelada.	1	\$16,000.00	\$16,000.00
			TOTAL=	\$150,000.00

Referencias

- [1] Nihesh Rathod, Renu Subramanian y Rajesh Sundaresan. «Coverage estimation in outdoor heterogeneous propagation environments». En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 31660-31673.
- [2] A Alexiou, P Demestichas y A Georgakopoulos. «5G vision enablers and challenges for the wireless future». En: *Wireless World Res. Forum*. Vol. 2015. 2015, págs. 1-12.
- [3] U Cisco. «Cisco annual internet report (2018–2023) white paper». En: *Cisco: San Jose, CA, USA* 10.1 (2020), págs. 1-35.
- [4] Zhengquan Zhang, Yue Xiao, Zheng Ma, Ming Xiao, Zhiguo Ding, Xianfu Lei, George K Karagiannidis y Pingzhi Fan. «6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies». En: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 14.3 (2019), págs. 28-41.
- [5] Chong Han, Yongzhi Wu, Zhi Chen y Xudong Wang. «Terahertz communications (TeraCom): Challenges and impact on 6G wireless systems». En: *arXiv preprint arXiv:1912.06040* (2019).
- [6] Kamalrulnizam Bin Abu Bakar, Fatima Tul Zuhra, Babangida Isyaku y Sapiah Sulaiman. «A Review on the Immediate Advancement of the Internet of Things in Wireless Telecommunications». En: *IEEE Access* (2023).
- [7] Mao Wang, Wenjie Yang, Jun Zou, Bingying Ren, Min Hua, Jingjing Zhang y Xiaohu You. «Cellular machine-type communications: Physical challenges and solutions». En: *IEEE Wireless Communications* 23.2 (2016), págs. 126-135.
- [8] 5G Americas. *LTE and 5G technologies enabling the Internet of Things*. <http://www.5gamericas.org/files/3514/8121/4832/EnablingIoTWP12;8;16FINAL.pdf>. Bellevue, WA, USA. 2016.
- [9] White Paper Qualcomm Technol. Inc. *Paving the path to narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT)*. <http://www.qualcomm.com/5G>. San Diego, CA, USA. 2016.
- [10] Naser Al-Falahy y Omar Y Alani. «Technologies for 5G networks: Challenges and opportunities». En: *It Professional* 19.1 (2017), págs. 12-20.
- [11] Luis A Vasquez-Toledo y Domingo Lara-Rodríguez. «A coordinated operation access scheme for 5G cellular systems». En: *2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE. 2017, págs. 604-606.
- [12] Linglong Dai, Bichai Wang, Zhiguo Ding, Zhaocheng Wang, Sheng Chen y Lajos Hanzo. «A survey of non-orthogonal multiple access for 5G». En: *IEEE communications surveys & tutorials* 20.3 (2018), págs. 2294-2323.



- [13] Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, Anass Benjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin Li y Kenichi Higuchi. «Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access». En: *2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring)*. IEEE. 2013, págs. 1-5.
- [14] Ayaz Ahmad, Mubashir Husain Rehmani, Hamidou Tembine, Osama A Mohammed y Abbas Jamalipour. «IEEE Access Special Section Editorial: Optimization for emerging wireless networks: IoT, 5G, and smart grid communication networks». En: *IEEE Access* 5 (2017), págs. 2096-2100.