



# Performance Analysis of Low Complexity User Selection and Equalization Algorithms in MIMO Interfering Channels

## Análisis de Rendimiento de Algoritmos de Selección de Usuarios y Ecuación de Baja Complejidad en Sistemas MIMO con Canales Interferentes

Fermín M. R. Maciel-Barboza<sup>1</sup>, Leonel Soriano-Equigua<sup>\*1</sup>, Victor H. Castillo-Topete<sup>1</sup>, José L. Álvarez-Flores<sup>1</sup>, Jesus U. Mora-Quñones<sup>1</sup>, and Francisco R. Castillo-Soria<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Carretera Colima-Coquimatlán Km 9, Valle de las Huertas, Coquimatlán, Col., México, 28400.

{fermin\_maciel, lsoriano, victorc, alvarez\_jose, urielmora55}@ucol.mx

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, San Luis Potosí, México, 78295.

ruben.soria@uaslp.mx

### Abstract

Wireless communication systems have evolved to offer a greater amount of services at a lower and lower cost. To achieve this, systems have been continually improved to offer better spectral and energy efficiency for better use of available resources, which has reduced energy resource costs towards sustainable systems. Schemes with multiple antennas known as MIMO systems have been introduced in virtually all communication standards due to their good spectral and energy use thanks to multiple access by spatial division. Multi-user scheduling is a very important aspect in systems where the aim is to make the most of available resources and deliver the maximum possible capacity to users at all times. This paper deals with the performance analysis in terms of channel capacity and spectral efficiency of low complexity user selection and post-processing techniques in a MIMO system with inter-cellular interference.

**Keywords**— Channel Capacity, User Selection, Post-Processing, MIMO, Interfering Channels

### Resumen

Los sistemas de comunicación inalámbrica han evolucionado para ofrecer una mayor cantidad de servicios a un costo cada vez menor. Para lograr esto, los sistemas se han mejorado continuamente para ofrecer una mejor eficiencia espectral y energética para un mejor uso de los recursos disponibles, lo que ha reducido los costos de los recursos energéticos hacia sistemas sostenibles. Los esquemas con múltiples antenas conocidos como sistemas MIMO se han introducido en prácticamente todos los estándares de comunicación debido a su buen aprovechamiento espectral y energético gracias al acceso múltiple por división espacial. La calendarización multiusuario un aspecto muy importante en sistemas donde se pretende aprovechar al máximo los recursos disponibles y entregar la máxima capacidad posible en todo momento a los usuarios. Este artículo trata sobre el análisis del rendimiento en términos de capacidad de canal y eficiencia espectral de técnicas de selección de usuario y posprocesamiento de baja complejidad en un sistema MIMO con interferencia intercelular.

**Palabras clave**— Capacidad de Canal, Selección de Usuarios, Posprocesado, MIMO, Canales Interferentes

\* Autor de correspondencia

## I. Introducción

Un aspecto fundamental de las comunicaciones inalámbricas es que todas están compartiendo el mismo medio, el aire, por lo tanto, la interferencia siempre debe considerarse en el diseño de los sistemas que requieren una reutilización más agresiva buscando un mayor aprovechamiento espectral. La interferencia es el resultado de la superposición de las señales que se transmiten a través del aire y que son observadas por múltiples usuarios que comparten el espectro.

Existen diferentes maneras de tratar la interferencia, de las que destacan tres enfoques tradicionales: (i) Decodificar la señal interferente, (ii) Tratar la interferencia como ruido y, (iii) Ortogonalizar la señal deseada y la interferencia.

La decodificación de la señal interferente (i) es menos común en la práctica debido a la complejidad, así como resulta más difícil de generalizar el sistema para más de dos usuarios. Al decodificar la señal interferente es posible restarla de la señal recibida y así obtener una estimación precisa de la señal deseada. Tratar la interferencia como ruido (ii) puede ser una opción si la potencia de la señal interferente es baja, pero esta condición es un factor limitante y menos probable en la mayoría de los casos en donde se requiere una reutilización de frecuencias agresiva. Por último, evitar la interferencia desde el principio por la ortogonalización (iii) de la señal deseada y la interferencia es el enfoque más común para superar este aspecto fundamental en las comunicaciones inalámbricas, sin embargo, con este método, la capacidad del sistema está aun inherentemente limitada por interferencia, ya que el número total de dimensiones de señalización se divide entre los usuarios. Esta solución corresponde a una interpretación tal como dividir un pastel, donde hay un recurso compartido que debe ser dividido por todos los usuarios, ya sean dimensiones de frecuencia, intervalos de tiempo, entre otros [1].

La técnica conocida como Alineación de Interferencias (IA) se propuso para resolver el problema de la interferencia cuando hay múltiples enlaces de comunicación [2]. Sin embargo, el marco técnicas IA existentes para redes celulares proponen aún retos para su implementación práctica: el esquema propuesto en [3] requiere una extensión de dimensión de dominio de tiempo/frecuencia arbitrariamente grande, y el esquema propuesto en [4] se basa en la optimización iterativa de matrices de pre-codificación sufriendo de largos tiempos de ejecución.

Para resolver los retos de las técnicas pre-codificación de IA en sistemas MIMO y aprovechar la diversidad multiusuario en redes con gran densificación de usuarios, aparecieron las técnicas oportunistas de alineación de interferencias (OIA), que tratan de disminuir la interferencia seleccionando a aquellos usuarios cuyas condiciones

de canal de señales interferentes se encuentran lo más alineado posible, de esta manera con técnicas sencillas de baja complejidad pueden, sino eliminar completamente la interferencia, disminuirla a valores suficientemente bajos.

Los autores en [5] propusieron una técnica donde cada estación base (BS) selecciona de manera oportunista a los usuarios que generan la mínima interferencia a las otras BS. En [6] los autores demuestran que OIA solo requiere una pequeña cantidad de usuarios para lograr un rendimiento comparable al de los esquemas tradicionales de IA con retroalimentación cuantificada. En [7] proponen un diseño donde cada usuario emplea un diseño de vector con una estrategia de control de potencia en el sentido de minimizar la cantidad de interferencia generada a otras estaciones base mientras se satisface una calidad de señal requerida. En [8] se propone una nueva métrica para medir las señales interferentes basados en el volumen del paralelepípedo formado por las señales interferentes.

En trabajos recientes, en [9] se analizaron los grados de libertad (DoF) en técnicas OIA y la tasa de transmisión alcanzables en un sistema MIMO de canal interferente de enlace broadcast (MIMO-IBC). En [10] se aprovecharon las variaciones del tiempo de coherencia del canal para proponer una técnica blind-OIA, en donde no se tiene disponibilidad del estado del canal instantáneo en las BSs. En [11] se analiza la justeza (fairness) en técnicas OIA incrementando la probabilidad de atender a usuarios que no tengan mucha probabilidad de ser calendarizados.

En este artículo, se analiza un sistema MIMO de canales interferentes (MIMO-IC), en donde cada BS pretende atender a un usuario compartiendo los recursos espectrales. Este tipo de sistemas resulta muy útil en zonas con gran afluencia de usuarios que tengan disponibilidad de puntos de acceso cercanos para así poder hacer un uso eficiente de sus recursos energéticos. Al tener varios nodos cercanos, la interferencia que se crea es muy grande, por lo tanto no se puede tratar como ruido. Por ello se analiza una técnica de selección y filtro de post-procesado en donde se busca minimizar la señal interferente más ruido (INR). En los resultados de simulación se muestra la capacidad de canal alcanzable para 1, 2 y 3 nodos transmisores. Para 1 nodo transmisor se observa que no es necesario realizar una calendarización basada en indicador de calidad de canal (CQI), sino que se puede optar por técnicas de acceso aleatorio. Para 2 nodos transmisores, la cantidad de antenas en transmisión y recepción, permiten utilizar técnicas de post-procesado que pueden eliminar la interferencia, por lo tanto con técnicas de selección aleatoria es suficiente para el funcionamiento adecuado del sistema. Por otro lado, con 3 nodos se observa que es imprescindible realizar una selección de usuarios aprovechando la diversidad espacial existente,

ya que el algoritmo aleatorio da un desempeño muy reducido. Con esto se demuestra la necesidad de utilizar técnicas de calendarización y post-procesado en donde se puede mejorar el desempeño del sistema aprovechando los recursos disponibles.

Este artículo se organiza de la siguiente manera; en la sección II se presenta el modelado del sistema MIMO de canales interferentes con las señales involucradas. En la sección III, se presenta la estrategia de calendarización y postprocesado para la minimización de interferencia más ruido. En la sección IV, se presenta el análisis de resultados de simulación. Finalmente, en la sección V se describen las conclusiones del artículo.

## II. Modelado del sistema

### II.1. Sistema MIMO de Canales Interferentes

Un sistema MIMO de canales interferentes se refiere a un sistema en donde se tienen múltiples nodos o estaciones base compartiendo los mismos canales en tiempo y frecuencia. En el entorno de telefonía celular se dice que la reutilización de frecuencias es unitaria. Este tipo de sistemas aumenta significativamente la eficiencia total debido a la disponibilidad de mayor cantidad de canales. En contrapartida, los nodos deben realizar una cuidadosa calendarización de los usuarios para evitar la interferencia que se puede generar. En el caso de tener 3 nodos, se tendrían 2 nodos interferentes en todo momento.

Los sistemas MIMO pueden aprovechar la diversidad espacial siempre y cuando la separación entre antenas sea suficiente y el canal tenga suficiente dispersión. Cuando se tienen múltiples antenas, los nodos pueden aplicar técnicas de pre-codificación para preparar sus señales de acuerdo a la condición de los canales, también los receptores pueden aplicar técnicas de post-procesado para eliminar la interferencia residual.

En la Figura 1 se ilustra un sistema MIMO en canales interferentes (MIMO-IC) en donde se tienen 3 estaciones base (BS) que envían datos al mismo tiempo a sus respectivos receptores móviles (MS) con 2 antenas transmisoras ( $M = 2$ ) y 2 antenas receptoras ( $N = 2$ ). Se observan las señales con línea continua referentes a las señales enviadas desde la BS- $i$  hacia el MS- $i$  y las señales interferentes en línea punteada desde la BS- $j$  hacia el MS- $i$  en donde  $i \neq j$ . De esta manera la BS-1 se comunica con el MS-1, la BS-2 se comunica con el MS-2 y así sucesivamente. Cabe mencionar que este sistema se puede extender a mayor cantidad de pares de nodos.

Del lado de cada una de las BS se ejemplifican en diferentes colores los vectores que representan pre-codificadores que se aplican en cada BS. Estos vectores se refieren a la magnitud y fase que se aplica a cada señal transmitida en cada antena de cada estación base. Estos vectores se deben calcular de manera que en cada uno de

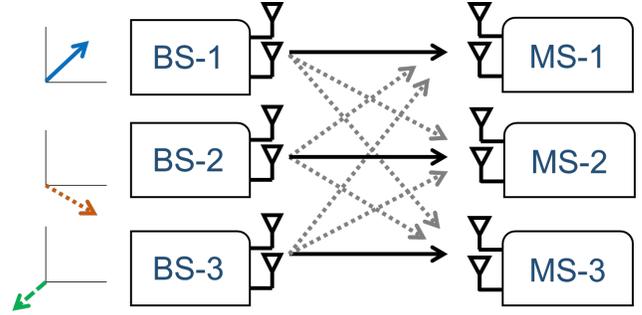


Figura 1: Sistema MIMO de canal interferente para  $K = 3$ ,  $M = 2$  y  $N = 2$

los receptores las señales interferentes estén alineadas, de esta manera cada receptor sólo observa una señal interferente la cual puede eliminar mediante una técnica de post-procesado.

El sistema MIMO de canal interferente con  $K$ -nodos consiste en  $K$  pares de transmisores y receptores al igual como se ilustra en la Figura 1, en donde  $K = 3$ . En este tipo de sistema cada transmisor envía información hacia su receptor correspondiente y genera interferencia a  $K - 1$  receptores.

La señal recibida por el  $i$ -ésimo receptor en el sistema MIMO-IC está dada por

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{[i,i]} \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{[j,i]} \mathbf{W}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_i, \quad (1)$$

donde  $\mathbf{H}_{[i,j]} \in \mathbb{C}^{N \times M}$  representa la matriz compleja del canal directo entre el transmisor  $i$  y el receptor  $i$ ,  $\forall i \in \{1, 2, \dots, K\}$ . Donde  $N$  es la cantidad de antenas en el receptor y  $M$  es la cantidad de antenas en el transmisor.  $\mathbf{H}_{[j,i]} \in \mathbb{C}^{N \times M}$  representa la matriz compleja del canal interferente entre el transmisor  $j$  y el receptor  $i$ ,  $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, K\}$  teniendo en cuenta que  $i \neq j$ .  $\mathbf{W}_i \in \mathbb{C}^{M \times d}$  es la matriz de precodificación del  $i$ -ésimo transmisor. Donde  $d$  se refiere a las cadenas de transmisión asignadas a cada receptor.  $\mathbf{s}_i \in \mathbb{C}^{d \times 1}$  es el vector de señal transmitida al usuario  $i$ . El vector de ruido en el receptor  $i$   $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  se modela como un ruido aditivo blanco Gaussiano con media 0 y varianza  $\sigma_{\mathbf{n}_i}^2$ . Finalmente,  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  es el vector complejo de señal recibida en el usuario  $i$ .

La sumatoria en la ecuación 1 corresponde a la interferencia de los transmisores cuya señal es no deseada. Debido que este término es significativo, en la mayoría de los casos no puede ser ignorado ni tratado como ruido ya que afectaría gravemente el rendimiento.

Para recuperar la señal deseada se aplica un filtro de post-procesado en el  $i$ -ésimo receptor  $\mathbf{V}_i \in \mathbb{C}^{N \times d}$ , lo cual nos lleva a la señal post-procesada  $\hat{\mathbf{y}}_i$

$$\hat{y}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{y}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{H}_{[i,i]} \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{V}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{[i,j]} \mathbf{W}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{V}_i^H \mathbf{n}_i. \quad (2)$$

Los vectores  $\mathbf{W}_i$  y  $\mathbf{V}_i$ , se pueden calcular mediante técnicas de alineación de interferencias (IA). De forma cerrada para  $K = 3$  se pueden calcular las matrices mediante el algoritmo presentado en [2]. Para  $K > 3$  se puede optar por algoritmos iterativos como el algoritmo de minimización alternada [12] así como el algoritmo de maximización de la SINR [13]. En los algoritmos propuestos por los autores en [2],[12] y [13] se tienen las siguientes problemáticas:

- Se requiere una cooperación entre los nodos, es decir deben tener una unidad central de proceso que controle todas las BSs.
- Se requiere un conocimiento global de la información del estado del canal entre todos los nodos transmisores, lo que conlleva a un alto overhead.
- En los dos últimos se requiere una optimización iterativa.

Para evitar estas problemáticas mencionadas, en este artículo se opta por un sistema de transmisión oportunista para el cálculo de las matrices de precodificación.

### III. Ecuación y Calendarización

#### III.1. Minimización de la Señal de Interferencia más Ruido

En la Figura 2 se muestra en verde (línea continua) las señales de interés que son las señales interferentes, como se puede observar las señales en color gris (línea punteada) son las señales deseadas, en este caso se tratan como ruido a la hora de aplicar el combinador. Para este esquema, es necesario que el receptor tenga conocimiento del estado de los canales interferentes. En este algoritmo el usuario  $i$  busca minimizar la señal de interferencia más ruido (INR) en el lado del receptor mediante la aplicación de un filtro de post-procesado  $\mathbf{v}_i^{INR}$  a la señal recibida  $y_i$ .

En este algoritmo se detalla cómo se obtienen los vectores de pre-codificación y los vectores de post-procesado definidos por  $\mathbf{w}_i$  y  $\mathbf{v}_i$ , para el  $i$ -ésimo nodo transmisor y el  $i$ -ésimo receptor respectivamente.

La señal recibida  $y_i$  en el MS- $i$  está dada por:

$$y_i = \alpha_{i,i} \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{w}_i s_i + \alpha_{j,i} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j s_j + \mathbf{n}_j \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{H}_{j,i}$  representa la señal de la BS- $j$  hacia el MS- $i$  y  $\mathbf{n}_i$  el ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) referente al ruido térmico y  $s_i$  es la señal modulada que va hacia el receptor  $i$ . En este caso se quiere minimizar la señal

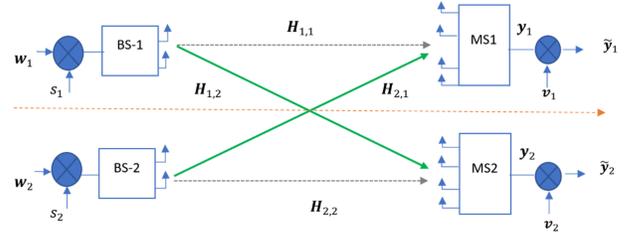


Figura 2: Modelo del sistema interferente minimización de INR (caso de estudio) donde  $M = 2$ ,  $N = 4$ ,  $K = 2$ ,  $d = 1$ ,  $S = 1$

de interferencia inter-celular  $\mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j s_j$  procedente de la BS- $j$  hacia el MS- $i$ . Finalmente,  $\alpha_{j,i}$  representa la pérdida por trayectoria desde la base  $j$  hacia el usuario  $i$ , finalmente  $\mathbf{w}_j$  es el pre-codificador en el nodo  $j$ . En el algoritmo de minimización de la INR, se considera la matriz equivalente para MS- $i$  en la base BS- $j$  para el caso de  $K = 2$

$$\mathbf{Q}_{j,i} = \alpha_{j,i} \frac{P}{d} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{H}_{j,i}^H \quad (4)$$

Que en general puede escribirse para  $K > 2$  como:

$$\mathbf{Q}_{j,i} = \frac{P}{d} \sum_{n=1, n \neq i}^K \alpha_{j,i} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{H}_{j,i}^H \quad (5)$$

donde  $P$  es la potencia transmitida y  $d$  son los grados de libertad del sistema. El MS- $i$  calcula su vector de post-procesado de la siguiente manera:

$$\mathbf{v}_i^{INR} = \mathbf{v}_i(\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (6)$$

#### III.2. Selección de usuario de min-INR

En este tipo de algoritmo el transmisor selecciona a los usuarios que tengan una mínima interferencia más ruido. Para ello los usuarios retroalimentan a sus respectivas BSs un indicador de calidad de canal (CQI) y el nodo transmisor selecciona a los usuarios que se encuentren en mejores condiciones referentes a la métrica de INR. El CQI que retroalimenta el  $i$ -ésimo usuario se da por:

$$\frac{1}{d} \sum_{l=N-d+1}^N \sigma_l(\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (7)$$

donde  $\sigma_l(\mathbf{Q}_{j,i})$  denota el  $l$ -ésimo valor singular de la matriz  $\mathbf{Q}_{j,i}$ . Por lo tanto, el  $i$ -ésimo transmisor selecciona de manera oportunista a un usuario  $S_i$  como:

$$S_i = \arg \min_{S_i \in S} \sum_{l=1}^d (\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (8)$$

## IV. Análisis de resultados de simulación

En esta sección se muestran los resultados en términos de capacidad de canal de las simulaciones obtenidas a través de gráficas y tablas, con distintos parámetros del sistema para el algoritmo de selección de usuarios y ecualización para la Minimización de la Interferencia.

### IV.1. Parámetros del sistema

Los parámetros del sistema referentes al tipo de canal, cantidad de nodos, usuarios por nodo, cantidad de antenas en cada transmisor (Tx) y receptor (Rx), entre otros se mencionan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Parámetros de Simulación.

Parámetro	Definición
$\mathbf{H}_{[i,i]}$	Matriz de canal
$K$	Cantidad de nodos
$N$	Antenas en cada Rx
$M$	Antenas en cada Tx
$S$	Usuarios por nodo
$SNR$	Relación señal a ruido
$C$	Capacidad de canal

### IV.2. Capacidad de Canal para el algoritmo min-ISR

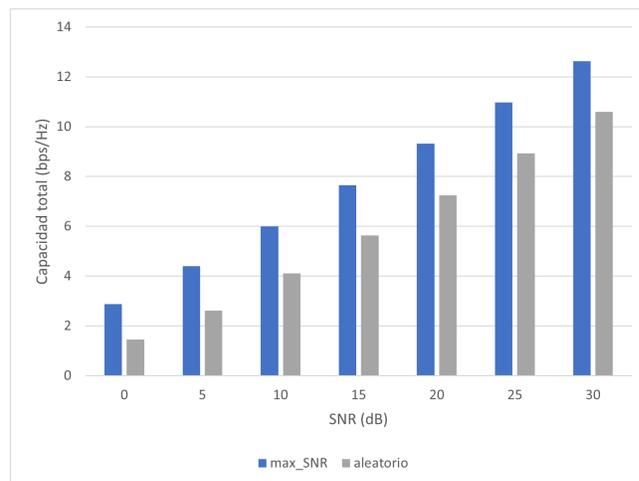
En la Tabla 2 se muestran los resultados en términos de capacidad de canal del algoritmo min-ISR con los valores de  $K = 2$  y  $K = 3$ , la cantidad de antenas receptoras  $N = 2$  y transmisoras  $M = 2$ , cantidad de usuarios en cada nodo  $S = 50$ .

**Tabla 2:** Capacidad de Canal para el algoritmo min-ISR con  $K = 1$ ,  $K = 2$  y  $K = 3$ .

SNR	$C$ para $K = 1$	$C$ para $K = 2$	$C$ para $K = 3$
5	1.6	3.4	5
10	2.9	5.8	8.4
15	4.3	8.7	12.1
20	5.8	11.9	15.2
25	7.5	14.9	17.6
30	9	18.3	18.9

En la figura 3 se muestra un caso en el cual  $K = 1$ , es decir sólo se tiene un nodo transmisor y se deben seleccionar usuarios, en este caso se opta por la selección que maximice la relación señal a ruido (SNR), se observa también el resultado del algoritmo aleatorio, como su nombre lo dice se selecciona de manera aleatoria a los usuarios, sin embargo una vez seleccionados los usuarios requieren aplicar un vector de post-procesado el cual, se

refiere al vector que maximice la SNR. Se observa que en este caso resulta una mejor opción considerar el algoritmo que maximice la SNR debido a que no hay interferentes para aplicar el algoritmo min-ISR de la sección III. Se observa una ganancia de más de 3 bps/Hz a diferencia del algoritmo min-ISR cuando  $K = 1$ . Sin embargo, este es un caso trivial en donde no existen nodos interferentes, se realiza sólo para cuestiones comparativas.

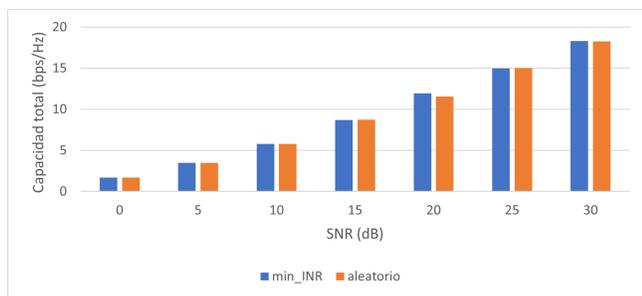


**Figura 3:** Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo max-ISR y algoritmo de selección aleatoria con  $K = 1$ ,  $M = 2$  y  $N = 2$ ,  $S = 50$

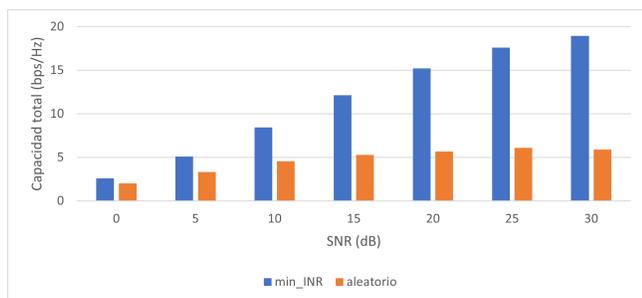
En la figura 4 se observa la Capacidad vs SNR la cual sigue la tendencia mencionada en la Tabla 2. Se compara el algoritmo min-ISR con el algoritmo que selecciona a los usuarios de manera aleatoria pero los usuarios en ambos casos utilizan el mismo ecualizador. Aquí el algoritmo de selección de usuarios que minimice la ISR y el algoritmo aleatorio obtienen el mismo rendimiento, esto sucede ya que es un caso trivial en donde se puede eliminar por completo la interferencia por la cantidad de ecuaciones e incógnitas. Para esta situación se observa que no es necesario un algoritmo de selección de usuarios ya que el indicador de canal que retroalimenta los usuarios tiende a cero debido a que es posible eliminar por completo la interferencia.

En la Figura 5 se observa una ventaja muy grande si se compara el algoritmo de selección de usuarios min-ISR y el algoritmo aleatorio ya que este ya no es un caso trivial por la cantidad de ecuaciones e incógnitas y no es posible eliminar completamente la interferencia. Por lo tanto, el indicador de canal que retroalimenta cada usuario ya no tiende a cero y es conveniente seleccionar a los usuarios que minimicen la interferencia teniendo una ganancia de más de 10 bps/Hz en altos niveles de SNR.

Con los resultados obtenidos en las figuras 4-5 se pudo observar la necesidad de un algoritmo de selección de



**Figura 4:** Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo de selección aleatoria con  $K = 2$ ,  $M = 2$  y  $N = 2$ ,  $S = 50$



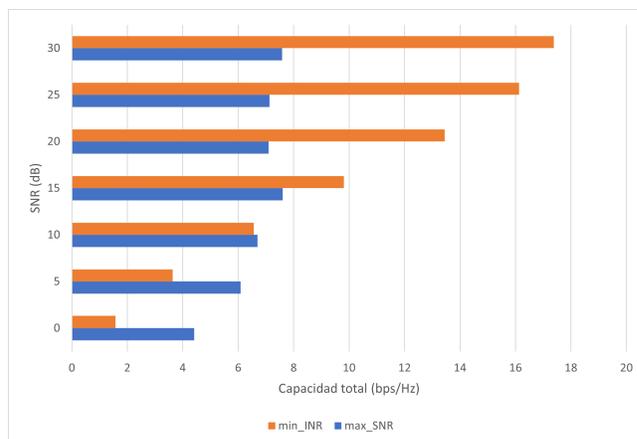
**Figura 5:** Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo de selección aleatoria con  $K = 3$ ,  $M = 2$  y  $N = 2$ ,  $S = 50$

usuarios en los casos en los cuales no es posible eliminar por completo la interferencia. Se observa además que es posible obtener una ventaja en términos de capacidad cuanto mayor sea la cantidad de nodos debido a que se puede aprovechar la diversidad espacial y seleccionar aquellos usuarios en donde las señales interferentes tengan mayor alineación.

Finalmente, en la figura 6, se muestra una comparativa entre los algoritmos max-SNR y min-INR, en esta interesante comparativa se observa que a bajos niveles de SNR, no habrá tanta afectación de interferencia por lo tanto hasta alrededor de 10 dB no hay ganancia con el algoritmo min-INR, sin embargo, a altos niveles de SNR ( $> 10$  dB) el algoritmo min-INR muestra un resultado muy superior.

## V. Conclusiones

En este artículo se abordó el estudio de la selección de usuarios y el post-procesado de baja complejidad en un sistema MIMO con interferencia inter-celular así como el análisis de las mismas en términos de capacidad de canal. Se estudió la detección y post-procesado para la maximización de la SNR (max-SNR) y la minimización



**Figura 6:** Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo max-SNR con  $K = 3$ ,  $M = 2$  y  $N = 2$ ,  $S = 50$

de la INR (min-INR). El comportamiento del algoritmo max-SNR fue bueno a bajos niveles de SNR en donde no hay gran afectación de la interferencia, sin embargo se observó que el algoritmo min-INR es capaz de mejorar el desempeño a niveles medio y alto de SNR tomando por el simple hecho de no considerar la interferencia en el diseño del ecualizador. Resulta entonces interesante pensar en un algoritmo adaptativo que aproveche las bondades y las condiciones en donde cada algoritmo pueda entregar un mejor rendimiento. No obstante, este tema se considera para un trabajo a futuro. Los esquemas con múltiples antenas conocidos como sistemas MIMO se han ido introduciendo en prácticamente todos los estándares de comunicaciones debido a su buen aprovechamiento espectral y energético gracias al acceso múltiple por división espacial (SDMA). Los sistemas celulares se han caracterizado por esquemas de reutilización de frecuencias, sin embargo, esto hace que no se disponga de gran cantidad de recursos en una célula, además de que se tienen esquemas fijos que no permiten adaptarse a cambios constantes en la red. Los sistemas MIMO interferente demuestran tener un gran potencial gracias a la reutilización total de los recursos en los nodos transmisores. Las técnicas de transmisión y detección con múltiples antenas aprovechan los grados de libertad disponibles en el dominio espacial para poder transmitir señales a múltiples usuarios y mejorar la capacidad total de los sistemas.

## Referencias

- [1] Syed A. Jafar. *Interference Alignment: A New Look at Signal Dimensions in a Communication Network*. Now Publishers, 2011.

- [2] Viveck R. Cadambe y Syed Ali Jafar. «Interference Alignment and Degrees of Freedom of the  $K$  User Interference Channel». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 54.8 (2008), págs. 3425-3441. DOI: 10.1109/TIT.2008.926344.
- [3] Changho Suh y David Tse. «Interference Alignment for Cellular Networks». En: *2008 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. 2008, págs. 1037-1044. DOI: 10.1109/ALLERTON.2008.4797673.
- [4] Tiangao Gou y Syed A. Jafar. «Degrees of Freedom of the  $K$  User  $M \times N$  MIMO Interference Channel». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 56.12 (2010), págs. 6040-6057. DOI: 10.1109/TIT.2010.2080830.
- [5] Bang Chul Jung y Won-Yong Shin. «Opportunistic Interference Alignment for Interference-Limited Cellular TDD Uplink». En: *IEEE Communications Letters* 15.2 (2011), págs. 148-150. DOI: 10.1109/LCOMM.2011.121310.101439.
- [6] Johann Leithon y col. «A new opportunistic interference alignment scheme and performance comparison of MIMO interference alignment with limited feedback». En: *2012 IEEE Globecom Workshops*. 2012, págs. 1123-1127. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477736.
- [7] Jangho Yoon, Won-Yong Shin y Hwang Soo Lee. «Energy-Efficient Opportunistic Interference Alignment». En: *IEEE Communications Letters* 18.1 (2014), págs. 30-33. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.111513.131938.
- [8] F. M. Maciel-Barboza y col. «Volume Based Opportunistic Interference Alignment over Correlated MIMO IBC». En: *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CSNDSP.2018.8471828.
- [9] Long Suo y col. «Achievable Sum Rate and Degrees of Freedom of Opportunistic Interference Alignment in MIMO Interfering Broadcast Channels». En: *IEEE Transactions on Communications* 67.6 (2019), págs. 4062-4073. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2903250.
- [10] Milad Johnny y Alireza Vahid. «Exploiting Coherence Time Variations for Opportunistic Blind Interference Alignment». En: *IEEE Transactions on Communications* 68.10 (2020), págs. 6054-6069. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3011687.
- [11] Huabing Lu y col. «Fairness Enhancement for Opportunistic Interference Alignment Algorithm With Low Latency Communications». En: *IEEE Systems Journal* 14.4 (2020), págs. 5002-5013. DOI: 10.1109/JSYST.2020.2969481.
- [12] Steven W. Peters y Robert W. Heath. «Interference alignment via alternating minimization». En: *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 2009, págs. 2445-2448. DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4960116.
- [13] Krishna Gomadam, Viveck R. Cadambe y Syed A. Jafar. «A Distributed Numerical Approach to Interference Alignment and Applications to Wireless Interference Networks». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 57.6 (2011), págs. 3309-3322. DOI: 10.1109/TIT.2011.2142270.