

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA:
COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN PARA SISTEMAS MIMO
MASIVO**

**AUTORA:
EVELYN SOLANGE PÉREZ AGUIRRE**

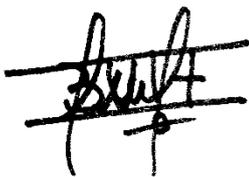
**TUTORA:
VERÓNICA EMMA SORIA MALDONADO**

Quito, febrero del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Evelyn Solange Pérez Aguirre con documento de identificación N°1723304885, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy la autora del Artículo Académico, COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN PARA SISTEMAS MIMO MASIVO, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Evelyn Solange Pérez Aguirre

C.I: 1723304885

Quito, febrero del 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Verónica Emma Soria Maldonado, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN PARA SISTEMAS MIMO MASIVO realizado por Evelyn Solange Pérez Aguirre, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2021



Verónica Emma Soria Maldonado

C.I: 1715185961

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios, quien me ha sostenido en la fe para perseverar en mis estudios aun cuando encontré múltiples dificultades, y por quien reconozco es el autor de esta meta alcanzada. A mi familia que con su apoyo incondicional me han dado los recursos físicos y emocionales durante toda mi vida, y como recompensa de todo su trabajo y amor dedico este título, mis padres Edwin Pérez y Nuvia Aguirre, mis hermanas Andrea Pérez y Melanie Pérez.

Evelyn Solange Pérez Aguirre

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios, que sin Él no estaría alcanzando esta meta, a quién he ofrecido mi vida y serviré eternamente porque su amor es infinito y solo en él tengo paz.

A mis padres Edwin Pérez y Nuvia Aguirre, que me han brindado el apoyo financiero y emocional para realizar mi estudio universitario, por todas esas noches de amanecidas que estuvieron a mi lado pasándome un cafecito y trayéndome una cobija para seguir haciendo los deberes o estudiando para una evaluación, llevarme a la universidad siendo tan lejos de casa, brindarme consejos y llenarme de amor.

A mis hermanas Andrea Pérez y Melanie Pérez quienes estuvieron a mi lado celebrando mis éxitos y consolándome cuando hallaba el fracaso, que con sus consejos me fortalecieron, y estuvieron conmigo cuando las necesitaba, que no solo son mis hermanas, sino que las considero mis mejores amigas.

A todos mis amigos/as quienes me brindaron su apoyo y ánimos constantes que con su gran carisma me han acompañado a lo largo de mi vida y de la trayectoria académica.

A la Ing. Verónica Soria quién como tutora me dirigió con su sabiduría y gran profesionalismo al desarrollo del presente artículo, a quien considero no solo una gran profesional, sino una excelente maestra.

A mis docentes que con sus clases y guía me llevaron a ser la profesional que soy ahora, no solo como Ingeniera sino como ser humano.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por abrirme sus puertas cuando llegué de otra universidad, me convalidaron materias y pude continuar con mis estudios.

RESUMEN

Los sistemas MIMO masivos son una tecnología que ayuda a 5G en brindar mayor velocidad y eficacia de transferencia de datos en redes celulares por la gran cantidad de antenas en las estaciones base. Este incremento trae un inconveniente a la hora de detección de las señales en la estación base ya que aumenta el ruido y las interferencias. Las investigaciones han evaluado muchos detectores buscando aquellos con mejor rendimiento y baja complejidad computacional, uno de los detectores son los de cancelación de sucesiva de ruido, se detecta la señal más fuerte, y luego se le resta su interferencia a la señal recibida para luego detectar las siguientes señales.

En esta investigación se compara la eficiencia y la complejidad computacional de los detectores SIC (cancelación de interferencia sucesiva) y OSIC (cancelación ordenada de interferencia sucesiva), basados en los detectores MMSE (error cuadrático medio mínimo) y ZF (forzado cero) para detectar la señal, y luego cancelar su interferencia de la señal recibida. El detector OSIC ordena la señal en base a SNR (relación señal-ruido) o SINR (relación señal-interferencia más ruido), detectando la señal con mayor SNR o SINR y luego proceder a la cancelación de interferencia sucesiva. Para esto se simula en Matlab algunos escenarios de un sistema MIMO masivo, con 16 antenas de transmisión (dispositivo móvil) y 64, 100 y 200 antenas de recepción (estación base) mediante modulación 16, 64 y 128 QAM para evaluar la eficiencia y complejidad computacional de cada detector propuesto.

Finalmente, se presentan los resultados mediante gráficas de SNR en función de BER (tasa de error por bit) para evaluar la eficiencia de los detectores ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC-SNR en cada modulación QAM para cada dimensión del sistema MIMO masivo simulado, y una gráfica evaluando el tiempo de convergencia de cada detector para evaluar su complejidad computacional.

ABSTRACT

Massive MIMO systems are a technology that helps 5G to provide greater speed and efficiency of data transfer in cellular networks due to the large number of antennas that use in base stations. This increase brings a disadvantage when it comes to detecting signals at the base station because it increases noise and interference. Research has evaluated many detectors looking for those with the best performance and low computational complexity, one of the detectors is the successive noise cancellation detectors, the strongest signal is detected, and then its interference is subtracted from the received signal to later detect the following signs.

This investigation compares the efficiency and computational complexity of the SIC (successive interference cancellation) and OSIC (ordered successive interference cancellation) detectors, based on the MMSE (minimum mean square error) and ZF (zero forced) detectors to detect the signal, and then cancel its interference from the received signal. The OSIC detector orders the signal based on SNR (signal-to-noise ratio) or SINR (signal-to-interference ratio plus noise), detecting the signal with the highest SNR or SINR and then proceeding to successive interference cancellation. So, some scenarios of a massive MIMO system are simulated in Matlab, with 16 transmitting antennas (mobile device) and 64, 100 and 200 receiving antennas (base station) using 16, 64 and 128 QAM modulation to evaluate efficiency and computational complexity of each detector proposed.

Finally, the results are presented using graphs of SNR versus BER (bit error rate) to evaluate the efficiency of the ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR and OSIC-SNR detectors in each QAM modulation for each massive MIMO system dimension simulated, and a graph evaluating the convergence time of each detector to evaluate its computational complexity.

Comparación de técnicas de detección para sistemas MIMO masivo

Evelyn Solange Pérez Aguirre
Departamento de Ingeniería en Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
epereza2@est.ups.edu.ec

Verónica Soria Maldonado
Departamento de Ingeniería en Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
vsoria@est.ups.edu.ec

Resumen— Este artículo presenta una comparación en eficiencia y complejidad computacional entre los detectores SIC (cancelación de interferencia sucesiva) y OSIC (cancelación ordenada de interferencia sucesiva) en un sistema MIMO masivo y modulación QAM. Para los detectores SIC se evalúan los detectores basados en la pseudo inversa de la matriz del canal con el algoritmo ZF (forzado cero) y MMSE (error cuadrático medio mínimo), mientras que para los detectores OSIC se simulan aquellos que ordenan la señal por SNR (relación señal-ruido) y por SINR (relación señal-interferencia más ruido). Se realiza una simulación en Matlab de estos cuatro detectores en un sistema de 16 antenas en la transmisión, 64, 100 y 200 antenas en la recepción para modulaciones de 4 QAM, 16 QAM, y 64QAM, teniendo como resultado que al aumentar el número de antenas y disminuir el índice de modulación se mejora el rendimiento del sistema ya que a mayor ganancia disminuyen las probabilidades de pérdida de la señal. La evaluación de los detectores en estos sistemas refleja que los detectores OSIC presentan mejor rendimiento pero tienen mayor complejidad computacional.

Palabras clave— MIMO Masivo, SIC, OSIC, ZF/MMSE

I. INTRODUCTION

Las industrias de las comunicaciones inalámbricas experimentan un crecimiento exponencial en la demanda de tráfico de red y el número de dispositivos conectados, según el reporte anual de Cisco de 2020 se prevé que para el 2023 existirán alrededor de 29 mil millones de dispositivos conectados, las comunicaciones entre dispositivos a través de internet (IoT) crecerá de 6.1 mil millones del 2018 a 14.7 mil millones para el 2023 [1][2]. La tecnología de 5G se ha diseñado para cumplir estos requerimientos, con una cobertura de un millón de dispositivos conectados por km², mayor rendimiento en términos de alta velocidad de transferencia de datos, baja latencia, incremento en fiabilidad y disponibilidad [3]. Los sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) masivos son considerados como la tecnología precisa para cumplir estos requisitos en los sistemas de quinta generación. Esta tecnología se basa en incrementar el número de antenas en la estación base de decenas (LTE) a centenas (Fig. 1), con frecuencias menores a 6GHz, brinda conectividad a varios receptores con el mismo recurso de frecuencia y tiempo [4] [5]. Estudios han demostrado que los sistemas MIMO masivos logran mejorar la eficiencia espectral mientras disminuye la salida de la potencia radiada, sin embargo, la interferencia de mensajes transmitidos por diferentes antenas provoca que los receptores de estos sistemas usen un mecanismo de detección para separar los símbolos corruptos por la interferencia y el ruido [1][6].

MIMO masivo: Centenas de antenas, decenas de usuarios

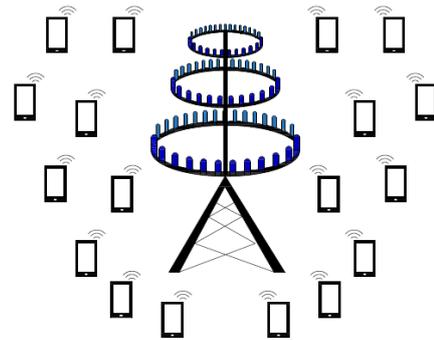


Fig. 1. Sistema MIMO masivo

Los detectores lineales como ZF y MMSE han demostrado ser efectivos y ampliamente usados debido a su baja complejidad computacional. Sin embargo, la complejidad de un detector para un sistema MIMO masivo aumenta debido al tamaño del sistema, y en caso de los detectores lineales su eficiencia disminuye por la complejidad de la inversión de la matriz[6][7]. Existen los detectores de cancelación de interferencia que han demostrado un alto rendimiento y disminución de complejidad para sistemas MIMO masivos, cuyo objetivo es eliminar las interferencias causadas por las múltiples antenas. SIC son detectores de cancelación de interferencia sucesiva, que inicia detectando y eligiendo una señal usando un detector lineal ZF o MMSE, luego la interferencia de la señal detectada es cancelada, entonces se detecta la segunda señal y se cancela de las señales restantes establecidas, este proceso se repite hasta que todas las señales sean detectadas. Aunque el desempeño es mejor que los detectores lineales, los detectores SIC presentan una desventaja, que es que la elección de la primera señal es supuestamente correcta, y esta decisión afectaría a todo el proceso iterativo, dando una probabilidad de que esta elección no haya sido la correcta. Los detectores OSIC usan de la misma manera los detectores lineales ZF o MMSE para detectar la señal, pero se elegirá la señal con mayor SNR o SINR para proceder a la eliminación de la interferencia sucesiva de SIC. [6] [8] [9].

El objetivo del artículo es llevar a simulación las técnicas ZF/MMSE SIC, OSIC SNR y OSIC SINR para evaluar su rendimiento en el Bit Error Rate (BER) usando Matlab. Este documento se compone de cinco secciones, la segunda sección describe el modelo del sistema simulado, la tercera sección se

detalla el algoritmo implementado en Matlab, la cuarta sección se muestra los resultados obtenidos con su respectivo análisis, y finalmente la quinta sección, se presentan las conclusiones halladas en esta investigación.

II. MODELO DEL SISTEMA

En esta investigación se considera un enlace de subida con N antenas en la estación base (recepción) y M antenas en el equipo del usuario (UE) de la célula (transmisión), siendo $N \gg M$ para sistemas MIMO masivos. En el enlace de subida cada usuario transmite sus símbolos de manera individual, formando un vector complejo x de dimensión $N \times 1$, y en la estación base recibe un vector complejo y de dimensión $M \times 1$, que es corrompido por efectos del canal y el ruido [6]. Entonces el vector recibido puede escribirse de la siguiente manera:

$$y = Hx + n \quad (1)$$

donde H representa la matriz compleja de ganancia del canal de dimensión $M \times N$, cuyos elementos h_{mn} se asumen como variables independientes e idénticamente distribuidas Gaussianas aleatorias con media cero y varianza unitaria. Mientras que n representa el vector complejo de ruido Gaussiano blanco aditivo (AWGN) con dimensión $M \times 1$, y varianza σ^2 por cada elemento del vector [7].

El deber del detector del sistema MIMO masivo es determinar el vector transmitido x basado en el vector recibido y . La efectividad del detector se mide en su rendimiento en tener una tasa de BER mínima y una complejidad computacional baja.

A. Detectores de Cancelación de Interferencia Sucesiva

1) ZF-SIC

El detector no lineal ZF-SIC (cancelador sucesivo de interferencia por forzado cero) consiste en detectar una de las señales recibidas usando la pseudo inversa de la matriz de canal H de (1) con el algoritmo del detector lineal ZF (2), obteniendo la señal transmitida estimada (3).

$$T_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H \quad (2)$$

$$\hat{x}_i = T_{ZF} y \quad (3)$$

donde T_{ZF} es la matriz de equalización del detector lineal ZF, \hat{x}_i es la señal estimada y H^H es la matriz hermitiana. Entonces se procede a eliminar la interferencia causada por esta primera señal de las demás en el vector y de recepción como muestra en (4).

$$y_i = y - h_i \hat{x}_i \quad (4)$$

Este proceso se repite hasta haber eliminado la interferencia causada por cada señal transmitida hacia la estación base del sistema MIMO masivo. La desventaja del detector ZF es que su rendimiento disminuye cuando el canal tiene mucho ruido, ya que al efectuar (3) aumenta ruido a la señal y este no es tratado para ser eliminado en el proceso. [8]

2) MMSE-SIC

El detector no lineal MMSE-SIC (cancelador sucesivo de interferencia por error cuadrático medio mínimo) consiste en

detectar una señal usando la matriz lineal de transformación de MMSE (5), obteniendo la señal transmitida estimada (6).

$$T_{MMSE} = (H^H H + 2\sigma^2 I)^{-1} H^H \quad (5)$$

$$\hat{x}_i = T_{MMSE} y \quad (6)$$

donde T_{MMSE} es la matriz de equalización de MMSE y σ representa la varianza de ruido AWGN. Igual que el anterior detector la interferencia de esta señal será eliminada de las otras señales recibidas en y , como se muestra en (4). Y este proceso se repite hasta haber eliminado la interferencia causada hasta la última señal recibida.[10]

La diferencia entre el detector MMSE y ZF, es que este último su objetivo es maximizar la relación señal-interferencia recibida (SINR), mientras que MMSE reduce el acrecentamiento de ruido y requiere un conocimiento de la SNR. Por lo tanto, el detector MMSE es capaz de lograr un rendimiento significativamente mejor que el detector ZF cuando la potencia de ruido es grande.[6]

B. Detectores de Cancelación de Interferencia Sucesiva ordenada

Una desventaja de los detectores SIC está en suponer que la primera señal detectada es la decisión correcta para ser eliminada de las demás, un error que se puede ir sobrellevando en todo el proceso. Es por eso que los detectores OSIC efectúan a través de dos criterios, el ordenamiento de detección de la señal, evaluando el SINR o el SNR de cada señal recibida. Estos dos criterios son tratados a continuación.

1) OSIC-SINR

Para proceder a la detección de la primera señal se efectúa el análisis de la señal con mejor SINR usando (7)

$$SINR_i = \frac{E_x |T_{iMMSE} h_i|^2}{E_x \sum_{l \neq i} |T_{lMMSE} h_l|^2 + \sigma_n^2 |T_{iMMSE}|^2} \quad (7)$$

donde $i = 1, 2, \dots, M$, E_x es la energía de la señal transmitida, T_{iMMSE} es la i -ésima fila de la ecuación (5), y h_i es la i -ésima columna del vector de la matriz del canal H (1).

La señal con mayor SINR calculada será la primera señal a ser detectada usando la matriz lineal de transformación de MMSE y luego será eliminada su interferencia de las otras señales. Después se tomará la segunda señal con mejor SINR y se repetirá la cancelación de interferencia de esta señal con las señales sobrantes. Repitiendo este proceso de manera ordenada hasta la última señal recibida.[10]

2) OSIC-SNR

En este detector la primera señal a ser detectada será aquella con mejor SNR, mediante el algoritmo de (8)

$$SNR_i = \frac{E_x}{\sigma_n^2 |T_{iZF}|^2} \quad (8)$$

donde $i = 1, 2, \dots, M$, E_x es la energía de la señal transmitida, T_{iZF} es la i -ésima fila de la ecuación (2). Y se procederá al mismo proceso descrito anteriormente, pero esta vez ordenando las señales recibidas por el criterio de SNR.

III. DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA SIMULADO

Los objetivos de esta investigación son comparar el rendimiento de los detectores SIC y OSIC evaluando el BER en función de SNR, y la complejidad de cada detector evaluando su tiempo de convergencia en un sistema MIMO masivo. Para cumplir estos objetivos se realizó una simulación en Matlab con los siguientes parámetros y el diagrama del sistema como muestra la Fig. 2:

- Sistema MIMO masivo (M x N): 16x64, 16x100 y 16x200 (M es el número de antenas de la estación base y N es el número de antenas del UE).
- Modulación: 4QAM, 16 QAM y 64 QAM.
- Canal: Canal de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) con $(0, \sigma^2)$ media y varianza respectivamente

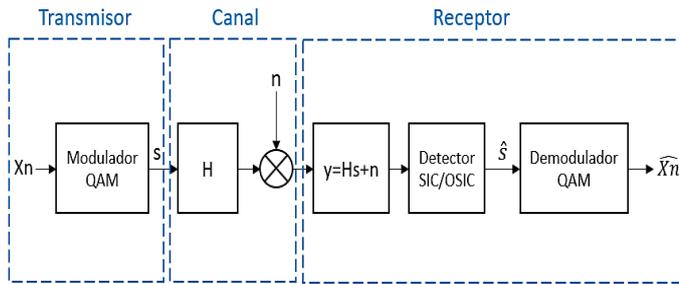


Fig. 2. Diagrama del sistema

El número de antenas en el transmisor se consideró en 16, ya que en los celulares 5G debido al tamaño del dispositivo, es complicado instalar decenas de antenas. La Fig. 3 muestra el proceso de la simulación, la cual inicia ingresando los parámetros del número de antenas del transmisor y el receptor, SNR a ser evaluado y el índice de modulación QAM a utilizar (L). Se genera con estos datos la señal transmitida x , el ruido n con varianza σ^2 (9) y el canal H con datos pseudoaleatorios.

$$\sigma^2 = \sqrt{N * energy_{QAM} * 10^{-SNR/10}} \quad (9)$$

$$energy_{QAM} = 2 * \frac{L - 1}{3} \quad (10)$$

Entonces se modula x y se calcula la señal recibida con la ecuación (1). Se envían todos estos datos a cada detector (ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC-SNR) para recuperar la señal transmitida (mediante los algoritmos descritos en la sección 2). Luego se evalúa la señal recuperada con respecto a la señal enviada para calcular el BER en función de SNR y así evaluar el rendimiento de cada detector en la modulación QAM escogida. Al llamar a cada detector se coloca un cronómetro para medir el tiempo que se demora en recuperar la señal, independientemente se almacena en una variable para, finalmente, graficar y evaluar la complejidad computacional analizando el tiempo de convergencia de cada detector. Este proceso se repite para cada sistema MIMO masivo de 16x64, 16x100 y 16x200, con cada modulación: 4QAM, 16QAM y 64 QAM.

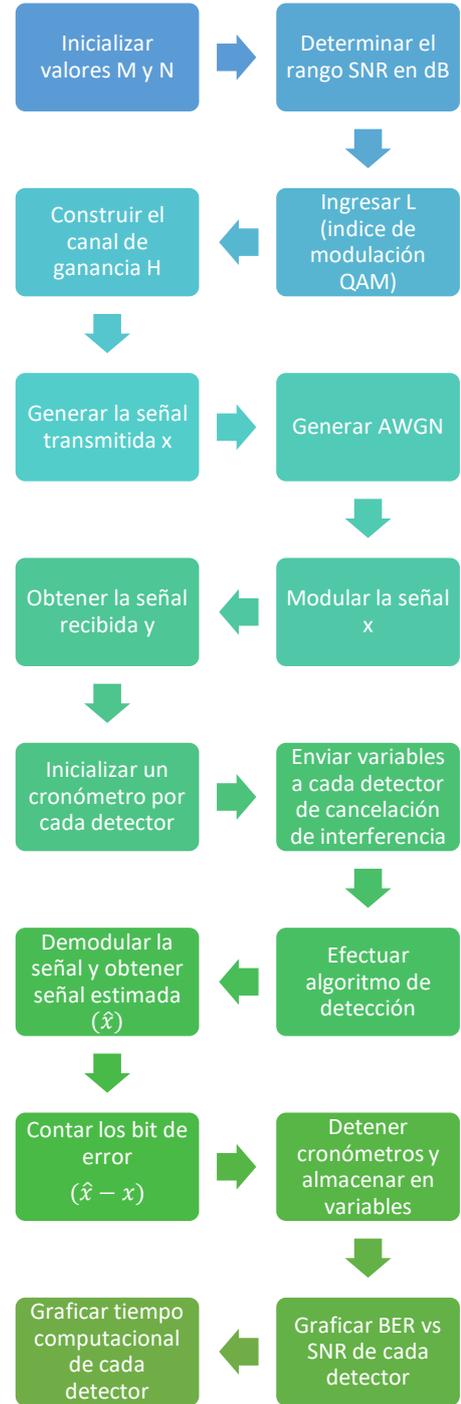


Fig. 3. Proceso de simulación

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de simulación obtenidos para los detectores de cancelación de interferencia sucesiva se muestran en las siguientes figuras, bajo diferentes esquemas de modulaciones y diferente número de antenas receptoras. Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6 muestran el comportamiento del BER de los detectores ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC SNR, para un sistema 16x64, 16x100 y 16x200, respectivamente, con modulación 4 QAM, 16 QAM y 64 QAM. Fig. 7 muestra un promedio de tiempo computacional de los detectores ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC SNR de cada sistema.

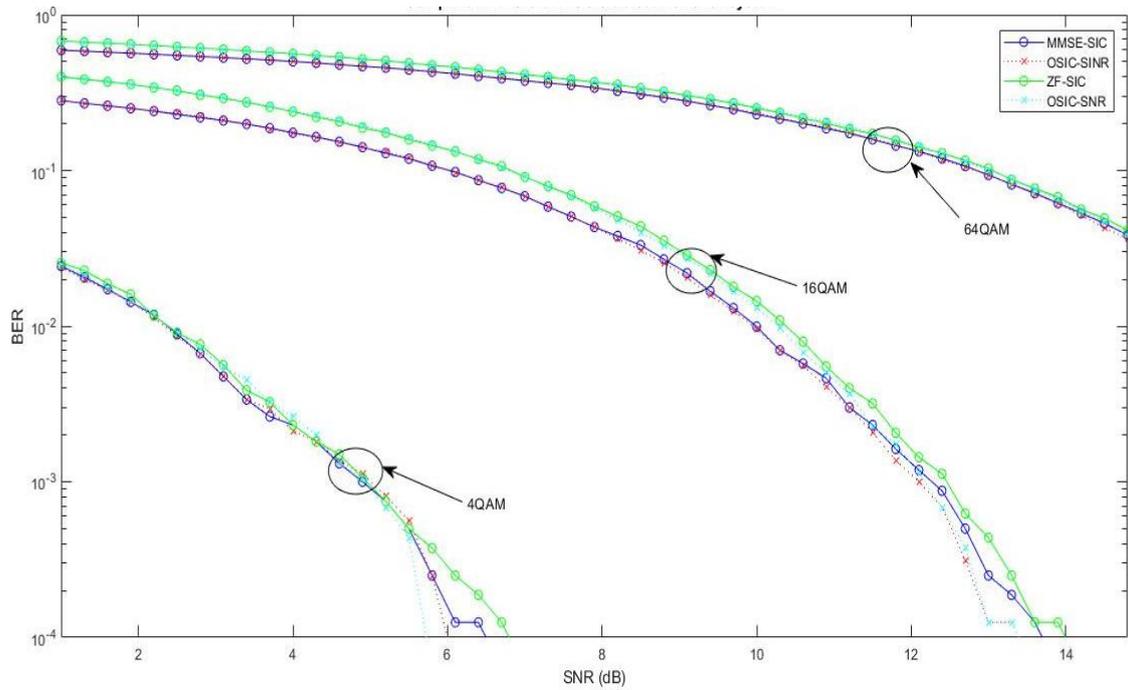


Fig. 4. BER vs SNR para ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC SINR y OSIC-SNR con modulación 4 QAM, 16QAM y 64 QAM para un sistema 16x64

En el sistema 16x64 (Fig. 4) se observa en la modulación 16 QAM para $BER=10^{-3}$, OSIC-SINR tiene un SNR de 12.2 dB, OSIC-SNR de 12.25 dB, MMSE-SIC con 12.45 dB y ZF-SIC con un SNR de 12.65 dB. OSIC-SINR es el de mejor rendimiento a 0.05 dB de OSIC SNR, a 0.25 dB de MMSE-SIC y a 0.45 dB de ZF-SIC. En cuanto a la modulación se

puede observar que al aumentar el bit/símbolo de QAM se requiere aproximadamente 7.5 dB adicionales en SNR para lograr el mismo BER de 10^{-3} , ya que, al aumentar el tamaño de la constelación, la distancia entre los bits es menor por lo que aumenta la probabilidad de error.

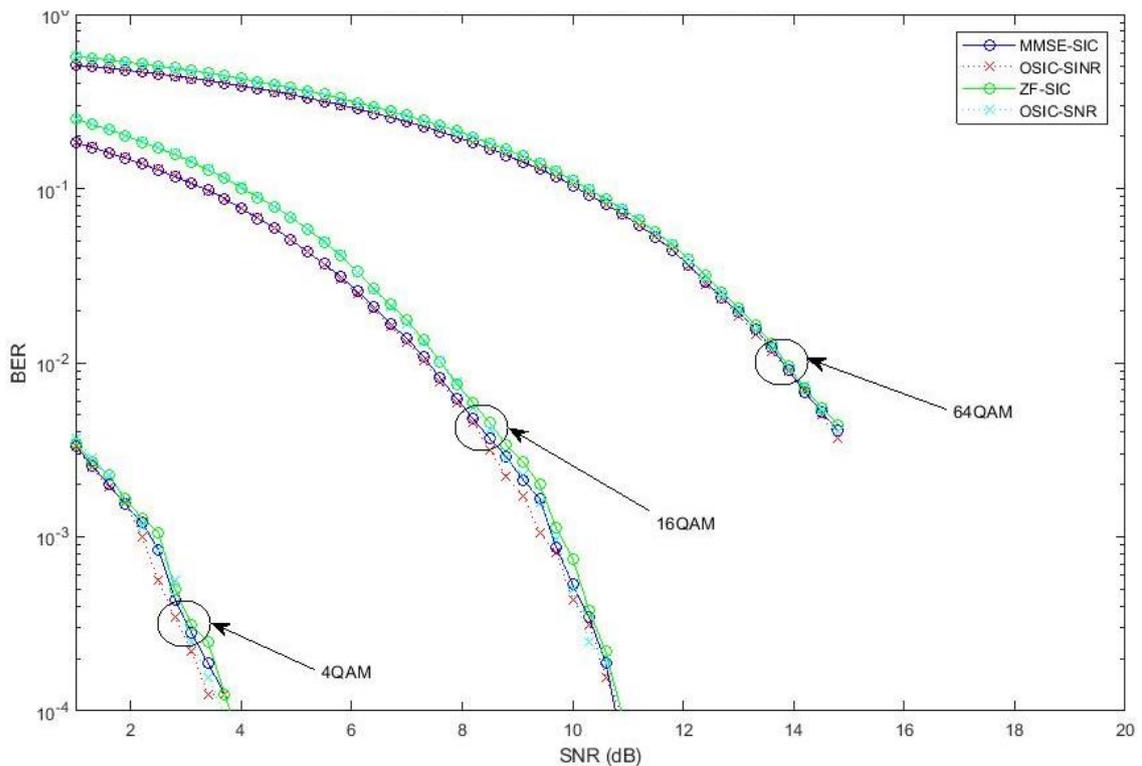


Fig. 5. BER vs SNR para ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC SINR y OSIC-SNR con modulación 4 QAM, 16QAM y 64 QAM para un sistema 16x100

En el sistema 16x100 (Fig. 5), modulación 16 QAM, se visualiza que para $BER=10^{-3}$, OSIC-SINR tiene un SNR de 9.5 dB, OSIC-SNR tiene un SNR de 9.67 dB, MMSE-SIC tiene un SNR de 9.71 dB y ZF-SIC tiene un SNR de 9.77 dB. Igual que el anterior sistema OSIC-SINR es el de mejor rendimiento, en este sistema es mejor a 0.17 dB de OSIC SNR, a 0.21 dB de

MMSE-SIC y a 0.27 dB de ZF-SIC. La modulación en este sistema se puede observar que al aumentar el índice de modulación se requiere 7 dB más en SNR para lograr el mismo BER de 10^{-3} , es decir, disminuye a 0.5 dB que con el sistema de 16x64, esto debido a que mayor número de antenas, menor valor de SNR será necesario para la detección de la señal.

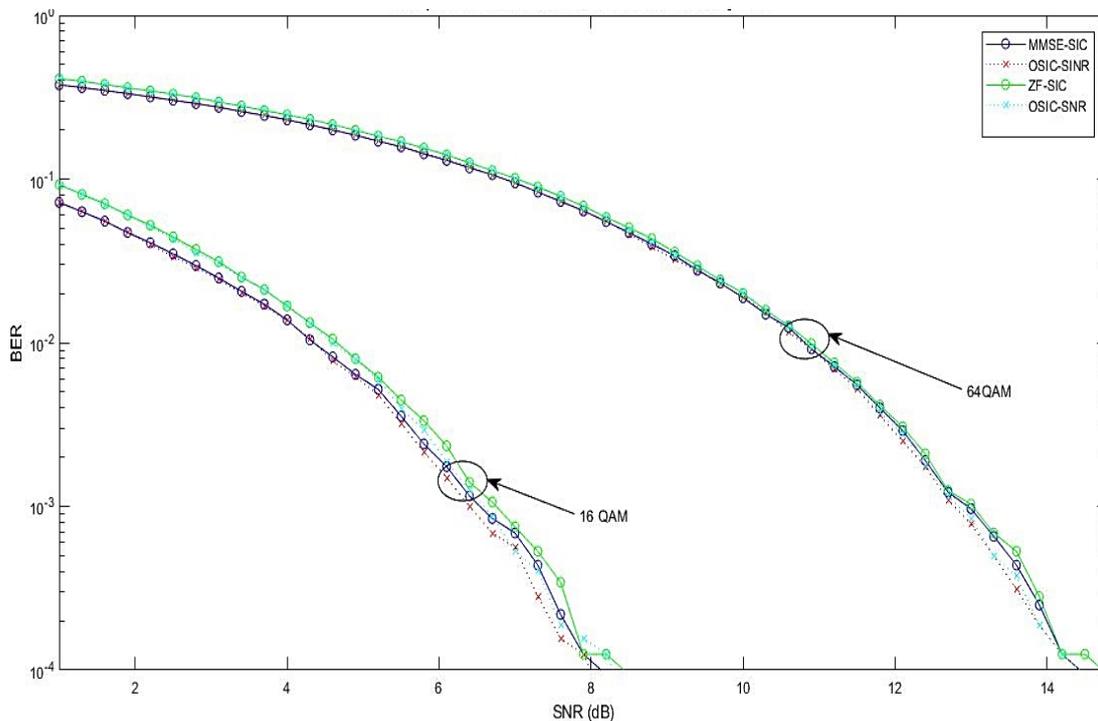


Fig. 6. BER vs SNR para ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC SINR y OSIC-SNR con modulación 4 QAM, 16QAM y 64 QAM para un sistema 16x200

En el sistema 16x200 (Fig. 6) se compara los resultados igualmente en la modulación 16 QAM para $BER=10^{-3}$, los detectores tienen un SNR de 6.45 dB en OSIC-SINR, 6.51 dB en OSIC-SNR, 6.53 en MMSE-SIC y 6.78 dB en ZF-SIC. OSIC-SINR es el de mejor rendimiento a 0.06 dB de OSIC SNR, a 0.08 dB de MMSE-SIC y a 0.33 dB de ZF-SIC. En este sistema se requiere aproximadamente 6 dB adicionales en SNR para lograr el mismo BER de 10^{-3} al aumentar el índice de modulación. Es decir, 0.5 dB menos que el sistema de 16x100.

Entonces se puede apreciar que los detectores OSIC son más eficientes que los SIC, esto debido a que como se presentó en la sección 2, los detectores SIC toman la primera señal detectada y empieza a cancelar la interferencia, mientras que OSIC primero ordena las señales recibidas con mayor SINR o SNR y luego procede a la cancelación. Mientras que los detectores que utilizan la pseudo inversa de la matriz de MMSE (MMSE-SIC y OSIC-SINR) presentan mejor rendimiento que las de ZF (ZF-SIC y OSIC-SNR), esto debido a que ambos eliminan los efectos de canal (ruido e interferencias) pero ZF no elimina el ruido que produce al realizar esta cancelación.

Se observa que mientras se incremente el número de antenas en el receptor, el BER de cada detector requiere menos SNR, esto debido a que a mayor número de antenas, mayor será la ganancia, por lo tanto menos pérdidas de la señal. Mientras que, a medida que el índice de modulación aumente

mayor es el recurso SNR que necesita, esto es porque al aumentar el tamaño de la constelación, aumenta la sensibilidad del sistema al ruido, es por esto que en la Fig. 6 el sistema con 200 antenas de recepción con modulación 4QAM el BER es tan pequeño que no logra visualizar en el gráfico.

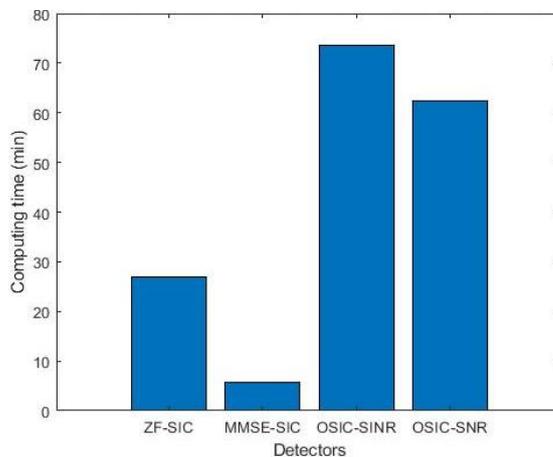


Fig. 7. Tiempo computacional de ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC-SNR en minutos

Los resultados del tiempo que se demora cada detector para recuperar la señal transmitida se observan en la Fig. 7, la suma de cada tiempo de computación de cada detector es el tiempo promedio de convergencia que requirió el programa en dar los resultados, ocupando el 44% OSIC-SINR (75 min), 36%

OSIC-SNR (60min), 17% ZF-SIC (29 min) y 5% MMSE-SIC (5min). Los detectores OSIC son los que mayores recursos ocupan (el 80% en esta simulación) debido a que como estos hacen el trabajo de ordenar las señales antes de eliminar los efectos de canal, consumen más recursos que los SIC.

V. CONCLUSIONES

En este artículo hemos evaluado los detectores de cancelación de interferencia ZF-SIC, MMSE-SIC, OSIC-SINR y OSIC SNR para el enlace de subida de sistemas MIMO masivos. El detector con mejor rendimiento es OSIC-SINR con una eficiencia de hasta 0.45 dB con respecto a los otros detectores, esto debido a que primero realiza un ordenamiento de la señal SINR más alta a la más baja y luego procede a la cancelación de interferencia usando la pseudo inversa de MMSE, pero esta efectividad se ve reflejada en ser el detector que utiliza mayores recursos computacionales. Los detectores que usan MMSE (MMSE-SIC y OSIC-SINR) tienen mejor rendimiento que los que usan ZF (ZF-SIC y OSIC SNR), con una diferencia aproximada de 0.2 dB, esto debido a que ZF no toma en cuenta el ruido en el proceso de ecualización, mientras que MMSE sí lo hace. Se pudo apreciar que al aumentar más antenas en el receptor (estación base) el BER disminuye más rápido, esto debido a que se aumenta la ganancia del sistema, por lo que el ruido disminuye y aumenta el rendimiento del sistema. En la modulación se observa que, a menor índice de modulación, menor es BER dado que, al aumentar el índice de modulación, aumenta el tamaño de la constelación, entonces existe más probabilidad de error. Y finalmente, se observa que los detectores OSIC tienen mayor complejidad computacional que los detectores SIC, ocupando el 80% de recursos computacionales en la simulación realizada, esto debido a que estos detectores realizan primero un trabajo de ordenamiento de las señales con mayor SNR o SINR para posteriormente realizar la cancelación de interferencia.

REFERENCIAS

- [1] A. R. Mishra, "Introduction to MIMO and Massive MIMO," in *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G*, 2nd ed., J. Wiley, Ed. 2018, p. 440.
- [2] Cisco, "Cisco Annual Internet Report (2018–2023)," Cisco, pp. 1–41, 2020, [Online]. Available: http://grs.cisco.com/grsx/cust/grsCustomerSurvey.html?SurveyCode=4153&ad_id=US-BN-SEC-M-CISCOASECURITYRPT-ENT&KeyCode=000112137.
- [3] V. Chamola, V. Hassija, V. Gupta, and M. Guizani, "A Comprehensive Review of the COVID-19 Pandemic and the Role of IoT, Drones, AI, Blockchain, and 5G in Managing its Impact," *IEEE Access*, vol. 8, no. April, pp. 90225–90265, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992341.
- [4] P. Zhang, J. Chen, X. Yang, N. Ma, and Z. Zhang, "Recent Research on Massive MIMO Propagation Channels: A Survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 12, pp. 22–29, 2019, doi: 10.1109/MCOM.2018.1800196.
- [5] M. Shafi *et al.*, "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
- [6] M. A. Albreem, M. Juntti, and S. Shahabuddin, "Massive MIMO Detection Techniques: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3109–3132, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2935810.
- [7] J. Minango and C. De Almeida, "Low-complexity MMSE detector based on refinement Gauss-Seidel method for massive MIMO systems," *2017 IEEE 9th Latin-American Conf. Commun. LATINCOM 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1109/LATINCOM.2017.8240166.
- [8] B. Trotobas, A. Nafkha, and Y. Louët, "A Review to Massive MIMO Detection Algorithms: Theory and Implementation," *Intech*, no. Detection algorithms of Massive MIMO, p. 20, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- [9] V. Soria, G. V Arévalo, I. Members, L. Baquero, J. Chungandro, and C. G. Santamaría, "Simulación de la técnica SIC (Cancelación de interferencia Sucesiva) para MIMO Masivo en Matlab," pp. 1–5.
- [10] A. Riadi and M. Boulouird, "ZF / MMSE and OSIC Detectors for UpLink OFDM Massive MIMO systems," no. Section VIII, pp. 767–772.