

**OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN DE MODOS HÍBRIDOS PARA  
GUÍAS DE ONDA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR  
PARCIALMENTE LLENA CON UN DIELECTRICO, MEDIANTE OPTIMIZACIÓN  
POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO UPSO**

**EDWIN FERNANDO FARFÁN BAREÑO**

**JIMY LEANDRO FONTECHA ANGULO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2013**

**OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN DE MODOS HÍBRIDOS PARA  
GUÍAS DE ONDA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR  
PARCIALMENTE LLENA CON UN DIELECTRICO, MEDIANTE OPTIMIZACIÓN  
POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO UPSO**

**EDWIN FERNANDO FARFÁN BAREÑO**

**JIMY LEANDRO FONTECHA ANGULO**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR**

**PhD. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**CODIRECTOR**

**PhD(c) IVÁN MAURICIO AMAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme la sabiduría y la constancia necesaria para culminar esta carrera.

A mis padres Luis e Isabel y a mis hermanos Cristian y Adriana por su amor, confianza y sacrificio.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la posibilidad de formarnos como personas íntegras.

A las personas que participaron e hicieron posible este proyecto especialmente a nuestro director PhD. Carlos Rodrigo Correa Cely y co-director PhD(c) Iván Mauricio Amaya.

A novia, mis amigos y familiares por compartir mis alegrías y brindarme apoyo en diferentes etapas de mi vida.

EDWIN FERNANDO FARFÁN BAREÑO

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo cuanto me ha dado, a mi madre Luz Marina y a mi padre Camilo gracias por bendecir mi vida y por acompañar y apoyar este sueño de hacerme profesional, a mis hermanos Edwin y Lida por escucharme y por animarme todos los días, a mi hermosa compañera Mafe, quien camino junto a mi cada día de la mano mientras materializaba lo que creía imposible, a esta entrañable Universidad que me acogió y me brindo la posibilidad de lograr un título, a todos y cada uno de los surcaron esta promesa que emprendí hace años, muchas gracias.

JIMY LEANDRO FONTECHA ANGULO

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	21
2.1 GUÍA DE ONDA.....	21
2.1.1 GUÍAS DE ONDA UNIFORMES .....	23
2.1.2 GUÍA DE ONDA RECTANGULAR .....	24
2.1.3 GUÍA DE ONDA RECTANGULAR PARCIALMENTE LLENA .....	26
2.2 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO (UPSO).....	29
2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORÍTMOS.....	32
2.3.1 ALGORÍTMO NEWTON-RAPHSON-BISECCIÓN .....	32
2.3.2 ALGORÍTMO UPSO .....	36
2.3.2.1 MODIFICACIONES .....	40
3. EXPERIMENTACIÓN .....	41
3.1 METODOLOGÍA .....	41
3.1.1 BÚSQUEDA DE LA FRECUENCIA DE CORTE:.....	42
3.1.2 BARRIDO DE FRECUENCIA:.....	44
3.2 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS EH Y HE.....	47
3.2.1 OBTENCIÓN DE FRECUENCIAS DE CORTE.....	47
3.2.2 BARRIDO DE FRECUENCIA .....	51

3.3	RESULTADOS DE UPSO FRENTE A NEWTON-RAPSHON-BISECCIÓN .	63
3.4	VARIACIÓN DE PARÁMETROS " $\epsilon_r$ " , " $h$ " .....	65
4.	CONCLUSIONES .....	71
5.	RECOMENDACIONES .....	73
6.	REFERENCIAS.....	74
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	76

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos de grado 2011-2012.....	16
Tabla 2. Nomenclatura y unidades de símbolos utilizados. ....	21
Tabla 3. Solución de las ecuaciones de Helmholtz para región 1 y región 2. ....	27
Tabla 4. Ecuaciones trascendentes .....	28
Tabla 5. Parámetros empleados en la guía de onda. ....	42
Tabla 6. Cálculo de frecuencias críticas. ....	49
Tabla 7. Cálculo de frecuencias críticas con variación de parámetros. ....	50
Tabla 8. UPSO, curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ . ....	52
Tabla 9. <i>UPSO</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ .....	53
Tabla 10. <i>UPSO</i> , modificación 1, curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ . .....	54
Tabla 11. <i>UPSO</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ .....	55
Tabla 12. <i>UPSO</i> , curva de dispersión modo $EH_{11} Tol = 0,5e - 14$ . ....	56
Tabla 13. <i>UPSO modificación 1</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ . .....	56
Tabla 14. <i>UPSO modificación 2</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ . .....	57
Tabla 15. <i>UPSO modificación 1</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ . .....	58
Tabla 16. <i>UPSO modificación 2</i> , curva de dispersión modo $EH_{11}$ $Tol = 0,5e - 14$ 59	59
Tabla 17. Tiempo de ejecución por <i>Newton – Rapshon – bisección</i> , para realizar barrido de frecuencia y trazar los modos $EH_{mn}$ y $HE_{mn}$ de la figura 3. $Tol = 0,5e -$ $14$ y $Tol = 0,5e5$ , respectivamente. ....	64
Tabla 18. <i>UPSO modificación 2</i> , tiempo de ejecución en el trazo de modos $EH_{mn}$ y $HE_{mn}$ , $Tol = 0,5e - 14$ y $Tol = 0,5e5$ , respectivamente. ....	65
Tabla 19. Frecuencias de corte.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Guía de onda con material homogéneo.....	25
Figura 2. Guía de onda parcialmente llena con dos materiales homogéneos. ....	26
Figura 3. Curvas de dispersión modos híbridos para guía de onda sección transversal rectangular parcialmente llena a un 50% obtenidas con <i>Newton – Raphson – bisección</i> .....	29
Figura 4. Diagrama de flujo de algoritmo <i>Newton – Raphson – Bisección</i> .....	35
Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo <i>UPSO</i> . ....	39
Figura 6. Función objetivo: (a) ecuación 35, modos <i>EH1n</i> . (b) ecuación 36, modos <i>HE1n</i> .....	44
Figura 7. Cambios en la función objetivo 2A durante el barrido de frecuencia, modo <i>EH11</i> : (a) frecuencia 6,9e9 Hz. (b) frecuencia 9,9e9 Hz. (c) frecuencia 10,8e9 Hz. (d) frecuencia 11,9e9 Hz.....	46
Figura 8. Cambios en la función objetivo 2B durante el barrido de frecuencia, modo <i>HE11</i> : (a) frecuencia 5,7e9 Hz. (b) frecuencia 6,5e9 Hz. (c) frecuencia 9,5e9 Hz. (d) frecuencia 12e9 Hz. ....	47
Figura 9. Matriz de Frecuencias Críticas .....	51
Figura 10. Curva de dispersión modo <i>EH11</i> , correspondiente a prueba de tabla 8.53	
Figura 11. Curvas de dispersión modo <i>EH11</i> , correspondiente a pruebas de tabla 14.....	58
Figura 12. Curvas de dispersión modo <i>EHmn</i> , correspondiente a mejor prueba...60	
Figura 13. Curvas de dispersión modo <i>HE11</i> . Con salto a modo <i>HE12</i> .....	60
Figura 14. Curvas de dispersión modos <i>HEmn</i> , correspondiente a la mejor prueba. ....	61
Figura 15. Curvas de los modos híbridos en una guía de onda rectangular medio llena, con geometría y características electromagnéticas conocidas. $ab = 2$ ; $hb = 0,5$ ; $y \epsilon r = 4$ ; $\mu r = 1$ . Mejor prueba. ....	62

Figura 16. (a) Frecuencias de corte modos $HE1n$ guía rectangular parcialmente llena 10%. (b) Frecuencias de corte modos $HE1n$ guía rectangular parcialmente llena 90%.	66
Figura 17. (a) Frecuencias de corte modos $EH1n$ guía rectangular parcialmente llena 10%. (b) Frecuencias de corte modos $EH1n$ guía rectangular parcialmente llena 90%.	66
Figura 18. Modo propagación $EH11, HE11, HE12, hb = 0,20$ . (a) Normalizado. (b) $kz$ vs Frecuencia.	67
Figura 19. Modo propagación $EH11, HE11, HE12, hb = 0,5$ . (a) Normalizado. (b) $kz$ vs Frecuencia.	67
Figura 20. Modo propagación $EH11, HE11, HE12, hb = 0,75$ . (a) Normalizado. (b) $kz$ vs Frecuencia.	68
Figura 21. Modo propagación $EH11, HE11, HE12 ab = 2; hb = 0,5; \epsilon r = 2,56, \dots$	69
Figura 22. Modo propagación $EH11, HE11, HE12 ab = 2; hb = 0,5; \epsilon r = 10, \dots$	70

## RESUMEN

**TÍTULO:** OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN DE MODOS HÍBRIDOS PARA GUÍAS DE ONDA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR PARCIALMENTE LLENA CON UN DIELECTRICO, MEDIANTE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO UPSO.\*

**Autores:** Edwin Fernando Farfán Bareño y Jimy Leandro Fontecha Angulo.\*

**Palabras clave:** metaheurístico, guía de onda, optimización, UPSO, ecuaciones trascendentes, modos de híbridos.

**CONTENIDO:** Los modos de propagación en cavidades confinadas como las guías de onda rectangulares llenas con un dieléctrico homogéneo, se dan de forma transversal eléctrica o magnética, debido a que estos campos están desacoplados durante su propagación; dicha propagación cambia con un dieléctrico no homogéneo o cuando la guía de onda de sección transversal rectangular está parcialmente llena y es en la frontera entre el dieléctrico y el aire donde los campos eléctricos y magnéticos se acoplan, generando, los modos híbridos de propagación. Las curvas de dispersión de estos modos híbridos son trazadas a partir de ecuaciones trascendentes que necesitan de la aplicación de métodos computacionales para su solución.

La metaheurística, ofrece diferentes métodos y analogías para llevar a cabo la solución de ecuaciones no lineales de difícil solución o con tendencia a divergir, el método aquí empleado es la optimización por enjambre de partículas unificado (UPSO), que basa su comportamiento en los enjambres de abejas, cuando realizan un reconocimiento de su entorno en la recolección de alimento y se fundamenta, en la influencia del entorno social en el actuar de cada elemento que lo compone, así como la influencia de la conducta individual en el conjunto de partículas.

En este trabajo se muestran diferentes pruebas variando los parámetros propios del método, con el fin de encontrar el mejor desempeño de este para la resolución del problema mencionado. Con esto se puede ver, cómo la propagación y las frecuencias de corte dentro de esta configuración, dependen de características como la geometría de la guía, las propiedades electromagnéticas del dieléctrico como también, de la porción de guía de onda ocupada por este.

---

\* Proyecto de grado

\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa. Co director: Iván Mauricio Amaya

## ABSTRACT

**TITLE:** OBTAINING DISPERSION CURVES OF HYBRID MODES FOR RECTANGULAR WAVEGUIDES OF CROSS SECTION PARTIALLY FILLED WITH A DIELECTRIC, BY MEANS OF UNIFIED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION UPSO.\*

**AUTHORS:** Edwin Fernando Farfán Bareño y Jimy Leandro Fontecha Angulo.\*

**KEY WORDS:** metaheuristic, waveguides, optimization, UPSO, transcendent equations, hybrid modes.

**ABSTRACT:** The modes of propagation in confined cavities as the rectangular waveguides filled with a homogeneous dielectric are given in an electric and magnetic cross way due to those fields are decoupled during its propagation; this propagation changes with a dielectric inhomogeneous or when the waveguides of rectangular cross section is partially filled and it is in the border between the dielectric and air where the electric and magnetic are coupled, generating the hybrid modes of propagation. The dispersion curves of these hybrid modes are drawn from transcendent equations that need application of computational methods for its solution.

The metaheuristic gives different methods and analogies to carry on the solution of equations non lineal of difficult solution or with the tendency to diverge, the method that is used here is the unified particle swarm optimization (UPSO), that bases its behavior on the bees swarms when they realize a recognition of their context on food gathering and it takes as a base in the social context influence in the act of each element that composes it, as the individual conduct influence in the particle set.

In this work it is shown different proves varying the proper parameters of the method in order to find out the best performance of it for solving the mentioned problem. Thus, it can be seen how the propagation and the cutoff frequencies inside of this configuration depend on the characteristics like the geometry guide, the electromagnetic properties of the dielectric as the waveguide portion occupied by this.

---

\* Undergraduate thesis.

\* Physical-Mechanics engineering faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering School.  
Advisor: Carlos Rodrigo Correa. Co-advisor: Iván Mauricio Amaya

## GRUPO CEMOS

Línea de trabajo: Modelado y Optimización

La línea de modelado y optimización del grupo CEMOS se encuentra orientada hacia la evaluación de los más importantes algoritmos de optimización y fundamentalmente los basados en la inteligencia artificial y la heurística. Los siguientes son los trabajos de grado que a la fecha tienen como objetivo fortalecer esta línea, dándosele un énfasis a su aplicación en la ingeniería electrónica y eléctrica.

Tabla 1. Trabajos de grado 2011-2012

SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO COMPUESTO DE ELEMENTOS NO LINEALES MEDIANTE EL OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL	ROA, O; RAMIREZ, F
EVALUACIÓN DEL MÉTODO OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL FRENTE AL OPTIMIZADOR POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO EN LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES NO LINEALES	BARRERO, K; NAVARRO, O
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO NO LINEAL MEDIANTE LA SOLUCIÓN DE SU MODELO CON HARMONY SEARCH	TRASLADINO, O; GONZALES, S
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL (CFO) AL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO	BAYONA, C; GONZALEZ, J
ALGORITMO HÍBRIDO DEL SIMPLEX CON EL OPTIMIZADOR DE FUERZA CENTRAL (CFO)	GARCIA, J
PROPUESTA DE ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR FUERZA CENTRAL (CFO)	BUITRAGO, J
SOLUCIÓN DE UN SISTEMA DE ECUACIONES NO LINEAL UTILIZANDO LA ESTRATEGIA BASADA EN EL ALGORITMO HARMONY SEARCH	GALEANO, Y
IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA GRAVITACIONAL (GSA) PARA EL DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO ÓPTIMO	MIRANDA, A; RUIZ, J
SOLUCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE UN CIRCUITO NO LINEAL EN DC, A TRAVÉS DE UNA ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN	CRUZ, J
USO DEL HÍBRIDO UPSO CON EL SIMPLEX PARA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES CON RESTRICCIONES EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	CAÑON, E

INTELIGENCIA COMPUTACIONAL INSPIRADA EN LA CUÁNTICA, APLICADA AL DISEÑO DE COMPENSADORES	HERNÁNDEZ, M; CORREDOR, D
OPTIMIZACIÓN PARETO MEDIANTE EL MÉTODO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	QUIROZ, M;
IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMÁN PERMANENTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE LA ESPIRAL	RUTTO, A
EL MÉTODO DE COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS Y EL CRITERIO DE MÍNIMA ENTROPÍA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN DISIPADOR DE CALOR	ÁVILA, J
IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE GOTA DE AGUA INTELIGENTE	CARVAJAL, L; DÁVILA, D
POTENCIAL APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE GOTAS DE AGUA INTELIGENTES (GAI-IWD) EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA	ARIAS, J
CONTRASTACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO FRENTE AL MÉTODO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS, EN LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	PETRO, E; FUENTES, R.
EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO NEWTON RAPHSON Y CENTRAL FORCE OPTIMIZATION PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGAS DE UN SISTEMA DE POTENCIA	VALDERRAMA, M
EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS NEWTON RAPHSON Y ARTIFICIAL BEE COLONY (ABC) PARA EL ANÁLISIS DEL FLUJO DE CARGA DE UN SISTEMA DE POTENCIA	CELIS, J; RINCÓN, F
EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS UPSO Y NEWTON-RAPHSON PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN UN SISTEMA DE POTENCIA	PINZÓN, C; ARDILA, E
DISEÑO DE UN ABSORBEDOR ELECTROMAGNÉTICO MULTICAPA MEDIANTE EL MÉTODO DE LA ESPIRAL	ORTIZ, R; GARCÍA, E
SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES QUE MODELAN UN CIRCUITO NO LINEAL DE CORRIENTE DIRECTA MEDIANTE EL MÉTODO DE ESPIRAL	PORTILLA, J
ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS PARA SOLUCIONAR ECUACIONES DIFERENCIALES LINEALES COMUNMENTE ENCONTRADAS EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA	RAMIREZ, J; OSORIO, F
OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN DE MODOS HÍBRIDOS PARA GUÍAS DE ONDA DE SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR PARCIALMENTE LLENA CON UN DIELECTRICO, MEDIANTE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO UPSO.	FARFÁN, E; FONTECHA, J

Fuente: Grupo CEMOS.

## INTRODUCCIÓN

En muchos de los problemas de ingeniería es necesario estimar los valores mínimos, o raíces, de las funciones que los modelan. Las técnicas convencionales utilizadas suelen ser Newton-Raphson y el método de la secante, entre otras. Sin embargo, estas requieren del estudio previo de la función para fijar parámetros que conlleven al buen desempeño del método, ya que de no ser así, este tiende a divergir o entregar resultados no apropiados.

Las ondas electromagnéticas en estructuras confinadas, como las guías de onda, se propagan con diferentes comportamientos dependiendo del material y de las características de permitividad, permeabilidad y homogeneidad del dieléctrico que las conforma. En el caso más simple, la propagación de la onda electromagnética puede separarse en modos  $TE$  y  $TM$ , que reciben su nombre porque la componente de campo eléctrico o magnético, respectivamente, es nula en la dirección de propagación de la onda. No obstante, cuando existen dos materiales (o cuando la guía está parcialmente llena), las ecuaciones de Maxwell no se desacoplan y aparecen modos híbridos, que pueden ser de tipo  $EH$  o  $HE$ , en los que se presentan los campos tanto magnético como eléctrico en la dirección de propagación de la onda. Esta particularidad se modela por medio de ecuaciones trascendentes en las que es importante analizar las frecuencias de corte y el comportamiento de los campos a diferentes frecuencias de propagación.

En el presente trabajo de grado en la modalidad de investigación, se propone una solución alternativa a los métodos tradicionales: las técnicas heurísticas de optimización, debido a que su forma de operación puede generar ventajas en la obtención de resultados, como efectividad, rapidez y confiabilidad. Una de tales técnicas es la Optimización por Enjambre de Partículas Unificado, o  $UPSO$  (por sus

siglas en inglés), que se basa en el comportamiento de los enjambres de abejas, y otros seres de la naturaleza, cuando realizan un reconocimiento de su entorno en la recolección de alimento. El fundamento de este método es la influencia del entorno social en el actuar de cada elemento que lo compone, así como la influencia de la conducta individual en el conjunto de partículas.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.1 Planteamiento del problema<sup>1</sup>

Los métodos tradicionales para la solución de ecuaciones no lineales requieren de puntos de inicialización apropiados (es decir, deben encontrarse cerca de la solución), que en muchos casos es difícil de determinar dada la naturaleza de los modelos. Es allí donde las técnicas metaheurísticas pueden tomar un papel preponderante, y por ello es importante contextualizarlas en nuestra área de investigación. La generación de las curvas de dispersión de los modos híbridos presentes en la propagación de las ondas electromagnéticas en guías de onda parcialmente llenas, son trazadas a partir de ecuaciones trascendentes, cuya solución solo es posible con la ayuda de métodos computacionales. Por tanto, se desea explorar el desempeño de *UPSO* en este tipo de situaciones.

### 1.2 Objetivo General

Proponer una nueva forma, haciendo uso de la metaheurística, de obtener las curvas de dispersión de modos híbridos en una guía de onda con parte de su sección transversal rectangular ocupada con un dieléctrico de propiedades electromagnéticas conocidas.

### 1.3 Objetivos Específicos

1. Programar el método *UPSO* para determinar los modos híbridos presentes en una guía de onda rectangular parcialmente llena. (páginas 30 a 35, 41 a 56).
2. Contrastar los resultados obtenidos con los reportados en la literatura. (páginas 57 a 59).
3. Analizar el comportamiento de los modos híbridos y su aparición en las guías de ondas rectangulares parcialmente llenas con diferentes materiales. (páginas 59 a 64).

---

<sup>1</sup> Esto constituye un aporte consensuado entre los estudiantes Edwin Farfán y Jimy Fontecha con el profesor Rodrigo Correa y el estudiante de doctorado Iván Amaya.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tabla 2. Nomenclatura y unidades de símbolos utilizados.

Término	Nombre	Unidades SI	Abreviatura
$\vec{E}$	Intensidad de campo Eléctrico	<i>Voltio/metro</i>	<i>V/m</i>
$\vec{H}$	Intensidad del campo magnético	<i>Amperio/metro</i>	<i>A/m</i>
$\omega$	Frecuencia angular	<i>Radian/segundo</i>	<i>rad/s</i>
$\epsilon$	Permitividad Eléctrica	<i>Farad/metro</i>	<i>F/m</i>
$\mu$	Permeabilidad Magnética	<i>Henry/metro</i>	<i>H/m</i>
$k$	Número de onda	<i>radian/metro</i>	<i>rad/m</i>
$k_z$	Constante de propagación	<i>radian/metro</i>	<i>rad/m</i>
$f_c$	Frecuencia crítica	<i>Hertz</i>	<i>Hz</i>
$a$	Ancho de la guía de onda	<i>Metro</i>	<i>m</i>
$b$	Alto de la guía de onda	<i>Metro</i>	<i>m</i>
$h$	Alto del material dentro de la guía	<i>Metro</i>	<i>m</i>
$c$	Velocidad de la luz en el vacío	<i>Metro/segundo</i>	<i>m/s</i>

Fuente: Autores.

### 2.1 GUÍA DE ONDA

Tanto las guías de onda como las líneas de transmisión, son empleadas para el transporte de energía electromagnética. Sin embargo, las características fundamentales son bastante diferentes. Una guía de onda puede tener n número de conductores y dieléctricos, mientras que la línea de transmisión utiliza dos conductores y propaga la onda únicamente en una configuración de campo *TEM*, generalmente a través de un material dieléctrico que separa a los dos conductores. El campo transversal electromagnético *TEM*, hace referencia a que la dirección de desplazamiento de la onda, es perpendicular a la dirección de su propagación. Es decir que las ondas transversales electromagnéticas son aquellas que no tienen campo magnético ni campo eléctrico en la dirección de propagación de la onda [1].

La guía de onda es una estructura de sección rectangular, circular o cilíndrica, por medio de la cual la energía electromagnética se puede transmitir de un punto a otro. Se pueden clasificar tanto en guía de onda de metal como en guía de onda dieléctrica. Las primeras generalmente son en forma de tubo conductor metálico y las ondas que se propagan en su interior, a través de un dieléctrico, se pueden caracterizar por la reflexión en las paredes conductoras; la segunda, por su parte, emplea únicamente dieléctricos, tanto en las paredes que la limitan como en el medio a través del cual se propaga la onda, realizando reflexiones en las interfaces de los materiales [2].

Las guías de onda ofrecen varias ventajas sobre las líneas de transmisión. La guía de onda cuenta con una superficie grande que disminuye las pérdidas en el cobre  $I^2R$ , y tiene una señal de atenuación menor para altas frecuencias. Además, puede transmitir altos niveles de potencia, y los campos de propagación se distribuyen más uniformemente sobre una mayor área de sección-cruzada que la línea de transmisión de sección-cruzada pequeña. Por otro lado tiene ciertas desventajas, entre las cuales se encuentra su principal limitación en el tamaño físico para trabajar a bajas frecuencias, por lo que no es práctico el uso de estas guías de sección-transversal grande. Los campos eléctrico y magnético relacionados con una onda electromagnética que se propaga por un dieléctrico caracterizado por una permeabilidad y permitividad específicas, deben satisfacer las ecuaciones de Maxwell de fuente-libre dadas por [2]:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = j\omega\varepsilon E \quad (2)$$

### 2.1.1 GUÍAS DE ONDA UNIFORMES [1]

Para una onda electromagnética que se propaga en la dirección del eje  $z$ , sus campos eléctricos y magnéticos pueden ser expresados así:

$$E = E_t + \hat{z}E_z = [e_t(x, y) + \hat{z}e_z(x, y)]e^{-jk_z z} \quad (3)$$

$$H = H_t + \hat{z}H_z = [h_t(x, y) + \hat{z}h_z(x, y)]e^{-jk_z z} \quad (4)$$

donde  $k_z$  indica la constante de propagación a lo largo de la dirección del eje  $z$ . Para encontrar posibles soluciones a las ecuaciones de Maxwell, se sustituyen las ecuaciones del campo eléctrico (3) y la ecuación del campo magnético (4), en la primera y segunda ecuación de fuente-libre de Maxwell, dadas en (1) y (2). De este procedimiento se encuentran las ecuaciones para los campos transversales eléctrico y magnético dadas por:

$$E_t = \frac{1}{k_t^2} (j\omega\mu\hat{z} \times \nabla_t H_z - jk_z \nabla_t E_z) \quad (5)$$

$$H_t = \frac{1}{k_t^2} (-j\omega\varepsilon\hat{z} \times \nabla_t E_z - jk_z \nabla_t H_z) \quad (6)$$

donde  $k_t^2 = k^2 - k_z^2$  y  $k^2 = \omega^2\mu\varepsilon$ . En estas ecuaciones se evidencia que al resolver  $E_t$  y  $H_t$ , pueden obtenerse todas las otras componentes de estos campos. Por lo tanto, únicamente es necesario resolver  $E_z$  y  $H_z$  para analizar la propagación de una onda en una guía de onda. Esto se cumple también para guías de onda no homogéneas o guías de onda parcialmente llenas. Para encontrar las ecuaciones que satisfacen  $E_z$  y  $H_z$ , se sustituyen las ecuaciones (5) y (6) en la componente transversal de las ecuaciones (1) y (2) y de esta manera se llega a:

$$\nabla_t \times \left[ \frac{1}{k_t^2} (\omega\varepsilon\hat{z} \times \nabla_t E_z + k_z \nabla_t H_z) \right] = -\omega\varepsilon E_z \hat{z} \quad (7)$$

$$\nabla_t \times \left[ \frac{1}{k_t^2} (\omega \mu \hat{z} \times \nabla_t H_z - k_z \nabla_t E_z) \right] = -\omega \mu H_z \hat{z} \quad (8)$$

Tomando las ecuaciones (7) y (8) para una guía de onda homogéneamente llena, en la que  $\varepsilon$  y  $\mu$  son constantes, se obtiene una ecuación de onda conocida como la ecuación de Helmholtz, para el campo eléctrico como para el magnético:

$$\nabla_t^2 E_z + k_t^2 E_z = 0 \quad (9)$$

$$\nabla_t^2 H_z + k_t^2 H_z = 0 \quad (10)$$

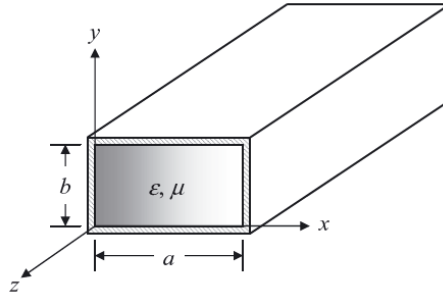
### 2.1.2 GUÍA DE ONDA RECTANGULAR

Este tipo de guía tiene una estructura de forma rectangular (como muestra la figura 1), y puede tener una pared conductora y en su interior uno o varios medio dieléctricos, o utilizar completamente dieléctricos. Esta guía de onda permite propagar por su interior únicamente los modos  $TE_{mn}$  y  $TM_{mn}$ . Su frecuencia de corte  $f_c$  es proporcional al modo de propagación, y al tamaño mínimo que debe tener la guía para transmitir una frecuencia específica [3]:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (11)$$

donde  $m, n$  son los subíndices que indican el modo de propagación y  $a, b$  representan las dimensiones internas (ancho y alto, respectivamente) en la guía de onda.

Figura 1. Guía de onda con material homogéneo.



Fuente: tomada de [1].

Para que un modo específico se propague, su frecuencia de corte debe ser inferior a la frecuencia de operación de la guía de onda. De lo contrario, será atenuado. Como ya se mencionó, la guía de onda rectangular no puede soportar un modo *TEM*, sino que su propagación se manifiesta a través de los modos *TE* y *TM*. A continuación se presentan las expresiones analíticas para una guía de onda rectangular, considerando las paredes de la guía como conductores perfectos, y una ausencia de pérdidas en el dieléctrico [4]. Utilizando la forma vectorial de las ecuaciones de Helmholtz, (9) y (10), se encuentran las expresiones generales para las componentes de los campos en tres dimensiones. Desarrollando los rotacionales del campo eléctrico y magnético a partir del método de separación de variables:

$$E_z(x, y, z) = [A \cos k_x x + B \sin k_x x][C \cos k_y y + D \sin k_y y] e^{-jk_z z} \quad (12)$$

$$H_z(x, y, z) = [A' \cos k_x x + B' \sin k_x x][C' \cos k_y y + D' \sin k_y y] e^{-jk_z z} \quad (13)$$

Las expresiones de las componentes para los modos  $TM$  son:

$$E_x = \frac{jk_z}{k_t^2} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad H_x = \frac{j\omega\varepsilon}{k_t^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (14)$$

$$E_y = -\frac{jk_z}{k_t^2} \frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad H_y = -\frac{j\omega\varepsilon}{k_t^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (15)$$

Las expresiones de las componentes para los modos  $TE$  son:

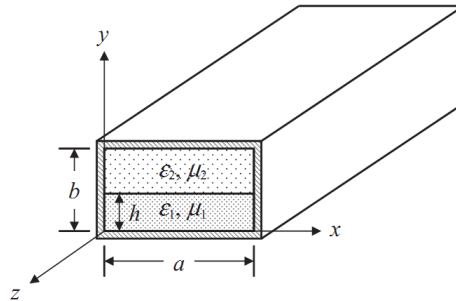
$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_t^2} \frac{\partial H_z}{\partial y}, \quad H_x = -\frac{jk_z}{k_t^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (16)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_t^2} \frac{\partial H_z}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{jk_z}{k_t^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (17)$$

### 2.1.3 GUÍA DE ONDA RECTANGULAR PARCIALMENTE LLENA [1]

Este caso especial de guía de onda está llena por dos materiales homogéneos con propiedades conocidas (permitividades  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  y permeabilidades  $\mu_1, \mu_2$ ), donde la distribución física del material se muestra en la figura 2. Partiendo del hecho que el *eje y* hace referencia a la altura de la guía, el *eje x* al ancho de la guía y el *eje z* a la profundidad de la guía, el material con permitividad  $\varepsilon_1$  y permeabilidad  $\mu_1$  ocupa la región comprendida entre  $0 < y < h$  y el material con permitividad  $\varepsilon_2$  y permeabilidad  $\mu_2$  ocupa la región comprendida entre  $h < y < b$ .

Figura 2. Guía de onda parcialmente llena con dos materiales homogéneos.



Fuente: tomada de [1].

Las expresiones que satisfacen la solución de la ecuación de Helmholtz en la pared de la guía de onda dieléctrica son:

Tabla 3. Solución de las ecuaciones de Helmholtz para región 1 y región 2.

Región de la guía de onda	Componente de desplazamiento $E_z$ .	Componente de desplazamiento $H_z$ .
$0 < y < h$	$E_{1z} = A_1 \sin(k_x x) \sin(k_{1y} y) e^{-jk_z z}$	$H_{1z} = B_1 \cos(k_x x) \cos(k_{1y} y) e^{-jk_z z}$
$h < y < b$	$E_{2z} = A_2 \sin(k_x x) \sin(k_{2y}(b - y)) e^{-jk_z z}$	$H_{2z} = B_2 \cos(k_x x) \cos(k_{2y}(b - y)) e^{-jk_z z}$

Fuente: Autores.

donde el número de onda para cada dieléctrico se expresa como:

$$k_x^2 + k_{1y}^2 + k_z^2 = k_1^2 = \omega^2 \mu_1 \epsilon_1 \quad \text{y} \quad k_x^2 + k_{2y}^2 + k_z^2 = k_2^2 = \omega^2 \mu_2 \epsilon_2 \quad (18)$$

y el valor característico  $k_x$  está dado por:  $k_x = m\pi/a$ , con  $m=0, 1, 2, 3, \dots$ . Partiendo de la distribución de los dieléctricos mostrada en la figura 2, y al imponer las condiciones de contorno, se encuentra que tanto la componente  $x$ , como la componente  $z$  de los campos eléctrico y magnético de cada uno de los dieléctricos a la altura  $h$ , deben ser iguales:

$$E_{1z}|_{y=h} = E_{2z}|_{y=h} \quad H_{1z}|_{y=h} = H_{2z}|_{y=h} \quad (19)$$

$$E_{1x}|_{y=h} = E_{2x}|_{y=h} \quad H_{1x}|_{y=h} = H_{2x}|_{y=h} \quad (20)$$

Teniendo las componentes de los campos requeridos para las ecuaciones 19 y 20 y luego de realizar reducciones algebraicas se tiene el siguiente sistema de  $2 \times 2$ : [1]

$$A_1 k_x k_z \left( \frac{1}{k_{1t}^2} - \frac{1}{k_{2t}^2} \right) \tan(k_{1y}h) - B_1 \left[ \frac{\omega \mu_1 k_{1y}}{k_{1t}^2} \tan(k_{1y}h) + \frac{\omega \mu_2 k_{2y}}{k_{2t}^2} \tan(k_{2y}(b-h)) \right] = 0 \quad (21)$$

$$A_1 \left[ \frac{\omega \varepsilon_1 k_{1y}}{k_{1t}^2} \cot(k_{1y}h) + \frac{\omega \varepsilon_2 k_{2y}}{k_{2t}^2} \cot(k_{2y}(b-h)) \right] + B_1 k_x k_z \left( \frac{1}{k_{1t}^2} - \frac{1}{k_{2t}^2} \right) \cot(k_{1y}h) = 0 \quad (22)$$

Para asegurar que el anterior sistema homogéneo tenga como solución una respuesta no trivial, se debe garantizar que su determinante sea igual a cero. Esta expresión se ajustará para obtener dos ecuaciones trascendentes, y con la ayuda del número de onda “ $k$ ” de cada material, se obtiene la frecuencia de corte de cada modo. Además, el comportamiento del modo a medida que se varía la frecuencia.

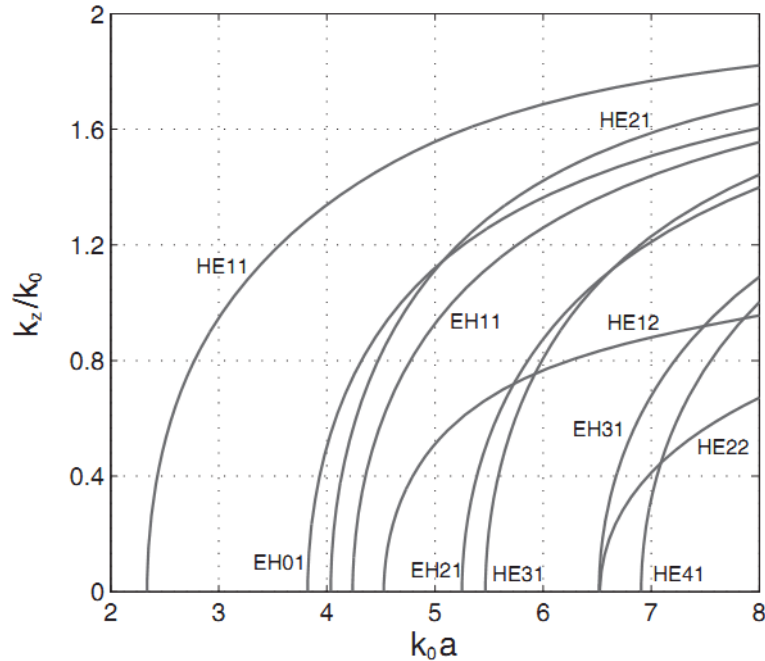
Tabla 4. Ecuaciones trascendentes

Ecuaciones Trascendentes	
Para Modo EH	Para Modo HE
$\frac{\mu_1}{k_{1y}} \tan(k_{1y}h) = -\frac{\mu_2}{k_{2y}} \tan(k_{2y}(b-h))$	$\frac{k_{1y}}{\varepsilon_1} \tan(k_{1y}h) = -\frac{k_{2y}}{\varepsilon_2} \tan(k_{2y}(b-h))$

Fuente: tomada de [1].

Teniendo claro el modo híbrido a trabajar,  $EH_{mn}$  o  $HE_{mn}$ , y sabiendo que la posición de la raíz de la ecuación trascendente determina el índice  $n$ , se logran encontrar las diferentes curvas de dispersión de los modos híbridos para una guía de onda rectangular parcialmente llena. A continuación se muestra la figura 3 de las curvas de dispersión de los modos híbridos para una guía de onda rectangular parcialmente llena con parámetros  $\varepsilon_r = 4$ ;  $\mu_r = 1$ ;  $a/b = 2$ ;  $h/b = 0,5$  (indica que está lleno un 50% de la sección transversal de la guía de onda).

Figura 3. Curvas de dispersión modos híbridos para guía de onda sección transversal rectangular parcialmente llena a un 50% obtenidas con *Newton – Rapshon – bisección*.



Fuente: tomada de [1].

Esta figura se tomó como referencia para el presente trabajo y frente a la cual se contrastarán los resultados obtenidos, como se indica posteriormente.

## 2.2 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS UNIFICADO (UPSO)

[5] [6]

En esta sección se describe muy brevemente en que consiste el algoritmo seleccionado. La siguiente sección describe la forma como se implementó. Este algoritmo es una modificación del *PSO* (algoritmo de optimización de enjambre de partículas). El *PSO* se fundamenta en la observación de la naturaleza, más exactamente en los movimientos realizados por enjambres de pájaros, insectos y peces. Esta técnica de optimización metaheurística tiene en cuenta la manera en

que se recoge y se comparte la información de una forma particular y global durante la exploración, y que se pueda tomar la mejor decisión en función de la solución del problema planteado.

Lo que se buscó en su versión original, fue generar un enjambre de partículas de manera aleatoria dentro de un espacio de búsqueda, para que estas partículas recojan información en su posición y respecto a esta y la información de las partículas vecinas, tomen decisiones para cambiar de posición, con la posibilidad de variar la velocidad de este desplazamiento conforme acumule información y de esta forma llegar al punto buscado. Sea  $S$  un espacio de búsqueda de dimensión  $n$ ,  $f: S \rightarrow R$  es la función objetivo y  $n$  es un número de partículas que componen el enjambre,

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (23)$$

La partícula es un punto en el espacio que está representado de la siguiente manera;

Posición actual:  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\} \in S \quad (24)$

Así como la mejor posición anterior según la experiencia de cada partícula:

$$P_i = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}\} \in S \quad (25)$$

La velocidad está representada como:

$$v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\} \quad (26)$$

Existen dos valores,  $P_{best_i}$  y  $g_{best_i}$  que se actualizan a medida que el proceso iterativo evoluciona. Estos valores se utilizan en el cálculo de la nueva posición y velocidad de cada partícula, puesto que contiene información sobre su mejor posición y de la vecindad. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del enjambre se definen de la siguiente manera (tenga en cuenta que en las expresiones está contenido un componente cognitivo y un componente social):

$$v_i^{(k+1)} = \chi \left[ v_i^{(k)} + \varphi_1 (P_{best_i}^{(k)} - x_i^{(k)}) + \varphi_2 (g_{best_i}^{(k)} - x_i^{(k)}) \right] \quad (27)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k+1)}, \quad (28)$$

donde  $i = 1, \dots, N$ ;  $k$  es el contador de las iteraciones;  $\chi$  es un parámetro llamado coeficiente de constricción que controla las magnitudes de los vectores;  $\varphi_1 = c_1 r_1$  y  $\varphi_2 = c_2 r_2$ , donde  $c_1$  y  $c_2$  son parámetros de aceleración, llamados parámetros cognitivo y social respectivamente, y  $r_1$  y  $r_2$  son vectores aleatorios que varían entre  $[0, 1]$  [5]. Buscando mejorar la eficiencia del *PSO*, surgió el *UPSO*, en el cual se implementa un parámetro global y uno local, así como un parámetro de unificación. Los dos primeros están dados por:

$$G_i^{(k+1)} = \chi \left[ v_i^{(k)} + \varphi_1 (P_i^{(k)} - x_i^{(k)}) + \varphi_2 (P_g^{(k)} - x_i^{(k)}) \right] \quad (29)$$

$$l_i^{(k+1)} = \chi \left[ v_i^{(k)} + \varphi_1' (P_i^{(k)} - x_i^{(k)}) + \varphi_2' (P_{gi}^{(k)} - x_i^{(k)}) \right] \quad (30)$$

donde  $P_g$  indica la mejor partícula encontrada en el enjambre y  $P_{gi}$  indica la mejor partícula encontrada en la vecindad. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede plantear una velocidad unificada, como:

$$U_i^{(k+1)} = u G_i^{(k+1)} + (1 - u) l_i^{(k+1)} \quad (31)$$

donde  $u$  es llamado factor de unificación dando prelación a la exploración o a la explotación del enjambre. Además, la búsqueda de la posición se realiza con la siguiente expresión:

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + U_i^{(k+1)} \quad (32)$$

De esta manera se obtiene variables compuestas que aprovechan la exploración y explotación de las variables local y global.

## 2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORÍTMOS

A continuación se describe como se implementaron los algoritmos en este trabajo.

### 2.3.1 ALGORÍTMO NEWTON-RAPHSON-BISECCIÓN

El diagrama de flujo mostrado en la figura 4 se presenta el algoritmo híbrido de *Newton – Rapson– bisección* implementado en la plataforma MATLAB®, empleado en la investigación desarrollada por *Jin, Jian – Ming* [1] y basado en el algoritmo desarrollado en *William H. Press* [7].

Para comenzar se definieron los parámetros con los que trabaja este método que son el número máximo de iteraciones “*max*” que pueden ser ejecutadas en búsqueda de una raíz, “*xacc*” que indica la tolerancia o que tan exacto queremos la raíz. Posteriormente el programa pide el ingreso de la función objetivo “*ecuacion*” y los límites inferior “*x1*” y superior “*x2*” del espacio de búsqueda. La función ingresada es derivada. Luego se evalúa en el límite inferior “*x1*” y este dato se guarda en “*fl*”, así mismo se evalúa en el límite superior “*x2*” y el valor resultante se guarda en “*fh*”.

Si el valor de “ $fl$ ” y el valor de “ $fh$ ” dan ambos mayores que cero, o ambos menores que cero, el algoritmo envía un mensaje de error “*La raíz debería estar entre los límites*” y se termina su ejecución. Esto ocurre porque los límites inferior y superior seleccionados se encuentran en el mismo semiplano, lo que indica que en esa región no hay ningún cruce por cero, por lo que es innecesario continuar iterando ya que no se llegaría a ninguna raíz. En caso que ninguna de estas condiciones se cumpla, se pregunta si la evaluación del límite inferior en la ecuación “ $fl$ ” es igual a cero, si es así, se habrá encontrado que la raíz es el valor límite inferior “ $x1$ ” y se termina la ejecución del programa, de no ser así se pregunta si la evaluación del límite superior en la ecuación “ $fh$ ” es igual a cero. Si la respuesta es positiva, se habrá encontrado que la raíz es el valor límite superior “ $x2$ ” y se termina la ejecución del programa.

Si “ $fl$ ” y “ $fh$ ” no son iguales a cero, entonces se pregunta si “ $fl$ ” es menor a cero. De ser así, se elige a “ $x1$ ” como el valor que evaluado en la función genera un resultado negativo o más bajo “ $xl$ ”, y a “ $x2$ ” como el valor que evaluado en la función genera un resultado positivo o más alto “ $xh$ ”. Si la respuesta es que “ $fl$ ” no es menor a cero, quiere decir que los límites alto y bajo están en los semiplanos contrarios por lo que se elige a “ $x1$ ” como el valor más alto “ $xh$ ” y a “ $x2$ ” como el valor bajo “ $xl$ ” para reordenarlos. Luego se saca el promedio “ $rts$ ” entre la suma del límite inferior “ $x1$ ” y el límite superior “ $x2$ ” y el valor absoluto “ $dxhold$ ” a la diferencia entre estos dos valores. Se evalúa la cantidad del valor promedio “ $rts$ ” en la ecuación y en la derivada de la ecuación, y se guardan como “ $f$ ” y “ $df$ ” respectivamente. Luego se realiza un proceso iterativo que puede llegar hasta el máximo número de iteraciones “ $max$ ” en el que se mira si se cumple alguna de las siguientes dos condiciones:

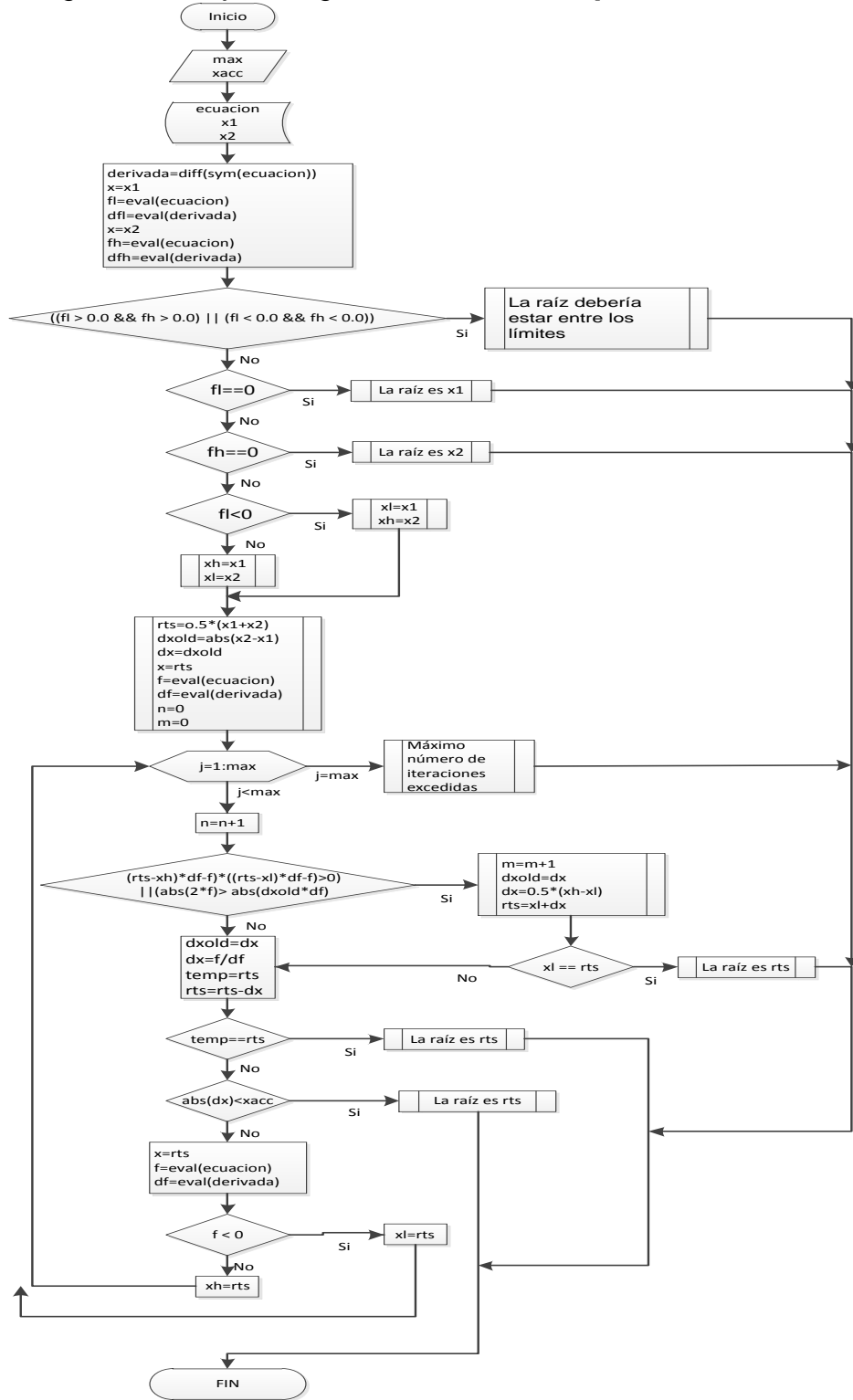
$$(rts - xh) * df - f) * ((rts - xl) * df - f) > 0,0) \text{ ó } (abs(2,0 * f) > abs(dxold * df) \quad (33)$$

Si se cumple cualquiera de las dos, mantenemos el anterior valor absoluto “ $dxhold$ ”, y calculamos un nuevo valor “ $dx$ ” que esta dado como la mitad del delta de espacio entre “ $xh$ ” y “ $xl$ ” y se calcula un nuevo punto de prueba que es la suma entre “ $xl$ ” y “ $dx$ ”. Luego se revisa si el nuevo punto de prueba “ $rts$ ” es igual a “ $xl$ ”. Si es así, habremos encontrado la raíz de la ecuación dentro del espacio de búsqueda dado y será el valor de “ $rts$ ”.

Si el nuevo punto de prueba “ $rts$ ” es diferente de “ $xl$ ” o si no se cumple con ninguna de las dos condiciones anteriormente mencionadas, se procede a mantener el anterior valor de “ $dx$ ” guardándolo en “ $dxhold$ ”, y se calcula un nuevo valor “ $dx$ ” que es el valor del punto evaluado en la función dividido entre el valor del punto evaluado en la derivada de la función. En esta parte comienza a desarrollarse el método de *Newton – Rapshon* que es el cálculo de un nuevo punto de prueba “ $rts$ ” cumpliendo con la fórmula:

$$x(i + 1) = xi - \frac{f(xi)}{f'(xi)} \quad (34)$$

Figura 4. Diagrama de flujo de algoritmo *Newton – Raphson – Bisección*.



Fuente: Autores.

Este valor se compara con el punto de prueba anterior guardado en la variable “*temp*”, si los valores son iguales, se habrá encontrado la raíz y será el último valor “*rts*” calculado. En caso que la comparación sea negativa, se pregunta si el valor absoluto de “*dx*” es menor al valor de tolerancia “*xacc*”. Si esto es verdad la raíz será el valor de “*rts*”, de no ser así, se evalúa el valor de “*rts*” tanto en la función “*f*” como en la derivada de la función “*df*” y se revisa si el valor que aparece en “*f*” es menor a “*cero*”. Si la respuesta es que si, entonces el valor de “*rts*” será tomado como valor más bajo “*xl*”. Si la respuesta es que no, el valor de “*rts*” será tomado como más alto “*xh*”. Luego de esto se inicia un nuevo ciclo de iteración en búsqueda de la raíz.

### 2.3.2 ALGORÍTMO UPSO

El diagrama de flujo mostrado en la figura 5 presenta el algoritmo implementado en la plataforma MATLAB®, basado en el esquema propuesto en el documento realizado por K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis. [5]

Inicialmente se definieron los parámetros propios del método UPSO, necesarios para la convergencia de la búsqueda. Se usó el valor de 2,05 tanto para el parámetro cognitivo “*pc*” como para el parámetro social “*ps*”, para cumplir con la relación presentada por K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis en su trabajo sobre la selección y adaptación de parámetro de UPSO [8], que a su vez se basaron en el análisis de estabilidad presentado por Clerc and Kennedy [9], donde la suma de “*ps*” y “*pc*” debe ser mayor a 4. El factor de constricción “*shi*” también está sujeto a esta relación, por lo que su valor inicial fue 0,729. El factor de unificación “*u*” se eligió como 0,5.

El algoritmo cuenta con unos parámetros propios del problema al cuál va a ser aplicado. Estos parámetros son el número de partículas " $Np$ ", que indica el número de vecindarios o filas de la matriz que contiene los puntos de búsqueda. El número de dimensiones " $Nd$ " indica el complemento o columnas de la matriz de puntos de búsqueda y son los vecinos presentes en cada vecindario. El número máximo de iteraciones " $N$ ", indica el mayor número de veces que se recorrerá el algoritmo en búsqueda de una raíz. Los parámetros " $limitInf$ " y " $limitSup$ " indican el punto menor y mayor del espacio de búsqueda de la raíz. La tolerancia " $Tol$ ", indica que tan exacto queremos nuestro punto de llegada o raíz. El problema que se va a abordar esta representado por la ecuación " $f$ " y que debe ser ingresada como una función tipo *handle* [10]. Luego de incluir los parámetros del método y los parámetros del problema, se crean las condiciones iniciales de las partículas. La variable " $xi$ " indica la posición inicial de las partículas; ésta posición inicial se realiza de forma aleatoria dentro de los límites definidos para el espacio de búsqueda " $limitInf$ " y " $limitSup$ ". También se crea la velocidad inicial " $vi$ " de cada una de las partículas contenidas en la matriz " $xi$ ". Estas velocidades se otorgan de manera aleatoria dentro de unos límites " $LimMax$ " y " $LimMin$ " calculados a partir de los límites del espacio de búsqueda. Todos los valores de posición contenidos en la matriz " $xi$ ", se evalúan en la función objetivo " $f$ ", y los valores obtenidos se guardan en una matriz llamada " $y$ ".

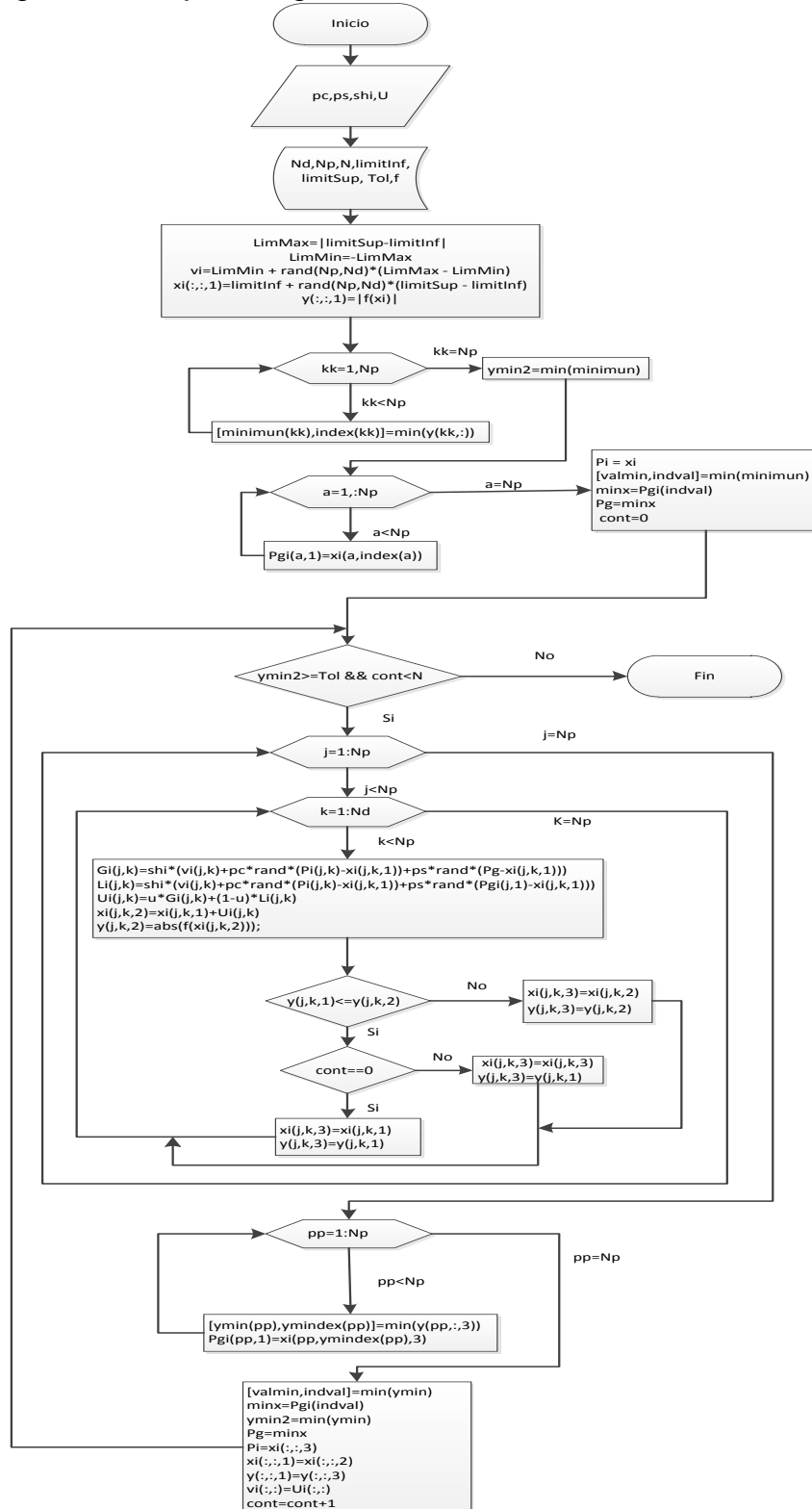
Luego se inicia un ciclo *for* en el que se busca el valor más pequeño contenido dentro de cada fila de " $y$ " y la posición de este menor dentro de la matriz " $y$ ". Este valor indica el valor más cercano a la raíz en ese vecindario (*columna*). Con esa información se encuentran las mejores posiciones locales, que son los valores contenidos en cada vecindario (*fila*) de " $xi$ " que generan un valor más cercano a la raíz y se guardan dentro del vector " $Pgi$ ". La partícula que evaluada en " $y$ " genera el valor más cercano a la raíz se conoce como mejor posición global " $Pg$ ", y ésta representa la mejor partícula encontrada en el enjambre.

La mejor posición visitada por cada partícula está representada en la matriz " $P_i$ ". Hace referencia al punto visitado por la partícula en que al evaluarlo en la función genera un valor más cercano a cero. Para la primera iteración como las partículas nunca antes han visitado alguna posición, el valor de " $P_i$ " se designa igual a la posición inicial de las partículas " $x_i$ ". Para comenzar con el cálculo de la nueva posición y velocidad de las partículas, se colocan dos restricciones que indican realizar las iteraciones, mientras no se pase el número máximo de estas " $N$ " y mientras no se haya llegado a un valor de raíz menor que la tolerancia definida.

Luego para calcular los nuevos valores de posición y velocidad en cada partícula, se ingresa a dos ciclos *for* anidados que recorren cada una de las posiciones de velocidad y posición iniciales. Inicialmente se calculan los valores de la matriz " $G_i$ " que contiene la velocidad de actualización en la variante global de las partículas " $x_i$ ". De manera semejante se calculan los valores de la matriz " $L_i$ " que contiene la velocidad de actualización en la variante local de las partículas " $x_i$ ". Estas dos velocidades de actualización son combinadas en una única ecuación que es la velocidad general de actualización de las partículas " $U_i$ " y es el resultado del esquema principal de *UPSO*.

A partir de esta velocidad de actualización se calcula la nueva posición que deben tener las partículas y se guardan en una nueva dimensión de la matriz " $x_i$ ". Cada una de las nuevas posiciones calculadas se evalúan en la función y su resultado se guarda en una nueva dimensión de la matriz " $y_i$ ".

Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo *UPS0*.



Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos, se comparan con los guardados anteriormente en la primera dimensión de " $y_i$ " y los que resultan estar más cerca a la raíz entre las dos matrices, son guardados como la nueva matriz de mejores resultados " $y_i$ ". De igual manera se hace con los valores de " $x_i$ " que generan estos buenos resultados y se guardan dentro de " $P_i$ " que es la mejor posición. Finalmente se calcula nuevamente la mejor posición global " $P_g$ ", y se guardan los últimos valores obtenidos de posición " $x_i$ ", evaluación " $y$ ", y velocidad " $v_i$ ", como si fueran las condiciones iniciales de las partículas, para realizar nuevamente el proceso iterativo y encontrar así la raíz.

### **2.3.2.1 MODIFICACIONES**

Para asegurar que el algoritmo encuentre únicamente las raíces dentro del espacio de búsqueda señalado, se realizaron dos modificaciones al algoritmo principal *UPSO*. Por la naturaleza de la aleatoriedad del algoritmo *UPSO*, este cambio tiene como fin retornar cada una de las partículas que durante su recorrido por la función objetivo salga de los límites del espacio de búsqueda planteado. Las modificaciones difieren en como son retornadas las partículas al espacio de búsqueda. Con este pequeño cambio se pretende tener control sobre el funcionamiento del método y reducir partículas extraviadas que no contribuyen al buen desempeño de este, además de tiempos de ejecución reducidos.

#### ***Modificación 1.***

En la línea donde se calcula la nueva posición de las partículas, se utiliza una figura condicional, si esta nueva posición está dentro del espacio de búsqueda será adoptada y el proceso de actualización sigue; de no ser así la partícula retornará a la posición calculada inmediatamente anterior, que por la naturaleza del algoritmo está dentro del espacio delimitado.

```
if xi(j,k,2)>=limitSup || xi(j,k,2)<=limitInf
    xi(j,k,2)=xi(j,k,1);
end
```

### ***Modificación 2.***

Una modificación alternativa en esta parte del algoritmo, es una restricción que funciona de manera similar a la anterior, preguntando si la nueva posición es mayor al límite superior o menor al límite inferior del espacio de búsqueda, de ser afirmativa la respuesta, esta nueva posición no es aceptada por salirse del espacio de búsqueda definido, y el algoritmo debe designar como nueva posición para esa partícula, una posición aleatoria que está restringida dentro del espacio de búsqueda planteado.

```
if xi(j,k,2)>=limitSup || xi(j,k,2)<=limitInf
    xi(j,k,2)=limitInf + rand*(limitSup - limitInf);
end
```

## **3. EXPERIMENTACIÓN**

### **3.1 METODOLOGÍA**

Para alcanzar los resultados propuestos y obtener cada una de las curvas correspondientes a los modos de propagación posibles y deseados, la investigación se dividió en dos etapas; la primera se enfocó en encontrar la frecuencia de corte, cuyo valor da el punto de partida para realizar un barrido de frecuencia; la segunda, en hallar las diferentes constantes de propagación. El proceso que se describe a continuación se realizó para cada curva de dispersión de los modos posibles de propagación en una guía de onda con sección

transversal rectangular parcialmente llena. Todas las pruebas se realizaron con los valores enunciados en la tabla 5, a menos que se haga alguna aclaración diferente:

Tabla 5. Parámetros empleados en la guía de onda.

$\mu_o$	$4\pi * 10^{-7} H/m$	Permeabilidad en el vacío
$\epsilon_o$	$8.854 * 10^{-12} F/m$	Permitividad en el vacío
$\mu_1$	1	Permeabilidad relativa
$\epsilon_1$	4	Permitividad relativa
$a$	30mm	Ancho Guía
$b$	$a/2$	Alto Guía
$h$	$b/2$	Altura del dielectrico
$c$	$3 * 10^8 m/s$	Velocidad de la luz

Fuente: Autores.

### 3.1.1 Búsqueda de la Frecuencia de Corte:

Al realizar la adaptación de la ecuación trascendente respectiva, mencionada en la tabla 4, se reemplazan las componentes del número de onda " $k_{1y}, k_{2y}$ ", mostradas en la ecuación 18 en función de  $k_x, k_z$  y  $k$ , correspondientes a cada material, teniendo en cuenta que la frecuencia de corte se determina en el límite cuando el campo no se propaga, por ende la constante de propagación " $k_z$ " en este punto, es igual a cero. Esto significa que la ecuación trascendente queda expresada en función de la frecuencia y la componente en " $k_x$ " del número de onda, cuyo valor es conocido, debido a la relación encontrada en las condiciones de contorno de las paredes de la guía de onda  $k_x = m\pi/a$ .

FUNCIÓN OBJETIVO 1A.

De la tabla 4 para modo  $EH$ :

$$\frac{\mu_1}{k_{1y}} \tan(k_{1y}h) = -\frac{\mu_2}{k_{2y}} \tan(k_{2y}(b-h))$$

De la ecuación 18:

$$k_{1y}^2 = \omega^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2 \quad \text{y} \quad k_{2y}^2 = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2$$

con  $k_z = 0$  y  $k_x = m\pi/a$ .

Se obtiene:

$$F_{obj1A}(f_c) = \frac{\mu_1}{(2\pi f_c)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2} \tan((2\pi f_c)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 \cdot h) + \frac{\mu_2}{(2\pi f_c)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2} \tan(((2\pi f_c)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2)(b-h)) \quad (35)$$

## FUNCIÓN OBJETIVO 1B.

De la tabla 4 para  $HE$ :

$$\frac{k_{1y}}{\varepsilon_1} \tan(k_{1y}h) = -\frac{k_{2y}}{\varepsilon_2} \tan(k_{2y}(b-h))$$

De la ecuación 18:

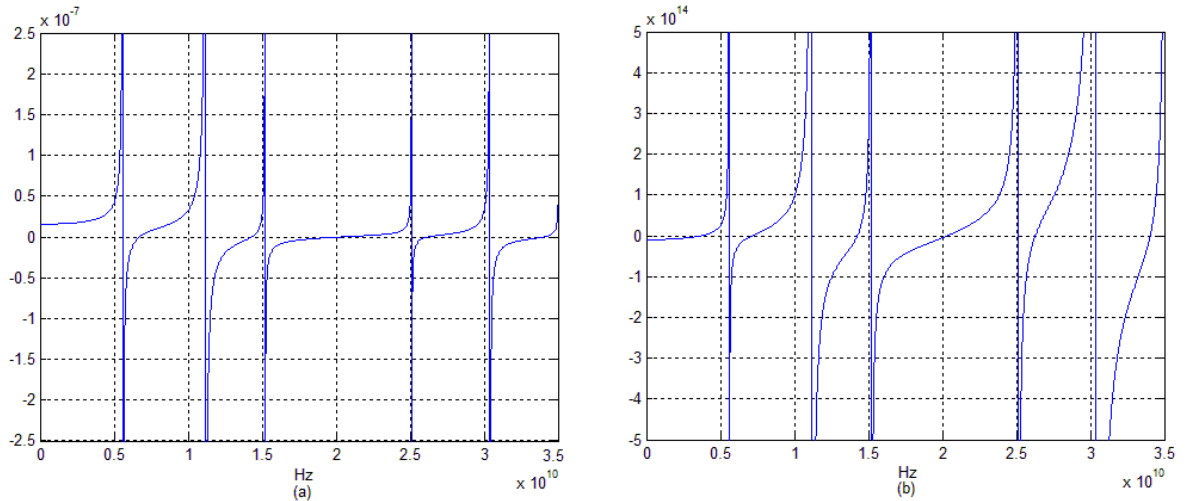
$$k_{1y}^2 = \omega^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2 \quad \text{y} \quad k_{2y}^2 = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2$$

con  $k_z = 0$  y  $k_x = m\pi/a$ .

Se obtiene:

$$F_{obj1B}(f_c) = \frac{(2\pi f_c)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2}{\varepsilon_1} \tan(((2\pi f_c)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2) \cdot h) + \frac{(2\pi f_c)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2}{\varepsilon_2} \tan(((2\pi f_c)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2) \cdot (b - h)) \quad (36)$$

Figura 6. Función objetivo: (a) ecuación 35, modos  $EH_{1n}$ . (b) ecuación 36, modos  $HE_{1n}$ .



Fuente: Autores

En la figura 6, se observa las diferentes raíces existentes en la ecuación 35 y 36, que describen los modos  $EH_{1n}$  y  $HE_{1n}$ , donde cada cruce en cero corresponde a las posibles frecuencias de corte que asigna el valor de  $n$ .

### 3.1.2 Barrido de frecuencia:

En este paso la ecuación trascendente de la tabla 4, se reescribe en función de la frecuencia “ $f$ ”, de la componente “ $k_x$ ” del número de onda y de la constante de propagación “ $k_z$ ”, esto se hace, reemplazando las componentes del número de onda “ $k_{1y}$ ,  $k_{2y}$ ”, en función de  $k_x, k_z$  y  $k$  mostradas en la ecuación 18

correspondientes a cada material. Se realiza un barrido de frecuencia en el rango de los *Giga – Hertz*, partiendo de la frecuencia de corte obtenida en el paso anterior, para encontrar la constante de propagación del modo trabajado en cada instante de la variación en frecuencia y así trazar la curva de dispersión del modo híbrido correspondiente. Dicho barrido se realizó de la siguiente forma: de 3,1831 GHz a 12,732 GHz, con un paso de 50 MHz, que, para el modo  $EH_{11}$ , iniciando desde su frecuencia de corte permite encontrar 120 constantes de propagación que equivalen al 100% de la curva de apariencia continua. Estos valores de frecuencia se toman partiendo de los valores mostrados en la figura 3.

FUNCIÓN OBJETIVO 2A: para barrido de frecuencia de los modos  $EH_{mn}$ :

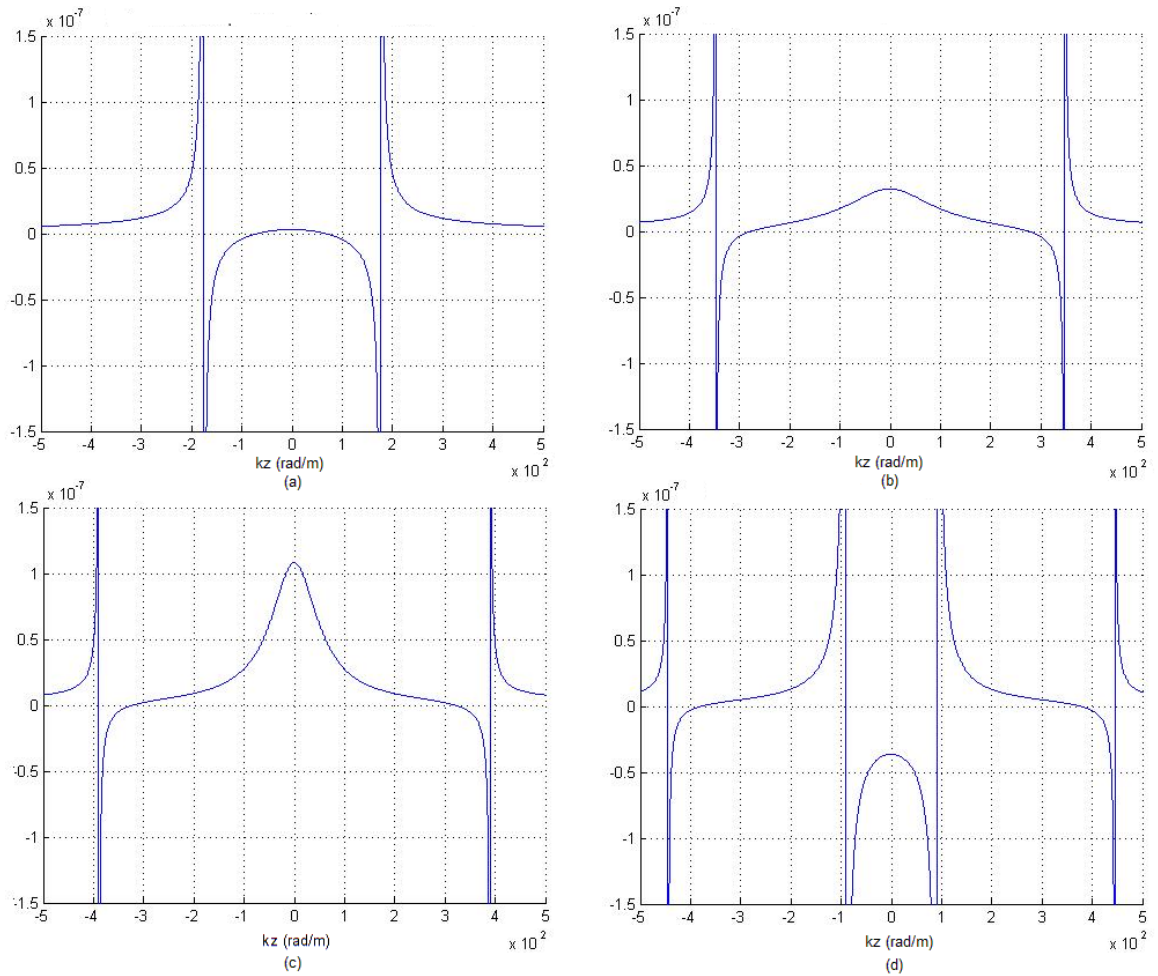
$$F_{obj2A}(k_z) = \frac{\mu_1}{(2\pi f)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2} \tan(((2\pi f)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2).h) + \frac{\mu_2}{(2\pi f)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2} \tan(((2\pi f)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2)(b - h)) \quad (37)$$

FUNCIÓN OBJETIVO 2B: para barrido de frecuencia de los modos  $HE_{mn}$ :

$$F_{obj2B}(k_z) = \frac{(2\pi f)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2}{\varepsilon_1} \tan(((2\pi f)^2 \mu_1 \varepsilon_1 - k_x^2 - k_z^2).h) + \frac{(2\pi f)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2}{\varepsilon_2} \tan(((2\pi f)^2 \mu_2 \varepsilon_2 - k_x^2 - k_z^2).(b - h)) \quad (38)$$

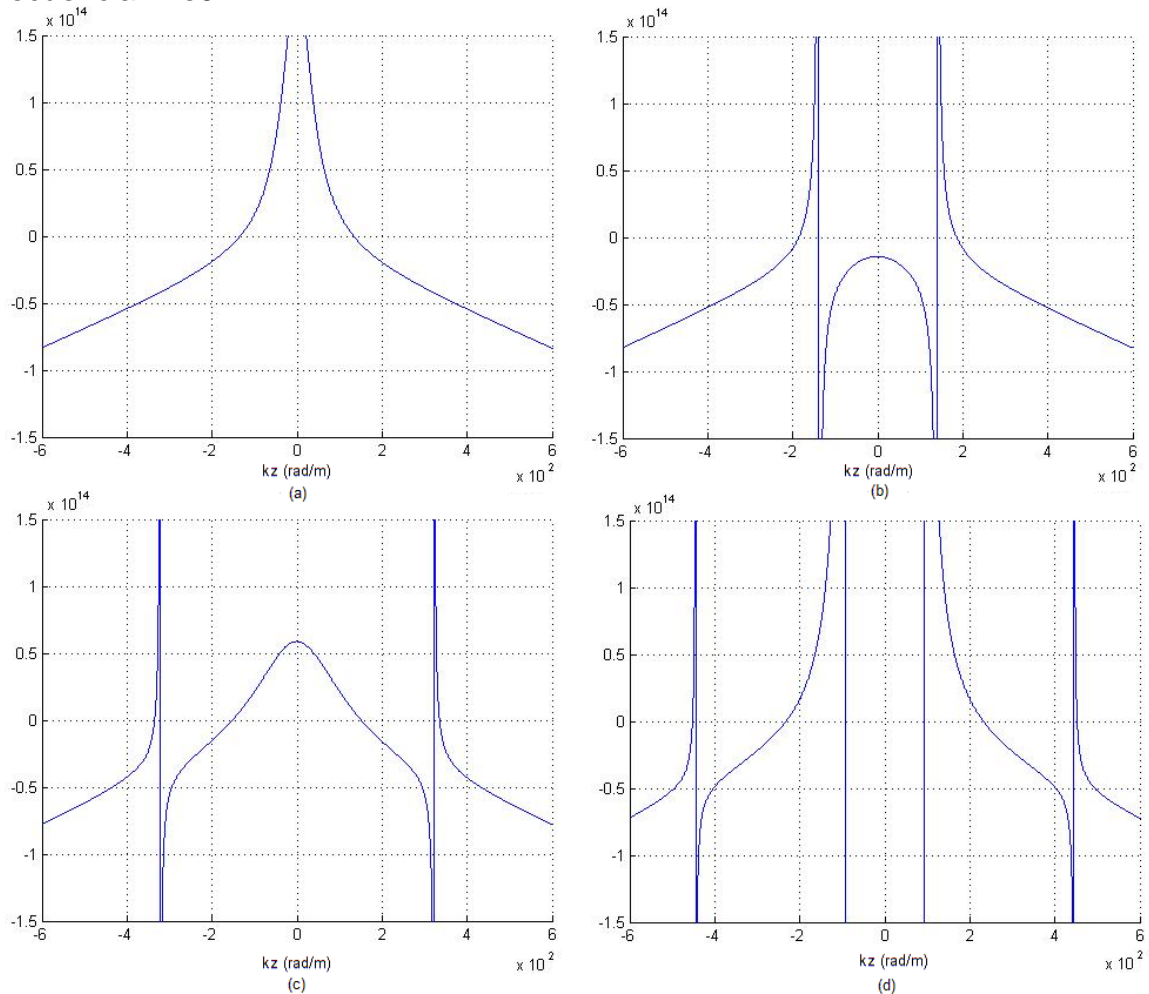
En las figuras 7 y 8, se muestra los cambios que presenta la función objetivo 2A y 2B para los modos  $EH_{11}$  y  $HE_{11}$  durante el barrido de frecuencia.

Figura 7. Cambios en la función objetivo 2A durante el barrido de frecuencia, modo  $EH_{11}$ : (a) frecuencia 6,9e9 Hz. (b) frecuencia 9,9e9 Hz. (c) frecuencia 10,8e9 Hz. (d) frecuencia 11,9e9 Hz.



Fuente: Autores.

Figura 8. Cambios en la función objetivo 2B durante el barrido de frecuencia, modo  $HE_{11}$ : (a) frecuencia 5,7e9 Hz. (b) frecuencia 6,5e9 Hz. (c) frecuencia 9,5e9 Hz. (d) frecuencia 12e9 Hz.



Fuente: Autores.

### 3.2 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS EH Y HE.

#### 3.2.1 OBTENCIÓN DE FRECUENCIAS DE CORTE

Partiendo del estudio del método UPSO con las múltiples configuraciones de los parámetros ajustables y llevándolo a lenguaje de programación Matlab®, se realizan pruebas con el fin de ajustar de la mejor manera sus parámetros, realizar

consideraciones y evaluar su comportamiento, bajo las condiciones ya planteadas y las variaciones inherentes a la solución del problema.

Para hallar las frecuencias de corte, se pone a prueba el método UPSO en un panorama donde la función objetivo cuenta con diferentes posibles soluciones en el rango de búsqueda asignado. Las frecuencias encontradas se ordenan de menor a mayor, cuya posición otorga el valor de la variable “ $n$ ”.

Se utilizó el algoritmo UPSO con propiedades de exploración y explotación balanceadas por factor de unificación “ $u$ ”, que, para valores cercanos a cero, favorece el componente de exploración y para valores cercanos a 1, se enfoca en la capacidad de explotación [11]. En la revisión documental se menciona que una configuración de los parámetros del UPSO que presenta un buen comportamiento es:  $P_c = P_s = 2,05$ ;  $Shi = 0,729$  y  $0,2 < u < 0,5$ . [12,5]. De igual forma, en documentos acerca de PSO, algoritmo del cual proviene UPSO, se habla de relaciones de  $P_c = P_s = 2$ . [13,14,15]. En la tabla 6, se presentan el tiempo de cómputo para la búsqueda de las 10 frecuencias críticas necesarias para trazar las curvas de dispersión de la figura 3, con parámetros de la revisión documental:  $N_p = 5$ ;  $N_v = 5$ ;  $P_c = 2,05$ ;  $P_s = 2,05$ ;  $Shi = 0,729$ ;  $u = 0,5$

Tabla 6. Cálculo de frecuencias críticas.

Prueba	Tiempo de cómputo (s)
1	295,48
2	399,84
3	685,12
4	1026,53
5	319,00
6	239,21
7	540,85
8	475,97
9	716,76
10	200,91

Tiempo de cómputo promedio: 489,967(s).

Fuente: Autores.

Buscando disminuir el tiempo de ejecución en las pruebas contenidas en la tabla 6, se optó por realizar pruebas variando los parámetros empleados por UPSO, llegando a tiempos menores de cómputo. Los parámetros elegidos fueron  $P_c = 1,05$ ,  $P_s = 4,05$ ,  $u = 0,2$ ,  $N_v = 5$ ,  $N_p = 5$ . (Parámetros que más adelante, según pruebas realizadas durante el desarrollo y análisis del método UPSO, estarán sustentados y argumentados). Con estos valores, los tiempos de búsqueda contenidos en la tabla 7 se redujeron entre  $8,087s$  y  $123,751s$ , para un promedio de  $53,018s$ , aproximadamente el 11% del tiempo encontrado con parámetros de la lectura previa. La tabla 7 muestra los tiempos de ejecución del algoritmo, obtenidos mediante pruebas desarrolladas con los siguientes parámetros:  $N_p = 5$ ;  $N_v = 5$ ;  $P_c = 1,05$ ;  $P_s = 4,05$ ;  $Shi = 0,365$ ;  $u = 0,2$

Tabla 7. Cálculo de frecuencias críticas con variación de parámetros.

Prueba	Tiempo (s)
1	19,273
2	92,179
3	38,699
4	42,852
5	20,450
6	26,739
7	67,370
8	90,782
9	123,751
10	8,087

Tiempo de cómputo promedio: 53,018(s).

Fuente: Autores.

Luego de diferentes pruebas sobre el cálculo de las frecuencias críticas, se logró establecer una aproximación de los valores que estas deberían tener. Estos datos se presentan en la figura 9, denominada “*matrizRC*”. Las frecuencias críticas están enmarcadas entre 6,7 GHz y 10,3 GHz, lo que indica que, en el espectro electromagnético, hacen parte del subconjunto radioeléctrico en la banda de frecuencias súper altas SHF (*Super High Frequencies*) de 3 GHz – 30 GHz. Estas frecuencias también se conocen como ondas centimétricas [16] y son usadas en sistemas de radiocomunicaciones por microondas y satelitales [17].

La matriz RC está compuesta de tres filas y cuatro columnas: la primera fila contiene los valores de las frecuencias críticas para el modo  $EH_{m1}$ , ocupando en la cuarta columna la raíz crítica para el modo  $EH_{01}$ ; la segunda, las frecuencias críticas para el modo  $HE_{m1}$  obtenida a partir de su primera raíz ( $n = 1$ ); y la tercera, las frecuencias críticas para mismo modo  $HE_{m2}$ , obtenida a partir de su segunda raíz ( $n = 2$ ).

Figura 9. Matriz de Frecuencias Críticas

```

----- matrizRC -----
      EHmn | 11 | 21 | 31 | 01 |
-----
      HEmn | 11 | 21 | 31 | 41 |
-----
      HEmn | 12 | 22 | -- | -- |
-----

matrizRC=1.0e+009*[6.74093722199 8.34845651657556 10.36456654605998 6.07759155540221;
                  3.71597245460 6.41709245026856 8.69333484406356 10.98457003652078;
                  7.19757338975 10.37790445021369 - -];

```

Fuente: Autores.

### 3.2.2 BARRIDO DE FRECUENCIA

En la etapa de barrido de frecuencia, se obtiene la constante de propagación correspondiente a cada una de las frecuencias evaluadas en la función objetivo; estos valores son encontrados a través del método UPSO, que demuestra su capacidad de respuesta teniendo en cuenta que la función objetivo presenta cambios progresivos en cada una de las frecuencias tratadas. A continuación, se realizan pruebas variando los parámetros que comprenden el UPSO y modificaciones propuestas en el numeral 2.3.2.1. Las pruebas se realizan para el modo  $EH_{11}$ , modo que por sus características presenta mayores cambios en la forma de la función objetivo, durante el barrido de frecuencia.

La metodología para encontrar el mejor comportamiento en exactitud, eficacia y tiempo de cómputo del método *UPSO*, para este tipo de funciones, se basa en la variación de los parámetros manipulables, tales como el parámetro social, el cognitivo, el de restricción y el parámetro de unificación y espacio de búsqueda.

Inicialmente se ajustan los parámetros cognitivo y social teniendo en cuenta que la suma de estos sea mayor a 4 ( $P_c + P_s > 4$  [8]) y con el mismo valor para equilibrar las velocidades aportadas desde lo global y las aportadas desde lo local. El parámetro de unificación ( $u$ ) toma un valor de 0,5, para mantener balance entre la explotación y la exploración del enjambre. El parámetro de constricción " $shi$ " se encuentra ligado a los valores que se asignen para los parámetros cognitivo y social y controla la magnitud de las velocidades.

Las pruebas plasmadas en la tabla 8 se desarrollaron con los siguientes parámetros:  $Np = 10$ ;  $Nv = 10$ ;  $P_c = 2,05$ ,  $P_s = 2,05$ ;  $Shi = 0,729$ ;  $u = 0,5$

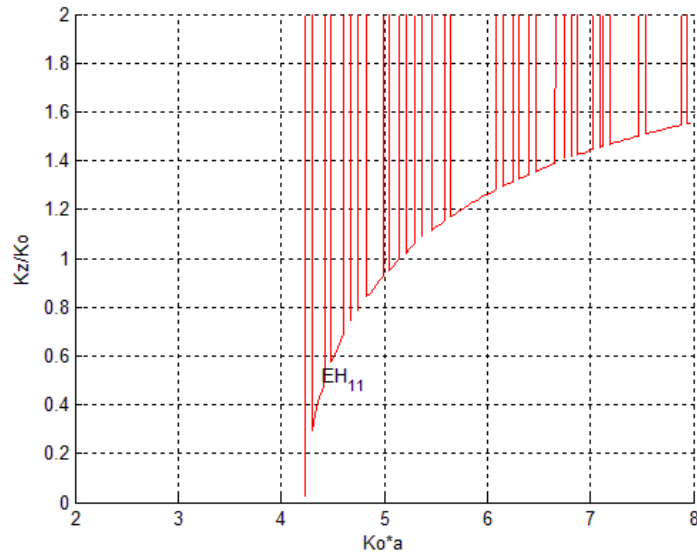
Tabla 8. UPSO, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iterMax	tiempo (s)	Esp.Busq
1	120	100,00	766	15	Terminado_picos	76,4370	[0, 500]
2	120	100,00	897	5	Terminado_picos	66,2354	[0, 500]
3	120	100,00	772	22	Terminado_picos	78,6198	[0, 500]
4	120	100,00	1142	28	Terminado_picos	76,3418	[0, 500]
5	120	100,00	713	6	Terminado_picos	48,8703	[0, 500]

Fuente: Autores.

Con los parámetros mencionados, los resultados en la ejecución del barrido no son los esperados, puesto que la curva trazada (*figura 10*) está conformada por picos que indican que el enjambre diverge o se "*pierde*" en algunos puntos de frecuencia. Además, los tiempos de ejecución no son satisfactorios, como se muestra en la tabla 8, pues la tendencia es realizar un alto número de iteraciones (*itera Max*), para encontrar un punto de los 120 planteados.

Figura 10. Curva de dispersión modo  $EH_{11}$ , correspondiente a prueba de tabla 8.



Fuente: Autores.

Para disminuir el tiempo de ejecución en el trazado de la curva de dispersión, se reduce el número de partículas del enjambre, hecho que implica menos evaluaciones en la función objetivo, menos vecindades, menos vecinos y menos comparaciones entre ellos. Los datos fueron recopilados con los siguientes parámetros:  $Np = 5$ ;  $Nv = 5$ ;  $Pc = 2,05$ ;  $Ps = 2,05$ ;  $Shi = 0,729$ ;  $u = 0,5$

Tabla 9. *UPSO*, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# Puntos	% de Curva	Itera Max	Itera Min	5000 Iter	Tiempo (S)	Esp.Busq
1	10	8,06	260	27	Desborde	8,0177	[0, 600]
2	2	1,67	85	52	Desborde	6,1288	[0, 600]
3	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
4	3	2,50	81	65	Desborde	8,1031	[0, 600]
5	3	2,50	101	44	Desborde	5,9173	[0, 600]
6	5	4,17	139	83	Desborde	5,3606	[0, 600]
7	14	11,67	568	62	Desborde	6,8099	[0, 600]
8	10	8,33	117	61	Desborde	6,4128	[0, 600]
9	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
10	6	5,00	224	36	Desborde	5,5349	[0, 600]

Fuente: Autores.

Tabla 10. *UPSO*, modificación 1, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# puntos	% de curva	Itera Max	Itera min	5000 iter	Tiempo (s)	Esp
1	8	6,45	3368	62	Desborde	16,4050	[0, 600]
2	2	1,61	82	25	Desborde	9,2624	[0, 600]
3	4	3,23	130	27	Desborde	7,8789	[0, 600]
4	2	1,61	1639	19	Desborde	9,0609	[0, 600]
5	5	4,03	894	45	Desborde	9,2027	[0, 600]
6	11	8,87	3942	54	Desborde	18,5639	[0, 600]
7	9	7,26	146	40	Desborde	6,5176	[0, 600]
8	3	2,42	2653	70	Desborde	11,9289	[0, 600]
9	2	1,61	968	83	Desborde	9,4814	[0, 600]
10	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]

Fuente: Autores.

Los resultados tampoco fueron satisfactorios realizando una reducción de las partículas del enjambre, como se refleja en las tablas 9 y 10: La ejecución es abortada por exceso de iteraciones y el *UPSO* diverge a pesar de que las pruebas de la tabla 10 contiene resultados donde el método es probado con una de las modificaciones propuestas (*modificación 1*). Los datos indican pocos puntos o frecuencias evaluadas y un alto número de iteraciones para aquellos que fueron encontrados. Sin apartarse de la idea de utilizar pocas partículas en el enjambre, el siguiente paso a probar fue la variación de los parámetros que repercuten en gran medida en el comportamiento del método *UPSO*.

En las pruebas anteriores, se mantuvo igual el valor de los parámetro cognitivo y social. A continuación se muestran pruebas realizadas donde estos parámetros adoptan valores diferentes para encontrar el mejor comportamiento, con el fin de comparar la conducta del método metaheurístico con diferentes configuraciones. En la tabla 11 se presentan los resultados con la siguiente configuración:

$$Np = 5; Nv = 5; Pc = 4,05; Ps = 1,05; Shi = 0,3657; u = 0,5$$

Tabla 11. UPSO, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 itera	tiempo (s)	Esp.Busq
1	2	1,66	22	19	Desborde	7,7933	[0, 600]
2	3	2,50	119	49	Desborde	9,9252	[0, 600]
3	N	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
4	N	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
5	N	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
6	2	1,66	24	20	Desborde	7,2819	[0, 600]
7	3	2,50	1322	20	Desborde	6,6732	[0, 600]
8	2	1,66	82	27	Desborde	7,1324	[0, 600]
9	N	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
10	N	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]

Fuente: Autores.

Al darle prelación al parámetro cognitivo sobre el parámetro social, se observa que las partículas esparcidas en la función objetivo son poco influenciadas por las mejores posiciones locales y globales del enjambre. Reflejo de esto es el gran número de iteraciones realizadas al tratar de encontrar el punto deseado, generando desbordes por número de iteraciones en el comienzo del barrido de frecuencia. A diferencia de lo anterior, en la tabla 12 se presentan pruebas dando prelación al parámetro social sobre el parámetro cognitivo; de esta forma, se aprovecha la influencia de las mejores posiciones globales y locales durante el desarrollo del método. Las tablas 12, 13 y 14 corresponden a los datos obtenidos por medio del método UPSO sin modificación, con la *modificación 1* y con la *modificación 2*, tal como se describen en el numeral 2.3.2.1, con parámetros:  $Np = 5$ ;  $Nv = 5$ ;  $Pc = 1,05$ ;  $Ps = 4,05$ ;  $Shi = 0,3657$ ;  $u = 0,5$

Tabla 12. UPSO, curva de dispersión modo  $EH_{11} Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iter	tiempo (s)	Esp.Busq
1	39	32,50	4084	17	Desborde	9,6107	[0, 600]
2	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
3	17	14,16	337	16	Desborde	7,3434	[0, 600]
4	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
5	39	32,50	3038	19	Desborde	16,7660	[0, 600]
6	4	3,33	61	24	Desborde	8,8238	[0, 600]
7	13	10,83	443	6	Desborde	10,2033	[0, 600]
8	10	8,33	130	21	Desborde	7,4548	[0, 600]
9	9	7,50	33	23	Desborde	6,1150	[0, 600]
10	37	30,83	2969	21	Desborde	12,5770	[0, 600]

Fuente: Autores.

Tabla 13. UPSO modificación 1, curva de dispersión modo  $EH_{11} Tol = 0,5e - 14$ .

Prueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iter	tiempo (s)	Esp.Busq
1	24	20,00	4662	17	Desborde	19,7866	[0, 600]
2	24	20,00	499	16	Desborde	9,4835	[0, 600]
3	120	100,00	2465	9	Terminado	14,5017	[0, 600]
4	120	100,00	4290	10	Terminado	22,7943	[0, 600]
5	120	100,00	1078	15	Terminado	7,3151	[0, 600]
6	120	100,00	977	10	Terminado	9,6793	[0, 600]
7	44	36,66	1562	19	Desborde	10,2987	[0, 600]
8	0	0,00	N	N	Desborde	N	[0, 600]
9	12	10,00	32	19	Desborde	9,4490	[0, 600]
10	120	100,00	1178	15	Terminado	10,4094	[0, 600]

Tiempo promedio de ejecución de las pruebas terminadas: 12,9399(s).

Fuente: Autores.

Tabla 14. *UPSO modificación 2*, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

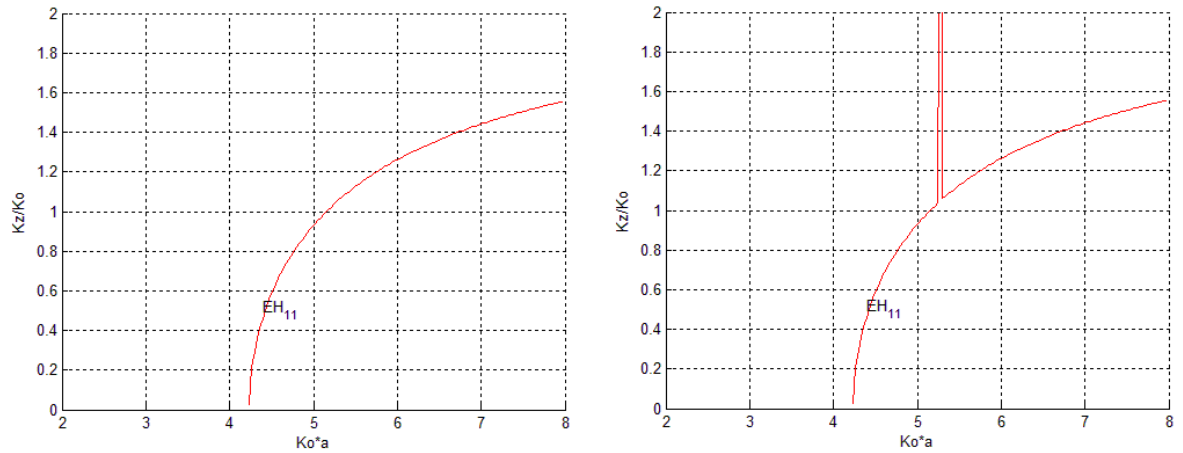
Prueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iter	tiempo (s)	Esp.Busq
1	120	100,00	1218	12	Terminado	9,9819	[0, 600]
2	120	100,00	985	13	Terminado	9,8966	[0, 600]
3	120	100,00	461	9	Terminado	10,8500	[0, 600]
4	120	100,00	533	17	Terminado	7,8047	[0, 600]
5	120	100,00	711	18	Terminado	9,5971	[0, 600]
6	120	100,00	573	12	Terminado	8,8393	[0, 600]
7	120	100,00	1164	14	Terminado	10,9876	[0, 600]
8	120	100,00	888	14	Terminado	8,2390	[0, 600]
9	120	100,00	1163	13	Terminado	7,1362	[0, 600]
10	120	100,00	681	17	Terminado	7,6278	[0, 600]

Tiempo promedio de ejecución, de las pruebas terminadas de la tabla 14: 9,0966(s).

Fuente: Autores.

De la tabla 12, se puede decir que fue acertado priorizar el parámetro social sobre el cognitivo, ya que dio resultados opuestos a los presentados en las tablas 9 y 11, mejorando aspectos como el porcentaje de curva trazada. Con la *modificación 1* (datos consignados en la tabla 13), se logró un gran porcentaje en el trazo de la curva y se alcanzó el 100% de esta en la mitad de la pruebas; sin embargo, se registró una gran cantidad de iteraciones para obtener tal resultado, que va de la mano con el aumento de los tiempos de ejecución. Ya con la *modificación 2* (datos consignados en la tabla 14), se obtuvo el 100% de la curva en todas las pruebas del modo  $EH_{11}$ ; además, las partículas que trataron de salirse del espacio de búsqueda planteado se controlaron de mejor manera, disminuyendo el tiempo de ejecución y las iteraciones para esta tarea. Cabe resaltar que, en una de las pruebas, se presentó un dato no deseado en un punto del barrido, reflejo de una concentración en la exploración de alguna partícula "*perdida*".

Figura 11. Curvas de dispersión modo  $EH_{11}$ , correspondiente a pruebas de tabla 14.



Fuente: Autores.

Posteriormente, se realizaron pruebas variando el parámetro de unificación “ $u$ ”, que afecta la velocidad que toman las partículas. Los parámetros utilizados en las pruebas para la tabla 15 y 16, son los siguientes:  $Np = 5$ ;  $Nv = 5$ ;  $Pc = 1,05$ ;  $Ps = 4,05$ ;  $Shi = 0,3657$ ;  $u = 0,2$

Tabla 15. UPSO modificación 1, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$ .

Pruueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iter	tiempo (s)	Esp.Busq
1	120	100,000	77	12	Terminado	7,0588	[0, 600]
2	120	100,000	46	17	Terminado	6,8668	[0, 600]
3	120	100,000	63	12	Terminado	6,8095	[0, 600]
4	15	12.500	30	20	Desborde	7,2544	[0, 600]
5	120	100,000	50	12	Terminado	6,6050	[0, 600]
6	25	20,833	48	17	Terminado	8,9133	[0, 600]
7	120	100,000	34	8	Terminado	5,4747	[0, 600]
8	120	100,000	50	16	Terminado	6,8731	[0, 600]
9	3	2,500	26	18	Desborde	7,7240	[0, 600]
10	120	100,000	44	16	Terminado	6,3632	[0, 600]

Tiempo promedio de ejecución de las pruebas terminadas de tabla 15: 6,9942 (s).

Fuente: Autores.

Tabla 16. *UPSO modificación 2*, curva de dispersión modo  $EH_{11}$   $Tol = 0,5e - 14$

Prueba	# de puntos	% de curva	Itera Max	Itera Min	5000 iter	tiempo (s)	Esp.Busq
1	120	100	470	13	Terminado	7,7178	[0, 600]
2	120	100	107	14	Terminado	7,6807	[0, 600]
3	120	100	161	17	Terminado	5,2572	[0, 600]
4	120	100	559	16	Terminado	6,8960	[0, 600]
5	120	100	327	7	Terminado	5,1432	[0, 600]
6	120	100	94	14	Terminado	5,6210	[0, 600]
7	120	100	149	12	Terminado	6,4506	[0, 600]
8	120	100	56	13	Terminado	5,6830	[0, 600]
9	120	100	75	16	Terminado	7,5232	[0, 600]
10	120	100	333	13	Terminado	7,3767	[0, 600]

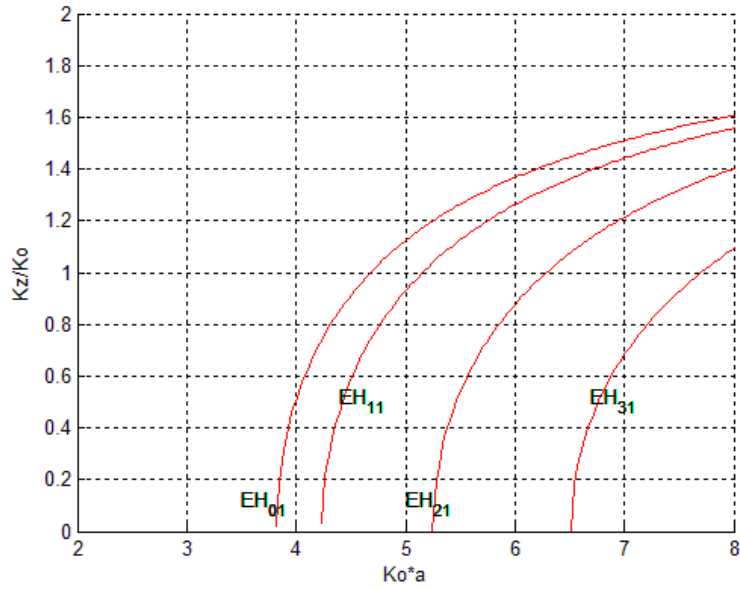
Tiempo promedio de ejecución de las pruebas terminadas de tabla 16: 6,5349(s)

Fuente: Autores.

La *modificación 1* (tabla 15) evidenció buen comportamiento, pues en 7 de las pruebas los resultados fueron los deseados; también, los tiempos promedio de ejecución se redujeron en 45,96% en comparación con los de la tabla 13. Respecto a las pruebas de la tabla 16, muestran buen comportamiento ya que se obtuvo la curva en su totalidad en todas ellas; asimismo, el tiempo promedio de ejecución se redujo en 28,30% en comparación con el de la tabla 14. La reducción de tiempo de ejecución sugiere que el número de iteraciones para hallar cada punto de la curva es bajo.

Luego de estas pruebas, tomando la *modificación 2* y los parámetros de la tabla 16, se obtienen los demás modos de propagación  $EH_{mn}$  (figura 12).

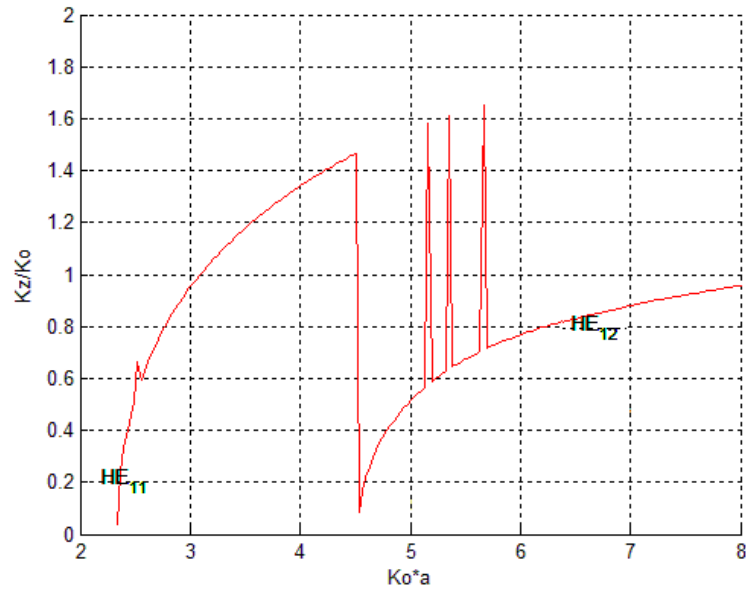
Figura 12. Curvas de dispersión modo  $EH_{mn}$ , correspondiente a mejor prueba.



Fuente: Autores.

Con los mismos parámetros de la tabla 16, se procedió a realizar el trazo de la curva del modo híbrido  $HE_{11}$ , (figura 13).

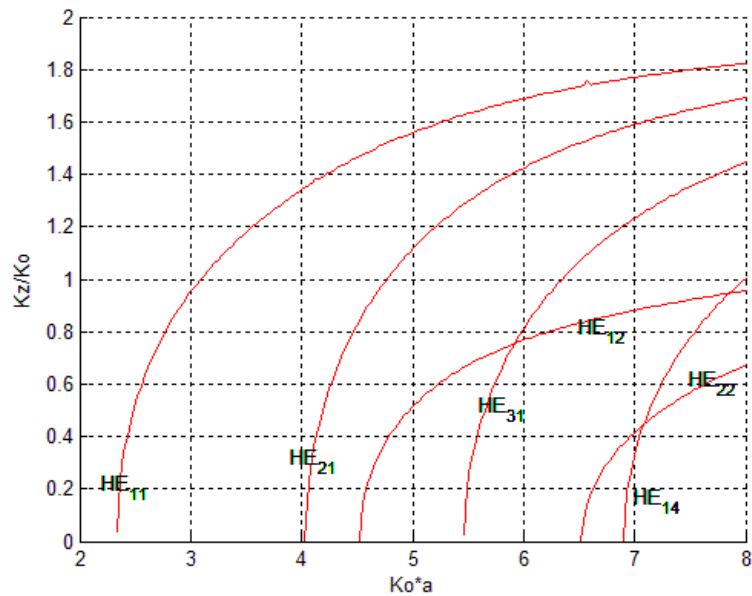
Figura 13. Curvas de dispersión modo  $HE_{11}$ . Con salto a modo  $HE_{12}$ .



Fuente: Autores.

La figura 13 muestra un cambio abrupto durante el trazado de la curva, que corresponde a un salto de modo durante el barrido de frecuencia. Esto ocurre porque, en el espacio de búsqueda asignado para la operación del enjambre, existe más de una constante de propagación válida para determinada frecuencia de trabajo; además, durante el salto de modo de propagación, sobresalen unos picos que ratifican los saltos de modo descritos. Para contrarrestar este salto de modo durante el barrido, se limita el espacio de búsqueda y así obtener las curvas de dispersión de los modos híbridos con predominancia del campo magnético  $HE_{mn}$ , mostrados en la figura 14.

Figura 14. Curvas de dispersión modos  $HE_{mn}$ , correspondiente a la mejor prueba.

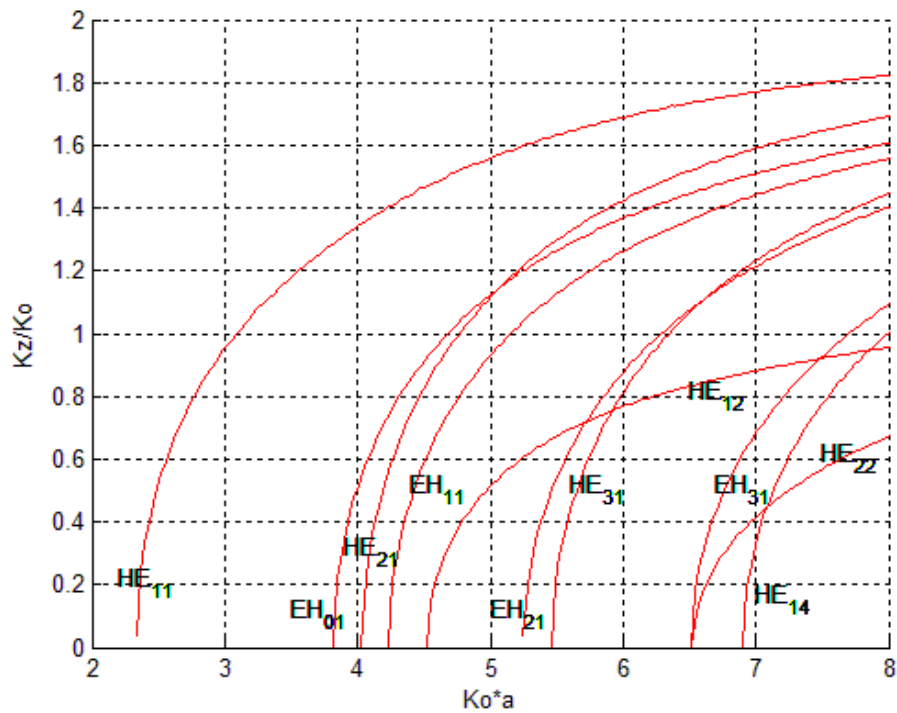


Fuente: Autores.

Con la idea de obtener de la mejor forma las curvas de dispersión de los modos híbridos  $EH_{mn}$  y  $HE_{mn}$  (figura 15), y siguiendo el patrón de comportamiento del

método frente a este tipo de funciones, se realizaron pruebas con los siguientes parámetros:  $Np = 5$ ;  $Nv = 5$ ;  $Pc = 1,05$ ;  $Ps = 4,5$ ;  $Shi = 0,3084$ ;  $u = 0,2$

Figura 15. Curvas de los modos híbridos en una guía de onda rectangular medio llena, con geometría y características electromagnéticas conocidas.  $a/b = 2$ ;  $h/b = 0,5$ ;  $y \epsilon_r = 4$ ;  $\mu_r = 1$ . Mejor prueba.



Fuente: Autores.

Como se aprecia en la figura 15, las curvas de dispersión obtenidas haciendo uso del algoritmo *UPSO*, dando prelación al parámetro social, aplicando la modificación 2 y estableciendo el espacio de búsqueda adecuado, presentan las mismas características de las curvas mostradas en la figura 3, con lo cual se cumple uno de los propósitos planteados en el inicio de este trabajo.

### 3.3 RESULTADOS DE UPSO FRENTE A NEWTON-RAPSHON-BISECCIÓN

El algoritmo híbrido *newton – rapshon – bisección* muestra dificultades en la obtención de las curvas de dispersión de modos híbridos para guías de onda de sección transversal rectangular parcialmente llena con un dieléctrico, desarrollada en la literatura [1]. La razón es que se encuentran varias frecuencias de corte en el espacio de búsqueda dentro del espectro radioeléctrico *SHF*, siendo necesario asignar el punto inicial y el punto final alrededor de la frecuencia de corte buscada y de esta forma encerrar la raíz; de lo contrario, este algoritmo puede caer en una de las asíntotas presentes en la función y divergir en esos puntos. *UPSO* posibilita encontrar las frecuencias de corte en el espacio de búsqueda asignado y presenta baja tendencia a perder la raíz y divergir, después de encontrar los parámetros con mejor desempeño.

El barrido de frecuencia se efectúa a partir de la frecuencia crítica encontrada; ahí, el algoritmo híbrido *newton – rapshon – bisección* tiene la necesidad de un punto de inicio en cada evaluación de la función objetivo con el fin de hallar la constante de propagación. El punto de inicio debe ser actualizado en cada cambio de frecuencia para que el algoritmo converja y encuentre el valor deseado; de no ser así, el algoritmo podría buscar una raíz cercana al punto inicial, entregar información errada (saltos y discontinuidades en las curvas) y, en el peor de los casos, caer en una asíntota y divergir. En el caso de *UPSO*, asignando el espacio de búsqueda indicado y los parámetros con mejor desempeño, se logra encontrar cada constante de propagación conforme se varía la frecuencia, sin presentar las dificultades expuestas con el algoritmo híbrido *Newton – Rapshon – bisección*.

En el barrido de frecuencia para las curvas de dispersión planteadas de los modos híbrido  $EH_{mn}$  y  $HE_{mn}$ , el algoritmo *Newton – Rapshon – bisección* presentó los

tiempos mostrados en la tabla 17, con un tiempo promedio de 554,8089(s). Por su parte, el algoritmo *UPSO*, para realizar esta misma labor, tardó en promedio 28,8758(s) (tabla 18), presentando tiempos similares en cada una de las pruebas, a pesar de ser un método estocástico.

Tabla 17. Tiempo de ejecución por *Newton – Rapshon – bisección*, para realizar barrido de frecuencia y trazar los modos  $EH_{mn}$  y  $HE_{mn}$  de la figura 3.  $Tol = 0,5e - 14$  y  $Tol = 0,5e5$ , respectivamente.

Prueba	Tiempo (s)
1	528,4990
2	521,3721
3	543,0500
4	549,3048
5	540,7501
6	529,8720
7	544,7050
8	582,8225
9	566,0490
10	641,6649

Tiempo de cómputo promedio: 554,8089(s)

Fuente: Autores.

En tabla 18, se muestra los tiempos de ejecución en el barrido de frecuencia para el trazo de las curvas  $EH_{mn}$  y  $HE_{mn}$  de la figura 3, con los siguientes parámetros:  $Np = 5$ ;  $Nv = 5$ ;  $Pc = 1,05$ ;  $Ps = 4,5$ ;  $Shi = 0,3084$ ;  $u = 0,2$ .

Tabla 18. UPSO *modificación 2*, tiempo de ejecución en el trazo de modos  $EH_{mn}$  y  $HE_{mn}$ ,  $Tol = 0,5e - 14$  y  $Tol = 0,5e5$ , respectivamente.

Prueba	Tiempo(s)
1	28,2870
2	29,9590
3	28,0304
4	38,7002
5	31,2374
6	26,0234
7	30,8027
8	33,2392
9	26,3871
10	26,092

Tiempo de cómputo promedio: 28,8758(s)

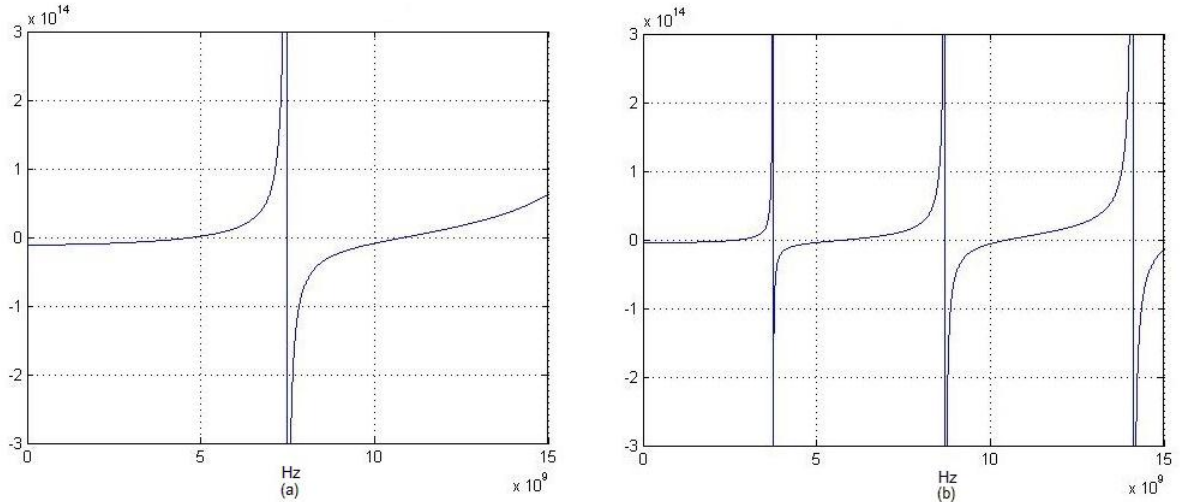
Fuente: Autores.

### 3.4 VARIACIÓN DE PARÁMETROS " $\epsilon_r$ ", " $h$ "

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al realizar las variaciones correspondientes tanto al porcentaje de dieléctrico o altura " $h$ " que ocupa la guía de onda rectangular parcialmente llena, como en las permitividades del material. Las dimensiones de la guía permanecen invariables respecto al desarrollo central ( $a/b = 2$ ).

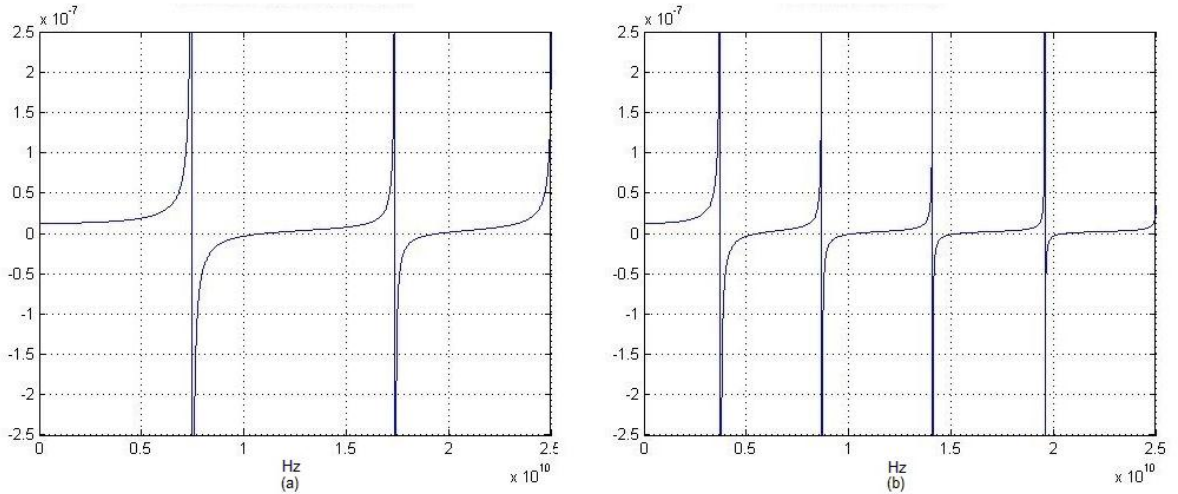
Las frecuencias de corte disminuyeron conforme el porcentaje de dieléctrico aumentó en la guía de onda. Esto da lugar a que las frecuencias de corte de los modos dependientes del índice  $n$  (1,2,3 ...) se encuentren en frecuencias menores y menos distantes entre ellas, como se muestra en las figuras 16 y 17.

Figura 16. (a) Frecuencias de corte modos  $HE_{1n}$  guía rectangular parcialmente llena 10%. (b) Frecuencias de corte modos  $HE_{1n}$  guía rectangular parcialmente llena 90%.



Fuente: Autores.

Figura 17. (a) Frecuencias de corte modos  $EH_{1n}$  guía rectangular parcialmente llena 10%. (b) Frecuencias de corte modos  $EH_{1n}$  guía rectangular parcialmente llena 90%.

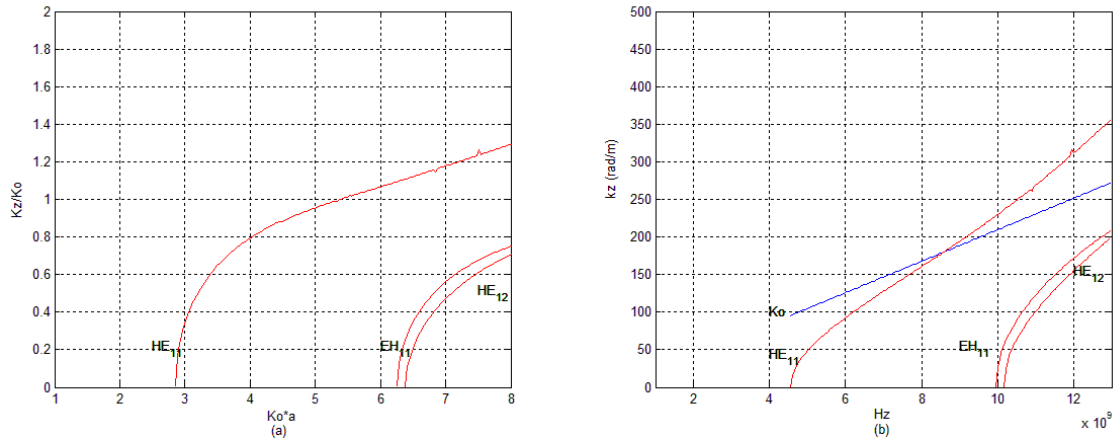


Fuente: Autores.

En las figuras 18, 19 y 20, se muestran las curvas obtenidas variando la altura “ $h$ ”, al realizar un barrido de frecuencia de  $1\text{GHz}$  a  $12,5\text{ GHz}$ , de los modos de

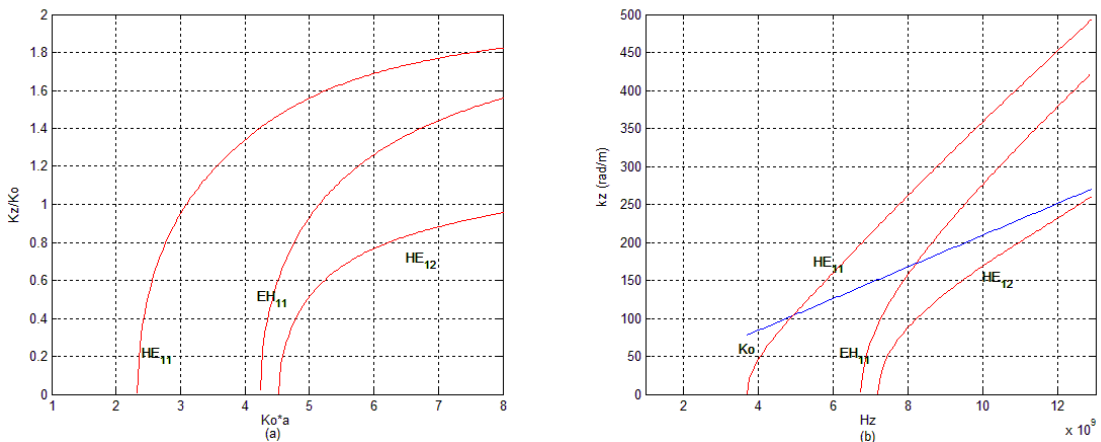
propagación  $EH_{11}$ ,  $HE_{11}$ ,  $HE_{12}$ , correspondientes a las características geométricas  $a/b = 2$ , y permitividad  $\epsilon_r = 4$ .

Figura 18. Modo propagación  $EH_{11}$ ,  $HE_{11}$ ,  $HE_{12}$ ,  $h/b = 0,20$ . (a) Normalizado. (b)  $k_z$  vs Frecuencia.



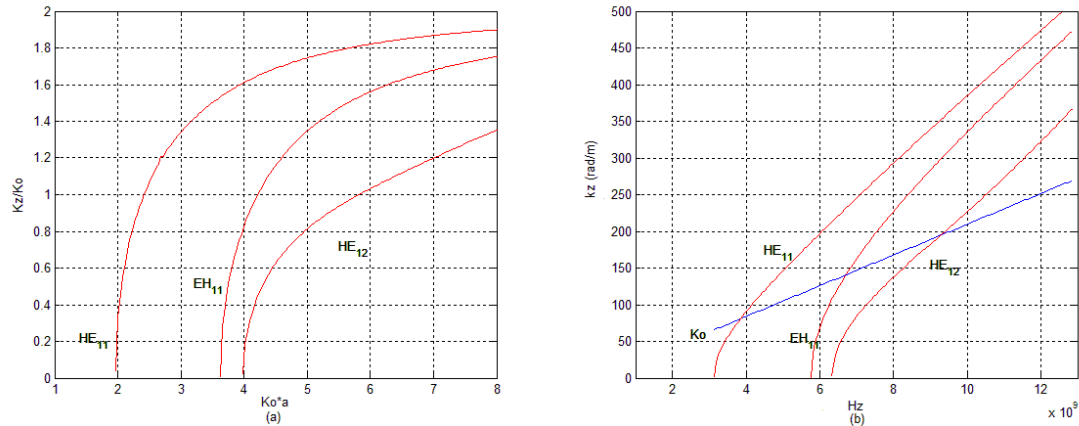
Fuente: Autores.

Figura 19. Modo propagación  $EH_{11}$ ,  $HE_{11}$ ,  $HE_{12}$ ,  $h/b = 0,5$ . (a) Normalizado. (b)  $k_z$  vs Frecuencia.



Fuente: Autores.

Figura 20. Modo propagación  $EH_{11}$ ,  $HE_{11}$ ,  $HE_{12}$ ,  $h/b = 0,75$ . (a) Normalizado. (b)  $k_z$  vs Frecuencia.



Fuente: Autores.

Al aumentar el porcentaje de la altura “ $h$ ”, llenando la guía de onda rectangular con porcentajes de 20%, 50% y 75% de dieléctrico, se reduce la frecuencia de corte de los modos trazados (tabla 19) y aumentan las constantes de propagación “ $k_z$ ” para frecuencias posibles de propagación.

Tabla 19. Frecuencias de corte.

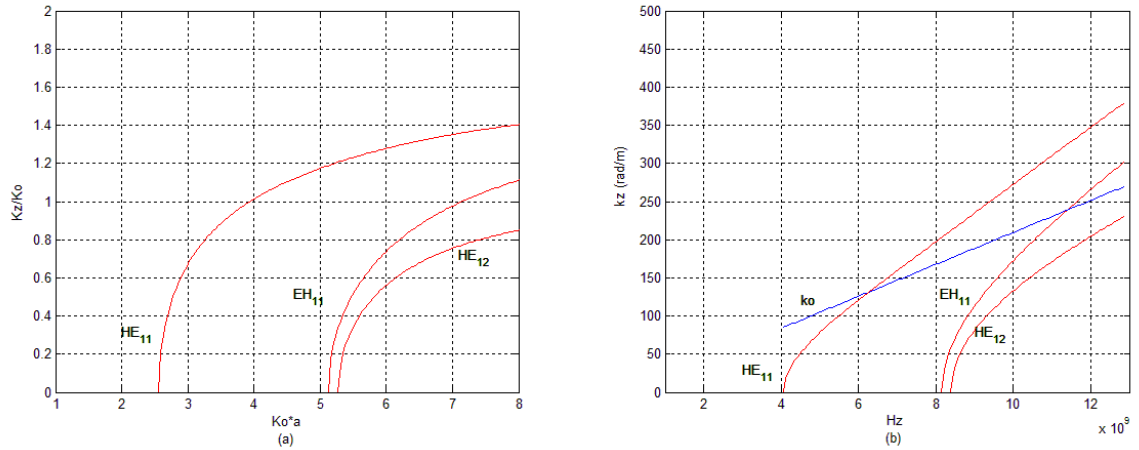
% h	$EH_{11}$	$HE_{11}$	$HE_{12}$
20%	9,9460GHz	4,5490GHz	10,160GHz
50%	6,7409GHz	3,7145GHz	7,1975GHz
75%	5,7600GHz	3,1282GHz	6,3302GHz

Fuente: Autores.

Para realizar la primera prueba de la variación del dieléctrico, se utilizó el *Polystyrene*, un material con  $\epsilon_r=2,56$  empleado en llenado de guías de onda [18], que tiene una constante dieléctrica menor al material empleado como referencia ( $\epsilon_r=4$ ), según tabla C.1, constantes de materiales [2]. Para la prueba, las

dimensiones de la guía de onda continuaron invariantes y se obtuvieron las curvas que se observan en la figura 21.

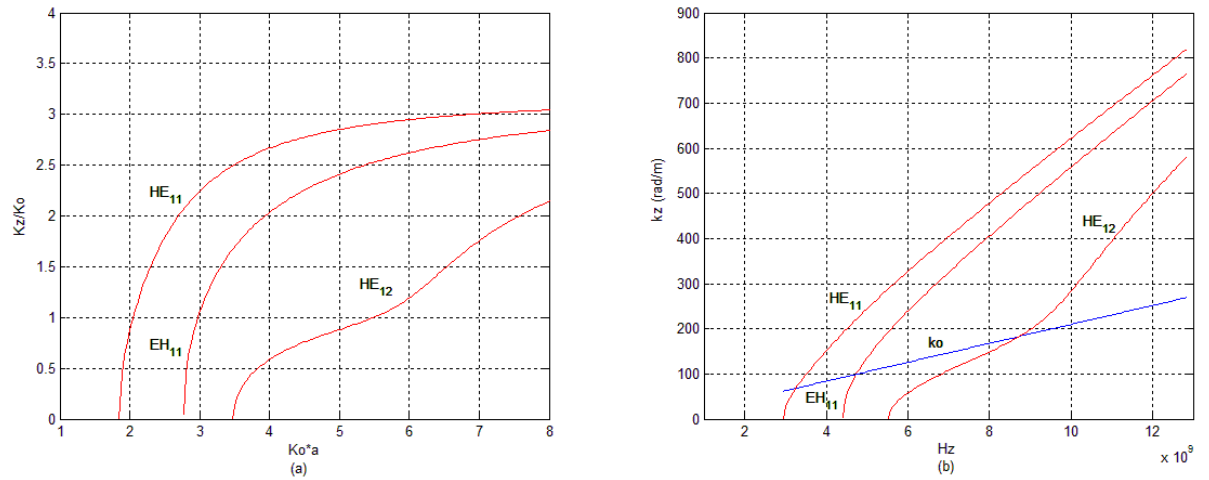
Figura 21. Modo propagación  $EH_{11}, HE_{11}, HE_{12}$   $a/b = 2; h/b = 0,5; \epsilon_r = 2,56$ ,  
 (a) Normalizado. (b)  $k_z$  vs Frecuencia.



Fuente: Autores.

Para la siguiente prueba, se buscó otro material empleado en llenado de guías de onda, que tiene una constante dieléctrica mayor a la presentada en el material de referencia, con permitividad de  $\epsilon_r=10$  [19], que corresponde al nitruro de silicio  $Si_3N_4$ , como lo enuncia la página para la investigación científica y fabricación [20]. Para la prueba, las dimensiones de la guía de onda continúan invariantes, obteniendo las curvas que se observan en la figura 22.

Figura 22. Modo propagación  $EH_{11}, HE_{11}, HE_{12}$   $a/b = 2; h/b = 0,5; \epsilon_r = 10,$   
 (a) Normalizado. (b)  $k_z$  vs Frecuencia.



Fuente: Autores.

En las figuras 21 y 22, observamos que las frecuencias críticas disminuyeron conforme se aumentó la permitividad del dieléctrico " $\epsilon_r$ ", y la constante " $k_z$ " aumentó para las frecuencias posibles de propagación.

## 4. CONCLUSIONES

Se cumplieron satisfactoriamente todos los objetivos propuestos en este trabajo de investigación.

A medida que se aumentó el volumen del dieléctrico de mayor permitividad " $\epsilon_r$ ", manteniendo la guía de onda parcialmente llena, las frecuencias de corte " $f_c$ " disminuyeron, generando la aparición de más modos de dispersión para el mismo espacio de búsqueda.

Al aumentar el porcentaje de dieléctrico " $h/b$ ", o al aumentar la permitividad del dieléctrico " $\epsilon_r$ " dentro de la guía de onda rectangular parcialmente llena, se presentó un aumento directamente proporcional de la constante de propagación " $k_z$ ", así como un comportamiento inversamente proporcional de las frecuencias de corte " $f_c$ ".

En cuanto a rapidez y comportamiento para obtener las constantes de propagación ( $k_z$ ), el método *newton – rapson* mostró una gran tendencia a divergir donde los cruces por cero se localizan cerca de asíntotas; además se requiere gran conocimiento de la función para asignar valores, como el punto inicial. En contraste, el método metaheurístico *UPSO* aumenta la posibilidad de encontrar el cruce por cero y no tiende a divergir al realizar múltiples evaluaciones de forma aleatoria sobre la función; adicionalmente, su estructura de desarrollo produce un tiempo de convergencia notablemente menor.

La modificación 2 usada en el algoritmo general del *UPSO*, que devuelve las partículas perdidas a un punto aleatorio dentro del espacio de búsqueda, garantiza que todas las partículas presentes en el enjambre aporten información favorable para la convergencia del método.

En lo que respecta a la selección de los parámetros y la información que definen las variables de la mejor posición de la partícula del enjambre ( $P_g$ ) y de la mejor posición de cada vecindad ( $P_{gi}$ ), se aprecia que, al darles mayor peso, se facilita la convergencia para encontrar las raíces cercanas a las asíntotas presentes; además, al darle mayor peso a la actualización de la velocidad local ( $v_i^{(k+1)}$ ) en la unificación, se obtiene una convergencia en menor tiempo.

## 5. RECOMENDACIONES

En este trabajo, los dieléctricos se consideraron como no dispersivos, por lo que se recomienda realizar estudios siguientes teniendo en cuenta esta consideración.

Se recomienda estudiar el comportamiento de este tipo de guía de onda con materiales de características diferentes, como los anisotrópicos (que varían las propiedades de acuerdo con la dirección en que son examinados) y los metamateriales (material artificial que presenta propiedades electromagnéticas inusuales, con permitividad y permeabilidad negativo).

Es importante dar una mirada tanto al comportamiento y evolución de la naturaleza, como a los modelos existentes que basan su desarrollo en analogías de esta, con el fin de generar soluciones relevantes y de gran desempeño a problemas de ingeniería actuales.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Jian- Ming Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [2] William H. Hayt and John A. Buck, *Teoría Electromagnética*, Séptima ed., Pablo Eduardo Roig Vázquez, Ed. México D.F., México: McGraw-Hill, 2007.
- [3] Fabián David Solano Torrado, "Diseño y simulación de guías de onda para el calentamiento de materiales con microondas," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Electrónico EL17901, 2008.
- [4] John Fernando Gómez Cardenas, "Modelado y Simulación del Calentamiento de Bloques Cerámicos en una Guía de Ondas," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, Informe final del trabajo de investigación presentado como requisito parcial para obtener el título de Maestro de Ingeniería, en el área de Ingeniería Electrónica WE14833, 2005.
- [5] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Unified Particle Swarm Optimization for Tackling Operations Research Problems," 2005.
- [6] Matías Javier Micheletto, "Optimización de Funciones Multivariadas por Enjambre de Partículas," Ingeniería Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, Cátedra Principios de Computadoras II ISSN: 1850-2946, 2012.
- [7] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery, *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing*. New York: TEX, 1992.
- [8] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Parameter selection and adaptation in Unified Particle Swarm," *Mathematical and Computer Modelling*, no. 46, pp. 198–213 (3), December 2006.
- [9] Maurice Clerc and James Kennedy, "The Particle Swarm—Explosion, Stability, and," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, Febrero 2002.
- [10] MathWorks. (2013, Junio) MathWorks. [Online]. [http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/function\\_handle.html](http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/function_handle.html)
- [11] S. N. Deepa and G. Sugumaran , "Model order formulation of a multivariable discrete system using a modified," *Department of Electrical and Electronics Engineering, Anna University of Technology Coimbatore*, pp. 204–212, Junio 2011.

- [12] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Unified Particle Swarm Optimization in Dynamic Environments," *Computational Intelligence Laboratory (CI Lab), Department of Mathematics*.
- [13] Ting- Yu Chen and Tzu- Ming Chi, "On the improvements of the particle swarm optimization algorithm," *Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University*, pp. 229–239, Septiembre 2009.
- [14] Bo, Liu ; Wang, Ling; Jin , Yi- Hui ; Tang, Fang; Huang, De- Xian;, "Improved particle swarm optimization combined with chaos," *Department of Automation, Tsinghua University; Department of Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, pp. 1261–1271, Noviembre 2005.
- [15] Hsin- Ta Hsieh and Chih- Hsing Chu, "Improving optimization of tool path planning in 5 - axis flank milling using advanced PSO algorithms," *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, Abril 2012, Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University.
- [16] María del Rosario Guerra de la Espriella, Daniel Enrique Medina Velandia, William Orlando Pedraza Pineda, and Juan Manuel Roldán Perea, "Aplicaciones del espectro radioeléctrico para los servicios de radiocomunicación de 9 kHz a 1000 GHz," in *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias - Apéndice D del Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2010, ch. Apéndice D, pp. 22-47.
- [17] Wayne Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta ed., Guillermo Trujano Mendoza, Ed. México, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V. Prentice Hall, 2003.
- [18] Constantine A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Segunda edición ed., Arizona State University, Ed. United States of America: John Wiley y Sons, Inc, 2012.
- [19] Rosa Chávez Velázquez, Ignacio Zaldívar Huerta, Claudia Reyes Betanzo, and Alejandro Díaz Sánchez, "Fabricación de guías de onda ópticas en silicio utilizando óxido de silicio y nitruro de silicio," *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, vol. 18, no. 4, pp. 21-23, Diciembre 2005.
- [20] Grupo Goodfellow. (2013, Julio) Goodfellow. [Online]. <http://www.goodfellow.com/S/Nitruro-de-Silicio'.html>

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Bo, Liu ; Wang, Ling; Jin , Yi- Hui ; Tang, Fang; Huang, De- Xian;, "Improved particle swarm optimization combined with chaos," *Department of Automation, Tsinghua University; Department of Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, pp. 1261–1271, Noviembre 2005.

Constantine A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Segunda edición ed., Arizona State University, Ed. United States of America: John Wiley y Sons, Inc, 2012.

Fabián David Solano Torrado, "Diseño y simulación de guías de onda para el calentamiento de materiales con microondas," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Electrónico EL17901, 2008.

Grupo Goodfellow. (2013, Julio) Goodfellow. [Online]. <http://www.goodfellow.com/S/Nitruro-de-Silicio'.html>

Hsin- Ta Hsieh and Chih- Hsing Chu, "Improving optimization of tool path planning in 5 - axis flank milling using advanced PSO algorithms," *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing*, Abril 2012, Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University.

Jian- Ming Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2010.

John Fernando Gómez Cardenas, "Modelado y Simulación del Calentamiento de Bloques Cerámicos en una Guía de Ondas," Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, Informe final del trabajo de investigación presentado como requisito parcial para obtener el título de Maestro de Ingeniería, en el área de Ingeniería Electrónica WE14833, 2005.

K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Parameter selection and adaptation in Unified Particle Swarm," *Mathematical and Computer Modelling*, no. 46, pp. 198–213 (3), December 2006.

K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Unified Particle Swarm Optimization for Tackling Operations Research Problems," 2005.

K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, "Unified Particle Swarm Optimization in Dynamic Environments," *Computational Intelligence Laboratory (CI Lab), Department of Mathematics*.

María del Rosario Guerra de la Espriella, Daniel Enrique Medina Velandia, William Orlando Pedraza Pineda, and Juan Manuel Roldán Perea, "Aplicaciones del espectro radioeléctrico para los servicios de radiocomunicación de 9 kHz a 1000 GHz," in *Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias - Apéndice D del Manual de Gestión Nacional del Espectro Radioeléctrico*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2010, ch. Apendice D, pp. 22-47.

MathWorks. (2013, Junio) MathWorks. [Online].  
[http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/function\\_handle.html](http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/function_handle.html)

Matías Javier Micheletto, "Optimización de Funciones Multivariadas por Enjambre de Partículas," Ingeniería Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, Cátedra Principios de Computadoras II ISSN: 1850-2946, 2012.

Maurice Clerc and James Kennedy, "The Particle Swarm—Explosion, Stability, and," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, Febrero 2002.

Rosa Chávez Velázquez, Ignacio Zaldívar Huerta, Claudia Reyes Betanzo, and Alejandro Díaz Sánchez, "Fabricación de guías de onda ópticas en silicio utilizando óxido de silicio y nitruro de silicio," *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, vol. 18, no. 4, pp. 21-23, Diciembre 2005.

S. N. Deepa and G. Sugumaran , "Model order formulation of a multivariable discrete system using a modified," *Department of Electrical and Electronics Engineering, Anna University of Technology Coimbatore*, pp. 204–212, Junio 2011.

Ting- Yu Chen and Tzu- Ming Chi, "On the improvements of the particle swarm optimization algorithm," *Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University*, pp. 229–239, Septiembre 2009.

William H. Hayt and John A. Buck, *Teoría Electromagnética*, Séptima ed., Pablo Eduardo Roig Vázquez, Ed. México D.F., México: McGraw-Hill, 2007.

William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery, *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing*. New York: TEX, 1992.

Wayne Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta ed., Guillermo Trujano Mendoza, Ed. México, México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V. Prentice Hall, 2003.