

# Beamforming de arreglos planos MIMO Masivo usando optimización metaheurística

Jan Polanco Velasco  
janpolanco@javerianacali.edu.co

**Resumen**—Three numerical experiments were carried out using a defined collection of five Metaheuristic Algorithms (MA) that allowed evaluating the *Beamforming* in a planar array of Massive MIMO antennas. The performance of the experiments were set according to metrics, graphs and experiments were also defined, detailing initial aspects such as the array factor, Power supplied to users, directivity, etc.

In addition, the functions to validate and compare the performance of the AM's are tested and metrics such as average number of iterations, execution time, etc. The implementation of the algorithms on the different test functions and experiments was carried out in the MATLAB software and the comparison was made with the R Software, doing a *Principal Component Analysis (PCA)*. For the experiments, we use the reference Radiation pattern that depends on the input to build the multiobjective function in the optimization problem.

Finally, it was found that the proposed experiments are adequate to determine the performance of AMs in the *Beamforming* problem and it was possible to determine that *Cuckoo Search by Levy Flights (CKLF)* and *Particle Swarm Optimization (PSO)* are the AM's that best fit each of the proposed experiments. With the above, it is possible to conclude that these algorithms present the most similar radiation diagrams to the objective function within the optimization problem.

**Index Terms**—Masive MIMO, Beamforming, Plannar Array, Metaheuristic Algorithms, Telecommunication Networks, PCA, MATLAB, R.

## I. OBJETIVOS

- Evaluar los AM en el problema de la Formación de haz de un arreglo plano de antenas 8x8 MIMO masivo.
- Formular cálculos sobre arreglos de antenas planas para verificar los diagramas de radiación.
- Diseñar experimento de la Formación de haz para analizar el desempeño de cada uno de los AM.
- Realizar análisis estadístico multivariado sobre los resultados obtenidos de cada AM.

## II. INTRODUCCIÓN

La necesidad de comunicarse y estar siempre conectados hace que las telecomunicaciones tengan un papel importante en la sociedad. Ahora bien, en la actualidad hay más de 8100 millones de dispositivos conectados a Internet y día a día la cantidad aumenta de forma exponencial, creando problemas en la red (áreas de cobertura deficientes, baja calidad en el servicio, mayor latencia, etc.). Esto ha llevado a la comunidad científica y al sector industrial a buscar soluciones entre las cuales se ha considerado la implementación de nuevas tecnologías, esquemas de modulación, uso de nuevo espectro

radioeléctrico, optimización de espectro, soluciones hardware y soluciones software, entre otras.

Para lograr los objetivos planteados se consideraron cinco Algoritmos Metaheurísticos (AM) que encuentran los óptimos de una superficie multidimensional y reconfiguran los pesos complejos de la ecuación del factor de arreglo, lo cual permite orientar y maximizar el lóbulo principal de la onda electromagnética a cierta ubicación deseada.

El presente artículo está organizado de la siguiente forma. En la primera parte se revisó el factor de arreglo y su validación con literatura existente. Se identificaron las funciones de prueba. En la segunda parte se diseñó el patrón de radiación de referencia y la función multiobjetivo. Se establecieron las métricas adecuadas. Finalmente se realizó un análisis estadístico para determinar los AM con el mejor desempeño en el problema de optimización, análisis de resultados, discusión y conclusiones.

## III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En la actualidad las telecomunicaciones ocupan un papel importante para la sociedad, a mundial según datos de *Ericsson Mobility Report*, el tráfico promedio de datos por teléfono inteligente estimado para el 2021 esta en 11.4GB/mes, con más de 8100 millones de suscripciones móviles [3]. Por ejemplo, según *Ministerio de las TIC*, al termino del primer trimestre del 2021, se alcanzó 69,4 millones de líneas de telefonía móvil. Por lo tanto, durante el 2021, por cada 100 colombianos existen 136 líneas de telefonía móvil y un consumo promedio de datos de 7.3 GB/mes.

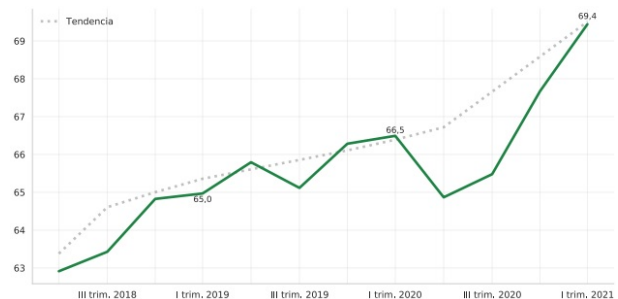


Figura 1. Datos reportados por los proveedores de redes y servicios a Colombia TIC. Fuente:[2].

Por otro lado, el *Beamforming* usa un arreglo de antenas para controlar el diagrama de radiación de una onda electromagnética (ver Figura 2), realizando una ponderación

adecuada de la magnitud y la fase de cada elemento de la antena de forma individual.

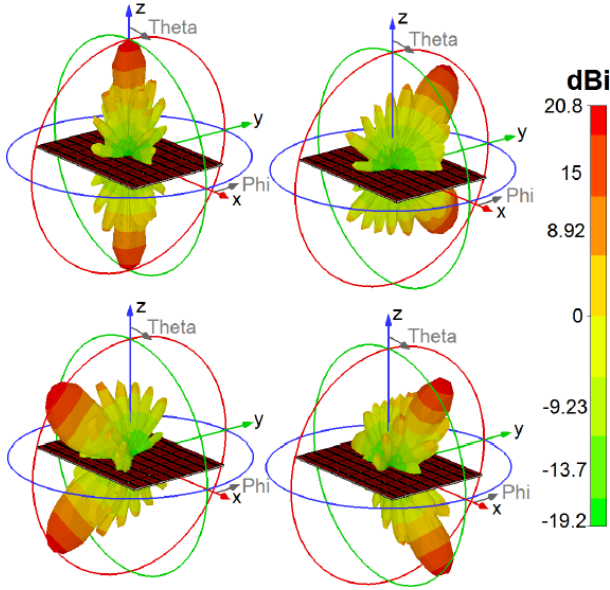


Figura 2. Patrón de radiación 3D 8x8 a diferentes ángulos. Fuente: [5].

El problema del *Beamforming* se debe al desplazamiento de los usuarios cantidad de elementos haciendolas costosas y poco atractivas para implementarlas a nivel comercial. Los algoritmos metaheurísticos son una estrategia de solución de ensayo y error para encontrar soluciones buenas y factibles a problemas complejos en tiempos razonablemente prácticos [6].

Basados en la figura (3) se observa un arreglo rectangular en el plano  $x - y$  que tiene  $M$  elementos en la dirección  $x$  espaciados  $d_x$  y  $N$  elementos en la dirección  $y$  espaciados  $d_y$ , creando un arreglo de  $M \times N$ , cada m-n elementos del arreglo de antenas tienen peso complejos  $w_{mn}$  asociado[1].

$$AF = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N W_{mn} e^{j[(m-1)\psi_x + (n-1)\psi_y]} \quad (1)$$

Donde  $W_{mn} = a_{m1} \cdot b_{1n} \cdot e^{j[(m-1)\beta_x + (n-1)\beta_y]}$  es la matriz pesos complejos o coeficientes de excitación complejos de cada elemento m-n (véase ecuación 1).  $d_x, d_y$  la distancia entre elementos en  $x$  y  $y$ .  $\beta_x, \beta_y$  es la fase progresiva entre los elementos.  $k = 2\pi/\lambda$  el número de onda.

$$\beta_x = -kd_x \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad \beta_y = -kd_y \sin \theta_0 \sin \phi_0 \quad (2)$$

$$\psi_x = (kd \sin \theta \cos \phi + \beta_x) \quad \psi_y = kd \sin \theta \sin \phi + \beta_y \quad (3)$$

**III-1. Validación Factor de Arreglos:** Para la validación del código del factor de arreglo, se realiza una validación indirecta entre los ejemplos suministrados por Balanis [1] y Gross [4] sobre los resultados obtenidos en el Software MATLAB.

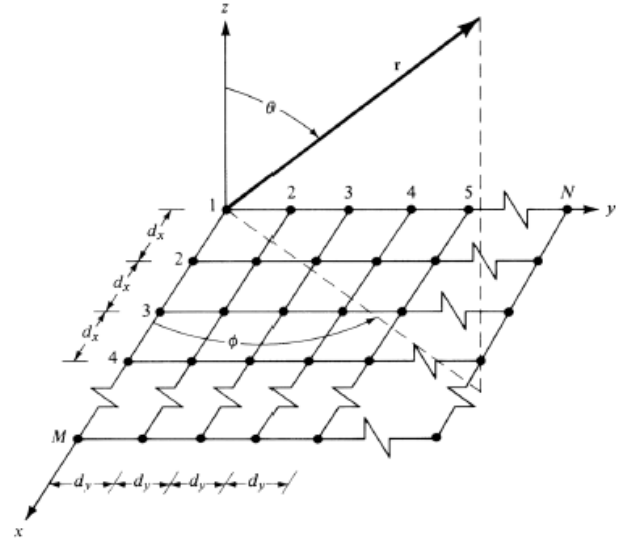


Figura 3. Geometría de arreglo plano  $M \times N$ . Fuente: [1].

### III-A. Funciones de prueba

Para esto se consideraron funciones de prueba que se agruparon según sus similitudes en sus propiedades y formas, tales como son modalidad, separabilidad, valles, presencia de cuencas, etc. Se consideraron tres tipos de superficies, Un óptimo local y varios óptimos globales (*Ackley* y *modified Schaffer #2*), aquellas que sus superficies son planas con óptimo global (*Goldstein-Price* y *León*) y aquellas que tienen varios óptimos globales (*Bird*, *Holder table*) y la función *Deflected Corrugated Spring*.

### III-B. Algoritmos Metaheurísticos

La presente investigación se enfocó en 5 AM: Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), Bat Algorithm (BA) y Cuckoo Search by Levy Flights (CKLF), donde se destacan características como inteligencia de enjambre, elitismo, algoritmo evolutivo, población o partícula única, esquemas de enfriamiento, etc. Estos buscan dar respuesta a ciertos aspectos claves como la convergencia, tasa de éxito, esfuerzo computacional y parámetros de sintonización [7].

De acuerdo con el teorema “No hay almuerzo gratis” (*no free lunch theorems for optimization*) no es posible encontrar un algoritmo que sea mejor para todos los problemas o universalmente robusto o un conjunto de parámetros que pueda resolver todos los problemas [6]. De acuerdo a lo anterior se definieron ciertos parámetros de sintonización para las funciones de prueba considerando los recomendados en los antecedentes [6].

**III-B1. Patrón de Radiación de referencia:** Para la construcción del diagrama de radiación de referencia normalizado, se consideraron los ángulos de  $\theta$  y  $\phi$  de las señales entrantes de 5 usuarios, luego se generaron dos vectores  $\theta \in [0, \pi]$  y  $\phi \in [0, 2\pi]$ . Cada usuario fue representado a través de campanas de gauss (véase ecuación 4) que simulaban lóbulos principales.

$$f(x, \sigma, \mu) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

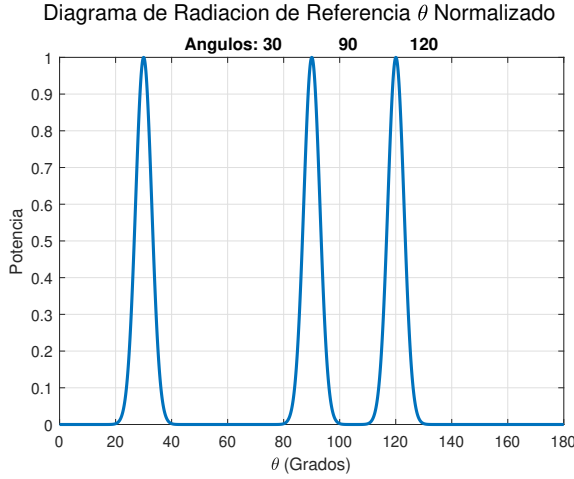


Figura 4. Diagrama de Radiación de Referencia. Fuente: Autor.

### III-C. Función Objetivo

Para realizar los experimentos se planteó dos objetivos: El primer objetivo consistió en maximizar la norma euclidiana del producto entre el diagrama de radiación de referencia (véase ec. (5)) y el diagrama de radiación normalizado.

$$fitness_1 = \max_{AF} \|AF[w_i, \theta, 0] \cdot DR_{ref}\|_2 \quad (5)$$

Donde  $w_i$  es la matriz de pesos de la partícula  $i$ ,  $\theta \in [0, \pi]$  y  $DR_{ref}$  el diagrama de radiación de referencia. El segundo objetivo consiste en minimizar la distancia entre los picos del diagrama de radiación escalado (véase ec. (7)).

$$fitness_2 = \max_{Min} \left( AF[w_i, \theta, 0] \cdot DR_{ref} \Big|_{\theta_j=1,2,3} \right) \quad (6)$$

$$- \min \left( AF[w_i, \theta, 0] \cdot DR_{ref} \Big|_{\theta_j=1,2,3} \right) \quad (7)$$

Donde  $w_i$  es la matriz de pesos de la partícula  $i$ ,  $\theta_j = 1, 2, 3, \dots$  los ángulos de los distintos usuarios. Los AM buscarán maximizar la función objetivo ( $fitness_3$ ) considerando los dos objetivos anteriores. La ubicación de los usuarios es ciega para los algoritmos.

$$fitness_3 = \frac{fitness_1}{fitness_2} \quad (8)$$

## IV. EXPERIMENTO

Se realizaron 3 esquemas de experimentos numéricos basados en los usuarios (estáticos, nómadas y mixtos). La superficie de cobertura de la antena está delimitada por un rango entre 0 a 180 grados sobre la horizontal (Ángulo Azimutal  $\theta$ ), y de 0 a 360 grados sobre la vertical (Ángulo de Elevación  $\phi$ ).

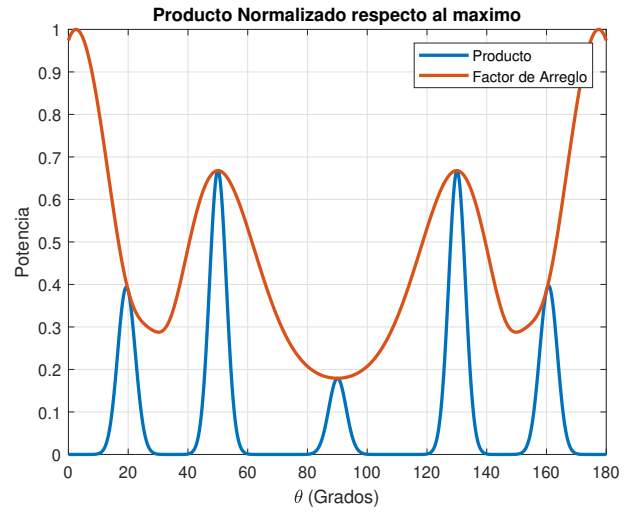


Figura 5. Producto de Diagrama de Radiación con 5 usuarios ( $fitness_1$ ).

Estos experimentos plantean escenarios más reales en términos de los usuarios, sus movimientos y energía recibida.

Para calcular la energía recibida en decibels se consideró la dirección de cada usuario respecto a una antena isotrópica de cero decibels. Se utilizó el criterio de parada “cantidad máxima de iteraciones”, en este caso cada algoritmo realizó 1000 iteraciones, se calculó el tiempo de ejecución de los AM. Se consideraron 5 algoritmos metaheurísticos, los cuales realizaron la búsqueda exploratoria sobre la superficie de la función objetivo y determinó la matriz de pesos complejos del arreglo que maximiza la potencia sobre los ángulos de los usuarios.

### IV-A. Usuarios Estáticos

Este experimento consideró 5 usuarios ubicados simétricamente en  $20^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $130^\circ$  y  $160^\circ$  sobre el ángulo de elevación  $0 \leq \theta \leq 180$  y ángulo azimutal  $0 \leq \phi \leq 360$ . Este escenario se diseñó pensando en personas sentadas en un restaurante, estudiantes en un salón, personas en un apartamento, etc. Este escenario estático ha sido estudiado ampliamente considerando simplemente los ángulos de llegada.

### IV-B. Usuarios Nómadas

Este experimento consideró 5 usuarios que se mueven a un tamaño de paso fijo. Para la construcción de la caminata aleatoria unidimensional (véase ecuación 9), se consideró un tamaño de paso  $\alpha$  en radianes. Este experimento se diseñó pensando en personas que se encuentran en constante movimiento, por ejemplo personas movilizándose en transporte público o caminando en un centro comercial, etc.

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t + \alpha [2rand(k) - 1] \quad (9)$$

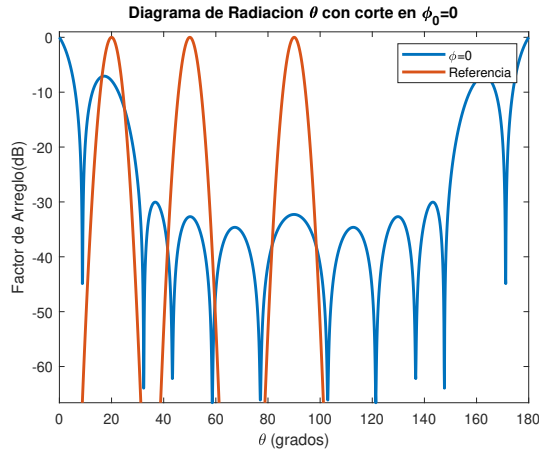


Figura 6. Diagrama de Radiación  $\theta$  de BA. Fuente: Autor

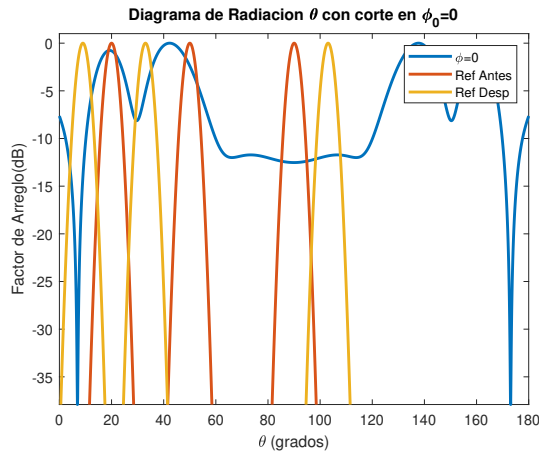


Figura 7. Diagrama de Radiación Nómada  $\theta$  de SA. Fuente: Autor

#### IV-C. Usuarios Mixtos

Este experimento consideró 5 usuarios que son nómadas y estáticos. Esta información actualiza el diagrama de radiación de referencia a las nuevas posiciones de  $\theta$ . Este experimento se diseña pensando en un escenario más real, donde ciertas personas son nómadas, es decir moviéndose constantemente o entrando y saliendo del rango de la antena. Por otra parte se encuentran los usuarios estáticos que complementan el experimento, forzando a la antena a dar la mejor respuesta a los usuarios con su diagrama de radiación dinámico.

### V. RESULTADOS

#### V-A. Funciones de Prueba

Se realizó la comparación y clasificación de los algoritmos metaheurísticos (PSO), (GA), (SA), (BA) y (CKLF) en las distintas funciones de prueba. Los algoritmos ejecutaron cada función 100 veces para tener información suficiente para el análisis estadístico. De las 100 ejecuciones por función se obtiene el tiempo promedio de la cantidad de iteraciones, desviación estándar, y tasa de éxito, es decir, cuántas soluciones llegan de forma efectiva al óptimo local considerando la tolerancia  $10^{-5}$ .

Los resultados se resumen en la tabla I. Las simulaciones se realizaron en un computador moderno usando el software MATLAB R2021B, siendo este de escritorio con procesador AMD Ryzen 5 1600 de 6 Núcleos a 3.2 GHz, Memoria RAM 16 GB. Sistema Operativo Windows 10 Professional a 64 bits. En el caso de algoritmos que tienen poblaciones (PSO, GA, BA, etc.) se definen poblaciones de 40 agentes ( $n = 40$ ).

Fun	PSO	GA	SA
(1)	722 ± 64(100%)	38 ± 2(100%)	2017 ± 701(23%)
(2)	377 ± 159(100%)	244 ± 150(100%)	1706 ± 557(0%)
(3)	268 ± 51(100%)	24 ± 3(100%)	1605 ± 398(100%)
(4)	276 ± 231(69%)	1258 ± 607(97%)	1787 ± 582(8%)
(5)	368 ± 173(88%)	36 ± 15(100%)	1670 ± 518(97%)
(6)	303 ± 192(72%)	34 ± 11(100%)	1876 ± 556(60%)
(7)	17 ± 14(100%)	41 ± 41(100%)	32443 ± 362(100%)

Cuadro I

RENDIMIENTO: ITERACIONES, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y TASA ÉXITO

Fun	BA	CKLF
(1)	200 ± 18(100%)	319 ± 26(100%)
(2)	47 ± 12(100%)	1656 ± 900(100%)
(3)	75 ± 21(98%)	139 ± 17(100%)
(4)	66 ± 23(100%)	158 ± 40(100%)
(5)	96 ± 20(100%)	196 ± 117(99%)
(6)	87 ± 21(94%)	150 ± 29(100%)
(7)	7 ± 3(100%)	44 ± 28(100%)

Cuadro II

RENDIMIENTO: ITERACIONES, DESVIACIÓN ESTÁNDAR Y TASA ÉXITO

En esta se realizó la comparación y clasificación de los algoritmos metaheurísticos (PSO), (GA), (SA), (BA) y (CKLF) en los distintos experimentos. Los algoritmos ejecutaron cada experimento 100 veces para tener información suficiente para el análisis estadístico a través de Análisis de Componentes principales. La información obtenida es tiempo promedio de cada ejecución, media y desviación estándar de la mejor función, la potencia promedio respecto a la Isotrópica y directividad promedio.

#### V-B. Resultados experimento usuarios estáticos

El algoritmo que más suministró energía en dirección de los usuarios fue CKLF con 0.8 dB respecto a la isotrópica, seguido de PSO con 0.7 dB y BA con 0.6 dB. Estos niveles de energía aunque bajos son esperados debido a la complejidad del problema del experimento del Beamforming y la función multiobjetivo seleccionada.

#### V-C. Resultados experimento usuarios nómadas

El algoritmo que más suministró energía en dirección de los usuarios en promedio fue CKLF con 0.34 dB respecto a la isotrópica, seguido de PSO con 0.28 dB. Estos niveles de energía, aunque bajos, son esperados debido a la complejidad del problema del experimento del Beamforming y la función multiobjetivo seleccionada y su componente heurístico. Cabe resaltar que debido a los movimientos de los usuarios es muy difícil para los algoritmos suministrar el mismo nivel de energía a todos los usuarios. Los demás AM, tienen en promedio valores negativos en todos los usuarios.

#### V-D. Resultados experimento usuarios mixtos

El algoritmo que más suministró energía en dirección de los usuarios en promedio fue PSO asegurando el mismo nivel de energía al primero y quinto usuario. Estos niveles de energía, aunque bajos, son esperados debido a la complejidad del problema del experimento del Beamforming y la función multiobjetivo seleccionada y su componente heurístico.

### VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de lo anterior, en este artículo se puede concluir que los experimentos planteados dentro del problema de optimización del Beamforming de una arreglo plano de antenas MIMO Masivo son adecuados para determinar cual es del desempeño de los algoritmos Metaheurísticos.

Bajo ciertas condiciones iniciales de la matriz de pesos es posible obtener diagramas de radiación resultantes que están bien definidos sobre la dirección de los usuarios y sin presencia de lóbulos laterales. Lo anterior es una de las cualidades más importantes que se puede conseguir a través de estos experimentos porque se estarían realizando profundización de nulos (*Null steering*) y reducción de los picos de los lóbulos laterales (*The peak sidelobe level*) que con ciertos ajustes en la función objetivo y en los AM se pueden alcanzar estas características analizadas en el Beamforming adaptativo.

Los resultados obtenidos en las funciones de prueba son los esperados reafirmando ciertos aspectos considerados en la teoría por ejemplo BA y CKLF tienen aspectos heredados de PSO que son evidentes en su implementación y en el análisis estadístico a través de PCA, como el desempeño del algoritmo CKLF, que gracias a sus vuelos de Levy permite tener una capacidad exploratoria efectiva con capacidad de escapar de óptimos locales y tasas de éxito casi perfectas.

En general, se puede concluir que CKLF y BA son los mejores algoritmos en las 7 funciones de prueba. El primero tiene mayor cantidad de iteraciones comparado con BA, pero su tasa de éxito es la más alta de todas. Además, los algoritmos lado BA tiene menos iteraciones, esto significa una tasa de éxito muy buena y se encuentra en la parte negativa del primer componente principal. Además, cabe resaltar que un proceso más riguroso en la selección de parámetros de forma individual (considerar cada función de prueba de forma independiente) puede tener un mejor desempeño en la tasa de éxito.

La función multiobjetivo planteada hace que los algoritmos apunten hacia la dirección de los usuarios, presentando estancamientos en ciertas soluciones, pero estos estancamientos son esperados por la dificultad del problema, la condición inicial de las partículas, la sintonización de parámetros y por la convergencia de los algoritmos.

También, es importante resaltar que la función objetivo planteada en este trabajo grado no permite que los algoritmos encuentren la matriz de pesos que hagan refinamiento de los lóbulos que plantea el diagrama de radiación de referencia (estancamientos). Esto se debe especialmente a dos aspectos, el primero es que la función objetivo considera un corte del diagrama de radiación en  $\phi = 0$  de la matriz de pesos, lo cual hace que su superficie de búsqueda sea reducida a un esquema 2-dimensional omitiendo información valiosa donde las partículas de los AM están apuntando.

Por otra parte la función objetivo considera el problema de optimización de los pesos en términos de maximizar la energía considerando la norma euclidiana y minimizar la diferencia entre los picos del diagrama de radiación escalado. Esta multiplicación omite información valiosa que no puede ser aprovechada por los algoritmos para hacer un refinamiento de sus soluciones en términos de los lóbulos que apuntan hacia los usuarios.

Una forma posible de obtener diagramas de radiación aceptables es realizar procesos de sintonización que sean adecuados para el problema del Beamforming, se encontró que los valores de sintonización establecidos en las funciones de prueba no son adecuados, esto debido a la convergencia de los AM a un óptimo local.

Esta multiplicación omite información valiosa que no es aprovechada por los algoritmos para hacer refinamiento de los lóbulos. Casos como los del algoritmo SA que generan un gran lóbulo principal donde caben la mayor cantidad de usuarios indicando la mayor energía y la menor distancia entre picos; este escenario aunque adecuado en términos de los objetivos es pobre por toda la energía radiada. En la sección llamada trabajos futuros, se hacen ciertas recomendaciones de como mejorar, la función objetivo, el experimento y los AM.

Los mejores algoritmos en el experimento de usuarios estáticos, dado que, CKLF, tiene mayor tiempo de ejecución comparado con PSO, pero la potencia suministrada por CKLF a los usuarios es mayor; el valor promedio de la función  $fitness_3$  es también mayor con menores desviaciones estándar.

Los mejores algoritmos en el experimento de usuarios nómadas. El primero tiene mayor tiempo de ejecución comparado con PSO pero la potencia suministrada a los usuarios es mayor, el valor promedio de la función  $fitness_3$ . Para el experimento de usuarios mixtos y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que PSO es el mejor algoritmo.

Por todo lo anterior, los resultados obtenidos en los experimentos son los esperados y permiten dar respuesta al problema de Optimización del Beamforming para poder determinar su desempeño en términos de su costo computacional y la energía recibida a los usuarios.

### REFERENCIAS

- [1] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 4 edition, 2016.
- [2] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. *BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC Cifras Primer Trimestre de 2021*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Jul, 2021.
- [3] Ericsson. *Ericsson Mobility Report*. Fredrik Jejdling, Nov 2021.
- [4] Frank B Gross. *Smart Antennas with MATLAB*. McGraw-Hill Professional, 2 edition, 2015.
- [5] N. Ojaroudiparchin, Ming Shen, and G. F. Pedersen. 8x8 planar phased array antenna with high efficiency and insensitivity properties for 5g mobile base stations. In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–5, April 2016.
- [6] Xin-She Yang. *Engineering Optimization: An Introduction with Meta-heuristic Applications*. Wiley, 1 edition, 2011.
- [7] Xin-She Yang. *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, 2014.