

# ANALISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS ALGORITMOS FSD Y QRD-M EN SISTEMAS MIMO 4X4

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FSD Y QRD-M ALGORITHM PERFORMANCE IN 4X4 MIMO SYSTEM



## AUTOR

CATALINA MUÑOZ C.  
Ing.(c) electrónica  
\*Universidad del Cauca  
Miembro del Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.  
catalinamunoz@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

TITO MUÑOZ  
Ing. (c) electrónica  
\*Universidad del Cauca  
Miembro del Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT).  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.  
titomuri@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

CLAUDIA M. HERNÁNDEZ  
Magister en Electrónica y Telecomunicaciones.  
\*Universidad del Cauca  
Profesora Asistente Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y Miembro del Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)  
claudiah@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## \*INSTITUCIÓN

\*UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
UNICAUCA  
Universidad pública  
Carrera 2 con Calle 15 Norte  
Esquina, Sector Tulcán.  
Edificio de Ingenierías.  
Popayán, Cauca  
decafiet@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

**RECEPCIÓN:** 25 de Junio de 2012

**ACEPTACIÓN:** 6 de Agosto de 2012

**TEMÁTICA:** Sistemas inalámbricos y móviles

**TIPO DE ARTÍCULO:** Artículo de Investigación Científica y Tecnológica.

## RESUMEN ANALÍTICO

Los sistemas de comunicaciones de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) son uno de los pilares de las altas capacidades de transmisión de datos, ofrecidas por los sistemas de comunicación de tercera y cuarta generación. Una de sus etapas más críticas es el proceso de detección, por ello este artículo presenta un análisis comparativo del desempeño de los algoritmos Decodificador Esférico de Complejidad Fija (FSD, *Fixed-complexity Sphere Decoder*) y Descomposición QR con M-algoritmos (QRD-M, *QR Decomposition-M*), empleados en la detección en sistemas MIMO. Para ello se realiza un estudio detallado de las generalidades del sistema MIMO, y se sigue una metodología que permite abordar el problema de la detección, desde una concepción analítica para después modelarlo en un sistema computacional. Los sistemas MIMO cuentan con múltiples antenas de transmisión y recepción, estos emplean esquemas de multiplexación para mejorar la comunicación, con el inconveniente de que los símbolos se interfieren en el receptor, por lo que se requieren algoritmos de detección de señales que permitan detectar los símbolos enviados, entre los cuales se encuentran los algoritmos FSD y QRD-M, estos son analizados y simulados en Matlab para comparar su desempeño, con el fin de determinar el algoritmo adecuado a implementar en un sistema MIMO determinado. En la metodología para el desarrollo de la simulación, se definen los parámetros de los algoritmos, el diagrama de bloques del sistema y los escenarios de simulación, para así realizar el análisis de desempeño. En el análisis de los resultados, los algoritmos FSD y QRD-M se comparan con el algoritmo Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), el desempeño se determina mediante la comparación de las curvas de Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) vs. Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) y la complejidad computacional de cada algoritmo.

**PALABRAS CLAVES:** Algoritmos de Detección, Algoritmo FSD, Algoritmo QRD-M, Complejidad Computacional, Desempeño, Sistemas MIMO

## ANALYTICAL SUMMARY

The Multiple Input Multiple Output (MIMO) communications systems are one of the mainstay of the high capacities data transmission, offered by third and fourth generation communication systems, one of their most critical stages is the detection process, therefore this article present a comparative performance analysis of the Fixed-complexity Sphere Decoder (FSD) and QR Decomposition-M (QRD-M) algorithms, employed in the MIMO system detection. For this is performed a detailed study of the MIMO system generalities, and following a methodology that allows tackle the detection problem, from an analytical conception for model it after in a computational system. The MIMO systems have multiple transmission and reception antennas, these employ multiplexing schemes to enhance the communication, with the drawback that the symbols are interfered at the receptor, so that is require signal detection algorithms that allows detect the sent symbols, among wich are the FSD and QRD-M algorithms, which are analized and simulated in Matlab to compare their performance, to determine the appropriated algorithm to implement in a determined MIMO system. In the methodology to the development of the simulation, is defined the algorithms parameters, the system block diagram and the simulation scenarios, to do the performance analisys. In the results analysis, the FSD and QRD-M algorithms are compared with the Maximum Likelihood (ML) optimal algorithm, the performance is determined through the Bit Error Rate (BER) vs Signal to Noise Ratio (SNR) curve comparison and computational complexity of each algorithm.

**KEYWORDS:** Detection Algorithm, FSD Algorithm, QRD-M Algorithm, Computational Complexity, Performance, MIMO Systems

## INTRODUCCIÓN

El uso de los sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) ha emergido recientemente como una de las técnicas más significativas en el avance de las comunicaciones inalámbricas [1], debido al mejoramiento en la capacidad y calidad [2] que ofrecen al usar técnicas de diversidad y multiplexación espacial. Los sistemas MIMO ofrecen una alternativa al mejoramiento de las comunicaciones inalámbricas, la cual hace de esta tecnología una opción para diversos estándares como: el IEEE 802.11n, IEEE802.16m, y el IEEE802.20 [1], además de ser una tecnología que potencialmente puede aumentar la fiabilidad y velocidad de los actuales y futuros sistemas inalámbricos tales, como Red de Área Local (LAN, *Local Area Network*), o sistemas celulares de Tercera Generación (3G, *3 Generation*) y Cuarta Generación (4G, *4 Generation*) [1].

En un sistema de comunicaciones MIMO típico se cuenta con antenas transmisoras y antenas receptoras [3], donde las señales recibidas se combinan de tal manera que la calidad en la comunicación de cada usuario MIMO mejora [1]. Estos sistemas pueden trabajar en el esquema de diversidad espacial o multiplexación espacial.

En la multiplexación espacial, por cada antena transmisora se envían simultáneamente flujos de datos diferentes, el receptor observa una superposición lineal de símbolos de información, lo cual constituye un problema en la detección de los símbolos transmitidos [4]. Este se soluciona mediante algoritmos de detección de señal, los cuales involucran la decodificación de señales complejas en el receptor, una labor más complicada que la desarrollada en un sistema de una sola antena en transmisión y recepción.

El algoritmo de detección de señal óptimo es el de Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), que minimiza la probabilidad de error cuando todos los vectores de datos son igualmente probables, pero al mismo tiempo incrementa la complejidad computacional [5] de manera exponencial con el número de antenas y/o usuarios [6] [7].

Los algoritmos de detección de señal se pueden clasificar como óptimos y sub-óptimos, donde los óptimos se aproximan al ML en cuanto a desempeño pero con un menor grado de complejidad, entre estos se encuentran los algoritmos de búsqueda en árbol, y los algoritmos sub-óptimos de menor complejidad que los algoritmos óptimos pero con un desempeño inferior a estos, dentro de los cuales se encuentran: Cero Forzado (ZF, *Zero Forcing*), Mínimo Error Cuadrático Medio

(MMSE, *Minimum Mean Squared Error*) y Ecuadorador Realimentado de Decisiones de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE-DFE, *Minimum Mean Squared Error Decision Feedback Equalizer*) entre otros [8].

En la búsqueda de una aproximación al ML, donde se pueda obtener una buena compensación entre desempeño y complejidad, se encuentran los algoritmos de búsqueda en árbol, los cuales aplicando una descomposición QR [4] al problema de ML, permiten modelarlo como un árbol, donde cada trayectoria hasta una hoja representa una posible solución [6], en vez de revisar todas las ramas del árbol; esto evita elevar la complejidad. Se puede reducir la búsqueda basándose en ciertos criterios que dependen del tipo de algoritmo en árbol. Los algoritmos en árbol más utilizados son: Decodificador Esférico (SD, *Sphere Decoder*), Detector de Relajación Semidefinida (SDR, *Semidefinite Relaxation*), Descomposición QR con M-algoritmos (QRD-M, *QR Decomposition-M*), Mejor K (*K-best*), y Decodificador Esférico de Complejidad Fija (FSD, *Fixed-complexity Sphere Decoder*).

Los algoritmos FSD y QRD-M se destacan en los diversos estudios relativos a los algoritmos basados en búsqueda en árbol, dado que se aproximan al ML, con menor complejidad; las investigaciones encontradas de dichos algoritmos son estudios independientes que no proveen información completa de las condiciones en las que han sido realizados, por eso es importante analizar comparativamente su desempeño en un sistema y determinar sus ventajas y desventajas.

El algoritmo QRD-M reduce la complejidad de ML por medio de la búsqueda en árbol, seleccionando solo M candidatos en cada capa del árbol, en vez de probar todas las posibilidades del símbolo transmitido. Los M candidatos son los del valor métrico acumulado más pequeño [9].

El algoritmo FSD alcanza un desempeño cercano al ML realizando un número fijo de operaciones para detectar la señal, este empieza la búsqueda en árbol con una expansión completa de los primeros niveles, luego despliega solo un nodo de la expansión previamente realizada; el nodo desplegado es el de menor métrica acumulativa [10].

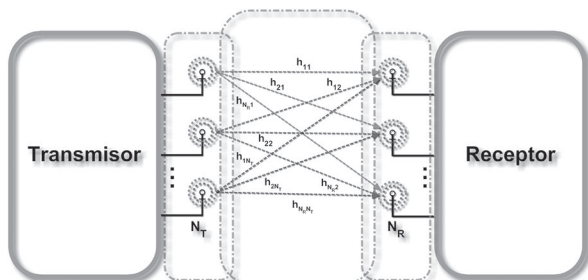
En este artículo se presenta el análisis comparativo del desempeño de los algoritmos FSD y QRD-M en sistemas MIMO punto a punto 4x4 con Modulación de Amplitud en Cuadratura QAM (*Quadrature amplitude modulation*) y 16-QAM. Está organizado así: en la sección 1 se presenta el marco teórico, en la sección 2 se describe el problema que se aborda en este trabajo y la metodología empleada para su desarrollo, se realiza la descripción

y análisis del sistema, la herramienta de simulación utilizada, el proceso de desarrollo implementado y la validación de resultados. La sección 3 se enfoca en el análisis de los resultados y en la sección 4 se presentan las conclusiones de este estudio.

## 1. MARCO TEORICO

Los sistemas MIMO cuentan con múltiples antenas de transmisión y de recepción, como se observa en la Figura 1.

FIGURA 1. Sistema MIMO



El sistema puede ser modelado considerando  $N_T$  transmisores y  $N_R$  receptores, usando una notación matricial de acuerdo a la ecuación (1).

$$r = Hs + v \quad (1)$$

Donde  $s = (s_1, s_2, \dots, s_{N_T})^T$  es el vector de símbolos transmitidos,  $v = (v_1, v_2, \dots, v_{N_R})^T$  es el vector de ruido complejo gaussiano con varianza  $\sigma^2 = N_0$ ,  $r = (r_1, r_2, \dots, r_{N_R})^T$  es el vector de símbolos recibidos, y  $H$  denota la matriz del canal  $N_R \times N_T$ ,  $h_{ij}$  donde es la función de transferencia compleja desde el transmisor  $j$  hasta el receptor  $i$  [11], compuesta de elementos complejos gaussianos.

### 1.1 RECEPCIÓN EN LOS SISTEMAS MIMO

El objetivo del receptor es detectar el vector de símbolos transmitidos, este proceso se realiza mediante la ecuación (2).

$$\hat{s} = \arg\{\min \|r - Hs\|^2\} \quad (2)$$

Una posible solución de (2), es una exhaustiva búsqueda a través del vector completo de la constelación,

seleccionando aquel que la minimice; esta búsqueda la realiza el algoritmo de detección óptimo ML, el cual expande todos los nodos de la constelación, alcanzando una detección óptima en términos de Tasa de Error de Bits (BER, *Bit Error Rate*) pero con un costo computacional que aumenta con el orden de modulación y el número de antenas, por lo que se requiere de algoritmos de detección que se aproximen al ML con una menor complejidad computacional, dos de estos son el FSD y el QRD-M.

Los algoritmos FSD y QRD-M aplican la descomposición QR a la matriz del canal  $H$  para simplificar operaciones; en esta descomposición se define la matriz del canal como la ecuación (3).

$$H = QR \quad (3)$$

Donde  $Q$  es una matriz ortogonal unitaria y  $R$  es una matriz diagonal superior. Aplicando la descomposición QR a (2), se obtiene la ecuación (4).

$$\hat{s} = \arg\{\min \|\hat{y} - Rs\|^2\} \quad (4)$$

Donde  $\hat{y} = Q^* r$  y  $R = Q^* H$ , " $*$ " es el operador Hermitiano. Los algoritmos QRD-M y FSD emplean la ecuación (4), en el proceso de detección del símbolo transmitido.

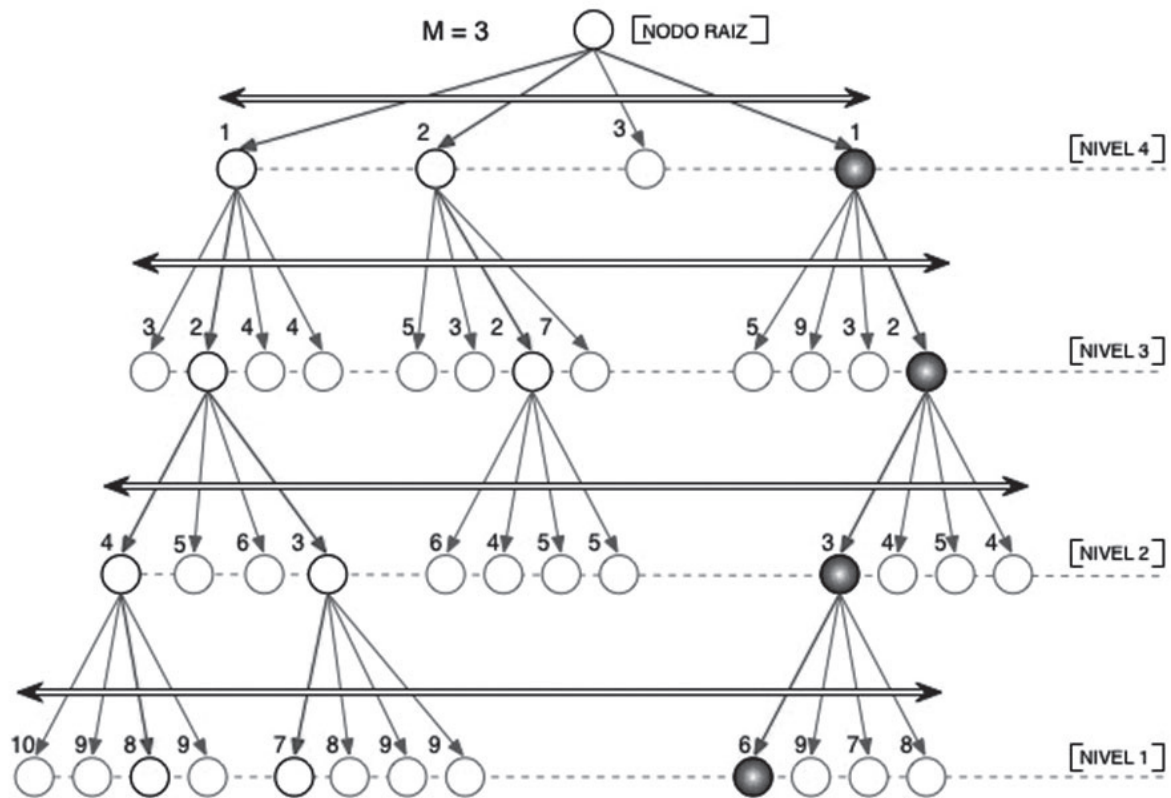
#### 1.1.1 Algoritmo QRD-M

El algoritmo QRD-M realiza la búsqueda en árbol de acuerdo a las características de transmisión y el valor de  $M$ . El número de antenas transmisoras  $N_T$  determina el nivel más alto en el árbol, el orden de modulación  $P$  establece el número de ramas que se pueden expandir de un nodo padre, y el valor de la constante  $M$  indica el número de ramas que se conservan por nivel [12].

Inicialmente se calcula la métrica de los nodos (posibles símbolos transmitidos) del nivel superior y se seleccionan los  $M$  nodos de menor métrica, se ordenan y a continuación se despliegan las  $PM$  ramas de los nodos conservados en el nivel inmediatamente anterior y se repite el proceso hasta el último nivel [13].

En la Figura 2 se muestra un árbol de búsqueda de un sistema MIMO 4x4 con modulación QAM y  $M=3$ , donde la rama con círculos rellenos es la de menor métrica, por lo tanto constituye la solución.

FIGURA 2. Árbol de búsqueda algoritmo QRD-M



### 1.1.2 Algoritmo FSD

El algoritmo FSD busca sobre un número fijo de vectores centrados alrededor del vector recibido  $r$ , los cuales son independientes del ruido y de las condiciones del canal [14]; la búsqueda se realiza a través de un árbol con  $N_t$  niveles, donde  $P$  ramas se originan de cada nodo [15] [16].

El algoritmo FSD tiene dos estados de búsqueda:

- En el primer estado de búsqueda, denominado Expansión Completa (FE, *Full Expansion*); se

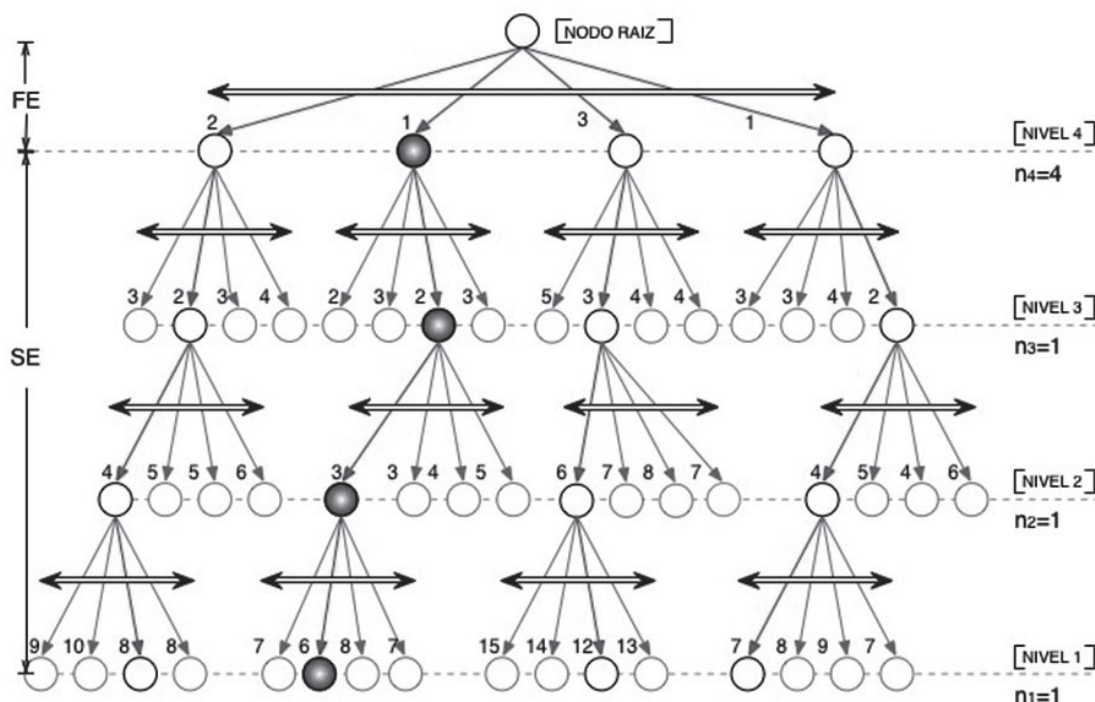
despliegan todos los  $P$  nodos en el nivel superior

- En el segundo estado de búsqueda, Expansión Única (SE, *Single Expansion*) en los  $N_t - 1$  niveles restantes, se expande un solo nodo.

En la Figura 3 se muestra el árbol de búsqueda del algoritmo FSD para un sistema 4x4 con modulación QAM; en el nivel 4 correspondiente al estado FE, todos los nodos se escogen para expandir (4), de estos 4 nodos, en el estado SE se expande un único nodo en los niveles 3, 2 y 1.



FIGURA 3. Árbol de búsqueda algoritmo FSD



## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un análisis comparativo de los algoritmos FSD y QRD-M, permite determinar cuál detecta los símbolos enviados con menor tasa de error de bits y con menor complejidad computacional, bajo las mismas condiciones del sistema.

Se presenta el análisis comparativo del desempeño de los algoritmos FSD y QRD-M en sistemas MIMO punto a punto 4x4 con modulación QAM y 16-QAM. A continuación se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta para desarrollar la simulación.

La metodología empleada [17], para crear y desarrollar la simulación se resume en la Figura 4.

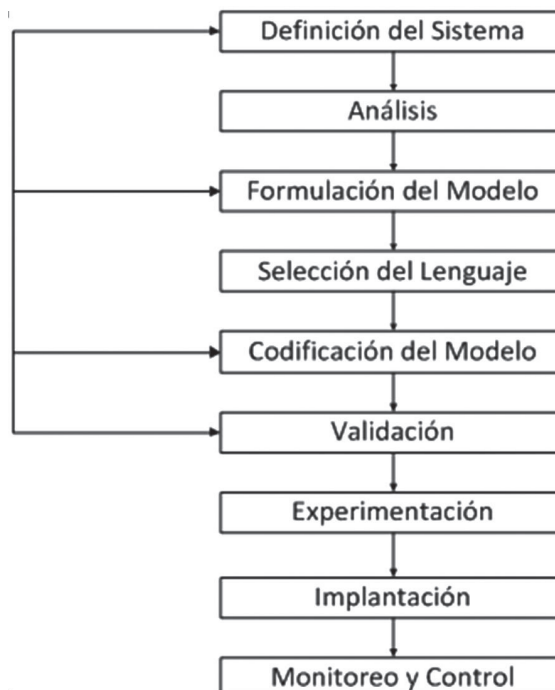
En las siguientes secciones se presenta el desarrollo de cada una de las fases de la metodología empleada.

### 2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Se considera un sistema MIMO punto a punto, con arreglo de antenas 4x4, esquemas de modulación QAM y 16-QAM, canal de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) con desvanecimiento plano, multiplexación espacial empleando codificación vertical espacio temporal por capas de laboratorios Bell (V-BLAST, *Vertical –Bell Labs Layered Space Time*), conocimiento perfecto de la matriz del canal y algoritmos

de detección FSD y QRD-M.

FIGURA 4. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo de una simulación



### 2.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA

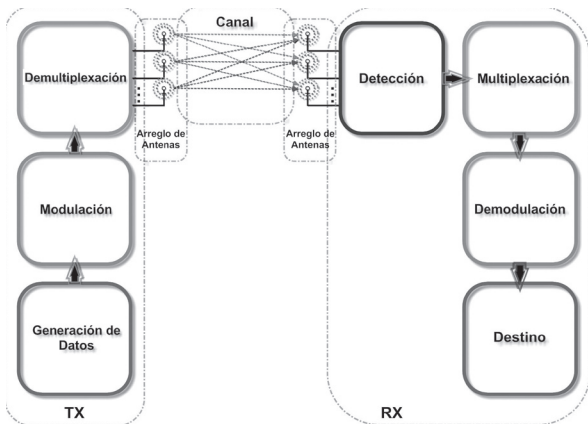
Las características del sistema MIMO empleadas para la simulación de los algoritmos en los diferentes escenarios fueron las siguientes:

- Tipo de algoritmo:  
 Algoritmo QRD-M: M número de símbolos seleccionados por nivel, para sistemas QAM 1, 2, 3 y 4; para simulaciones en sistemas 16-QAM 4, 8, 12 y 16  
 Algoritmo FSD: expansión completa de todos los nodos del nivel superior y expansión de un único nodo en los demás niveles.
- Modulación (P): QAM (P=4), 16-QAM (P=16).
- Número de antenas: Cuatro antenas en el transmisor y cuatro en el receptor (4x4)
- Matriz de transferencia del canal (H): Matriz de transferencia con elementos complejos gaussianos.

### 2.3 FORMULACIÓN DEL MODELO

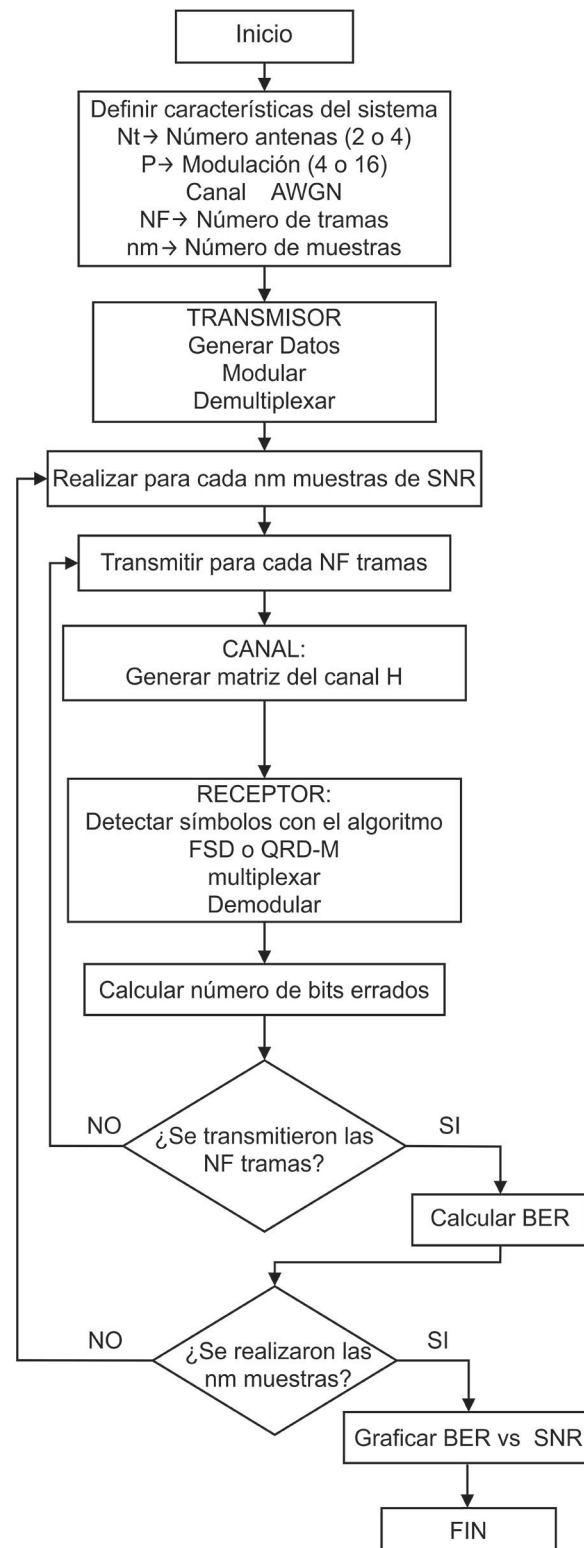
Teniendo en cuenta la definición y el análisis del sistema se generó el diagrama de bloques de la Figura 5, el cual permitió comprender el sistema implementado.

**FIGURA 5.** Diagrama de bloques de sistema MIMO básico



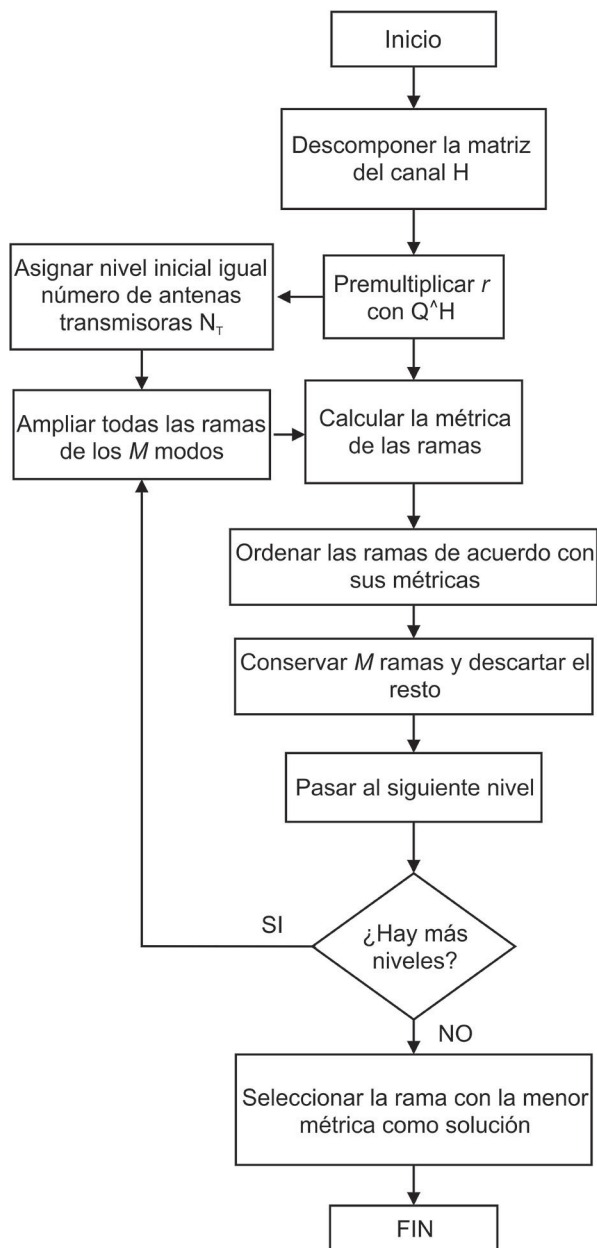
En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del sistema completo a ser simulado. Se generan los datos que van a ser transmitidos en forma de tramas; estas son afectadas por el canal de ruido blanco aditivo gaussiano. En el receptor se aplica el algoritmo de detección para obtener los datos recibidos, estos son multiplexados y demodulados; finalmente se calculan los bits errados para determinar la BER del sistema.

**FIGURA 6.** Diagrama de flujo del sistema MIMO



Analizando cada uno de los algoritmos de detección se modelaron mediante diagramas de flujo, los cuales se presentan en las Figuras 7 y 8.

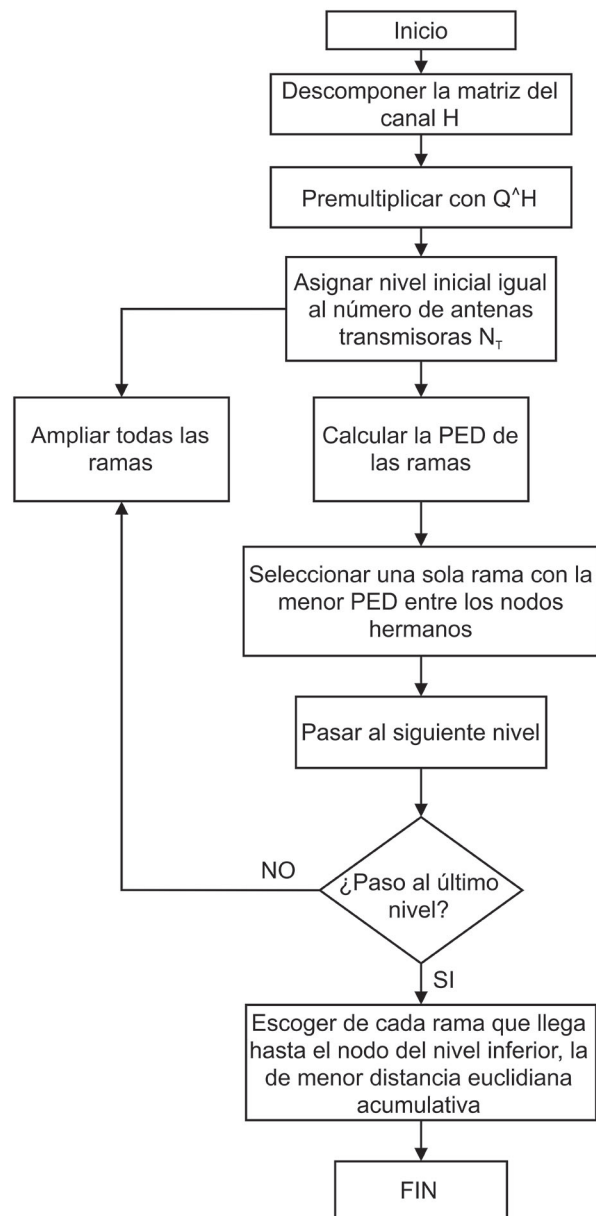
**FIGURA 7.** Diagrama de flujo algoritmo QRD-M



De acuerdo a la Figura 7, el algoritmo QRD-M inicia en el nivel superior, despliega todas las ramas, se calcula la métrica y se seleccionan las  $M$  ramas de todo el nivel

con la menor métrica y las demás se descartan, se repite el mismo proceso hasta el nivel inferior en el cual se selecciona la única rama con la menor métrica.

**FIGURA 8.** Diagrama de flujo algoritmo FSD.



De acuerdo a la Figura 8, empezando por el nivel más alto, se expanden todos los nodos y en los demás niveles se expande un único nodo con menor distancia parcial euclidiana, hasta llegar al nivel inferior. Se compara la distancia euclidiana de las ramas formados por el nodo



del nivel superior hasta el del nivel inferior y se escoge la de menor distancia parcial euclidiana.

## 2.4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE

El lenguaje seleccionado para la implementación del sistema definido fue Matlab, debido a que tiene un uso generalizado en ingeniería además de permitir manipulación de matrices, implementación de algoritmos y creación de interfaz gráfica.

## 2.5 CODIFICACIÓN DEL MODELO

En la codificación del modelo se desarrolló un código computacional según el modelo diseñado y para cada uno de los bloques de la Figura 5, utilizando el lenguaje Matlab.

Durante el proceso de implementación del código del bloque de detección se analizó detenidamente la complejidad computacional de los algoritmos mediante el estudio del tiempo de ejecución, el cual consta de dos fases, una "a priori", que proporciona una medida teórica a través del cálculo de las operaciones elementales [18] empleadas en el desarrollo de cada algoritmo, y otra "a posteriori" en el cual se registra el tiempo promedio de ejecución del algoritmo.

El tiempo de ejecución "a priori" de los algoritmos implementados se determinó mediante una ecuación en función del orden de modulación (P); esta surgió del cálculo de la cantidad Operaciones Elementales (OE), empleadas en la implementación del algoritmo y el número de veces que estas se repitieron [19].

Las OE utilizadas por los algoritmos son: Asignación(A), Conjugada (CON), Multiplicación (M), Acceso al Vector (AV), Comparación (C), Resta (R), Suma (S), Transpuesta (T), Tamaño de Vector (SIZE), Valor Absoluto (Abs); cada una de ellas contabilizada como una OE.

En los algoritmos FSD y QRD-M, se realiza una operación elemental llamada QR, esta es en realidad la función QR de Matlab; debido a que no se conoce el código de esta función, se realiza una aproximación de las OE mediante el proceso matemático de *Gram-Schmidt* de la descomposición QR.

El orden de complejidad de los algoritmos es constante, debido a que la detección se realiza trama a trama y los parámetros de sistema tales como arreglo de antenas, orden de modulación (P) y cantidad de nodos a seleccionar (M) son fijos.

El tiempo de ejecución "a priori" se describe mediante ecuaciones del mejor y el peor de los casos, donde el primero se refiere a la menor cantidad de ejecuciones del código y el segundo a la mayor cantidad, debido a que las líneas dentro de la sentencia condicional se ejecutan en un rango.

## 2.6 VALIDACIÓN

Se compararon los resultados experimentales de la simulación con los resultados de trabajos de investigación similares, teniendo en cuenta dos criterios, la equidistancia entre las curvas de desempeño correspondientes y/o el ajuste entre ellas, este último determina la diferencia entre los valores de SNR para una misma BER, mientras que el primer criterio señala la homogeneidad de dicha diferencia.

En particular, cuando el interés se centra en la relación entre las variables o en la comparación de dos conjuntos de datos, los métodos descriptivos pueden ser de gran ayuda antes de comenzar estudios más complejos; para juzgar los criterios mencionados se utilizan las medidas estadísticas de tendencia central (media aritmética  $\mu$ ) y de dispersión (desviación estándar  $\sigma$  y Coeficiente de Variación (CV)) [19].

En la validación se comprobó que los resultados obtenidos en la simulación fueron semejantes a los de trabajos realizados previamente en condiciones del sistema similares, teniendo en cuenta la equidistancia de las curvas de desempeño, así como la aproximación de los valores de la Relación Señal a Ruido, para valores de Tasa de Error de Bits específicos.

## 2.7 EXPERIMENTACIÓN

En la experimentación se simuló un sistema MIMO 4x4 con canal AWGN y dos esquemas de modulación, QAM y 16QAM.

## 2.8 IMPLANTACIÓN

En la implantación con el modelo diseñado, se ejecutaron las opciones escogidas en la experimentación, con el fin de obtener diversos resultados y así verificar el correcto funcionamiento y eficiencia de la simulación.

## 2.9 MONITOREO Y CONTROL

El monitoreo y control permitió verificar que las etapas anteriores se realizaron correctamente, y que la simulación puede ser modificada en cualquier

momento, para adaptarla a un sistema en concreto o para actualizarla.

Se recomienda seguir esta metodología en el desarrollo de simulaciones de sistemas de telecomunicaciones. Aspectos como la validación y experimentación de resultados permiten dar credibilidad al estudio realizado y la parte de animación, permite brindar un mejor entendimiento a los interesados en el estudio de las simulaciones desarrolladas.

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

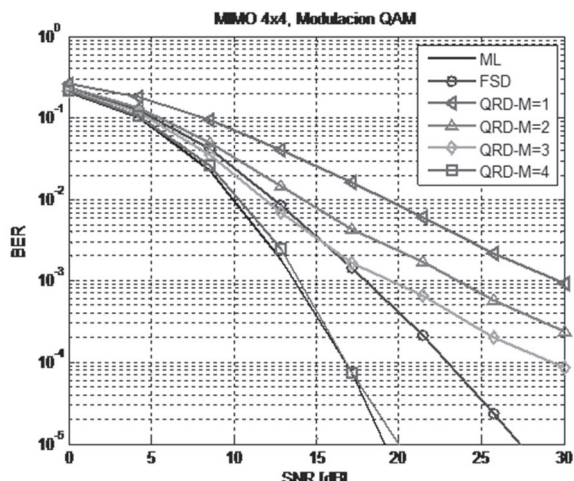
#### 3.1 ESCENARIO 1: SISTEMA MIMO 4X4, MODULACIÓN QAM

En las curvas de desempeño de los algoritmos ML, QRD-M y FSD con modulación QAM en un sistema MIMO 4x4, mostradas en la Figura 9, se observa que el algoritmo QRD-M (M=4) permite alcanzar un desempeño similar al óptimo, y los algoritmos FSD y QRD-M (M=4), al igual que el ML, obtienen valores de BER inferiores a  $10^{-4}$ .

El algoritmo FSD alcanza diferencias hasta de 8.22dB con el ML, mientras que el algoritmo QRD-M (M=4) difiere máximo en 0.88dB.

En la Tabla 2 se observa que el algoritmo ML es el de mayor complejidad computacional y que la complejidad del algoritmo FSD es menor a la de QRD-M (M=3 y 4).

FIGURA 9. Desempeño ML, FSD Y QRD-M, MIMO 4x4



Teniendo en cuenta la Tabla 1 y la Figura 10, el algoritmo QRD-M (M=4) tiene una mejor relación entre desempeño y complejidad en comparación con el algoritmo FSD.

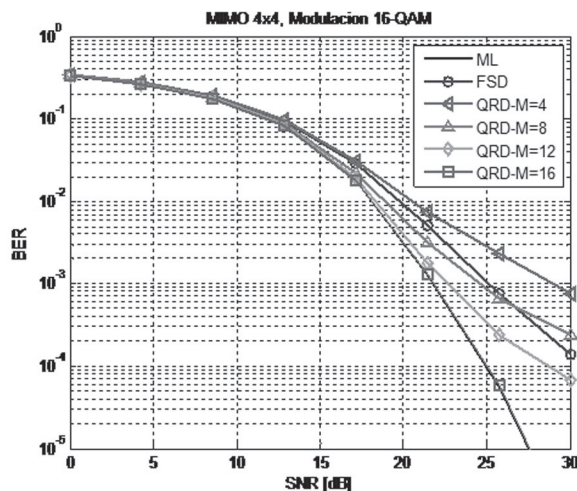
TABLA 1. Complejidad Computacional MIMO 4x4 Y QAM

Tiempo de Ejecucion	FSD	QRD-M				ML	
		M=1	M=2	M=3	M=4		
"a priori" (OE)	Mejor	1900	947	1805	2547	3288	11665
	Peor	2197	1007	1843	2623	3411	12940
"a posteriori" (s)	0.387	0.136	0.365	0.493	0.542	0.579	

#### 3.2 ESCENARIO 2: SISTEMA MIMO 4X4, MODULACION 16 QAM.

En la Figura 10 se presenta el desempeño de los algoritmos FSD, QRD-M y ML, empleados en un sistema MIMO 4x4 con modulación QAM. Se observa que las curvas del algoritmo QRD-M (M=12 y 16) requieren un menor valor de SNR en comparación con el algoritmo FSD para un determinado nivel de BER, además el algoritmo QRD-M (M=16) presenta diferencias casi indistinguibles con el algoritmo ML.

FIGURA 10. Desempeño ML, FSD Y QRD-M, MIMO 4x4 Y 16-QAM



El algoritmo QRD-M (M=16) presenta diferencias con el algoritmo ML inferiores a 0.1dB, por lo que tienen un desempeño similar.

El algoritmo FSD difiere hasta en 3.35dB con el ML en un nivel de BER de  $10^{-3}$ .

En la Tabla 2 se observa que la complejidad del algoritmo ML es mayor a la de los demás algoritmos, y que el algoritmo FSD es de menor complejidad en comparación con el QRD-M (M=8, 12 y16).

En este tipo de sistemas los algoritmos FSD y QRD-M tienen una complejidad notablemente menor a la del ML, pero el QRD-M (M=16) tiene un desempeño cercano al del Algoritmo ML en comparación con el FSD, lo que es el algoritmo indicado para este escenario.

**TABLA 2.** Complejidad Computacional MIMO 4x4 Y 16QAM.

Te	FSD	QRD-M				ML	
		M=4	M=8	M=12	M=16		
"a priori" (OE)	Mejor	17320	10973	28373	52941	83676	2590825
	Peor	23125	11582	30568	55482	91867	2918500
"a posteriori" (s)		4.074	2.056	4.350	6.190	8.317	109.319

#### 4. CONCLUSIONES

La validación de los algoritmos FSD y QRD-M permitió comprobar la similitud de las curvas de desempeño con las de trabajos de investigación previos, encontrando que las diferencias entre estas se deben a las características de simulación propias de cada investigación.

En los sistemas MIMO 4x4 el algoritmo que permite alcanzar un desempeño aproximado al del ML, con menor complejidad computacional es el QRD-M (M=P).

El algoritmo QRD-M (M=P), es el más adecuado a utilizar en los sistemas MIMO 4x4 con modulación QAM o 16-QAM, ya que presenta mejor comportamiento respecto al algoritmo FSD, debido a que el desempeño es aproximado al del ML y con complejidad computacional inferior a la de este.

El análisis de la complejidad computacional permitió mejorar el código desarrollado, reduciendo el número de operaciones elementales y consecuentemente el tiempo de ejecución "a posteriori".

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GESBERT, David, *et al.* From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. vol. 21,no.3, Abril 2003. pp. 281-302.
- [2] SANAYEI, Shahab y NOSRATINIA, Aria. Antenna Selection in MIMO Systems. IEEE Communications Magazine, vol. 42, Octubre 2004. pp. 68-73.
- [3] SHARIAT-YAZDI, Ramin y KWASNIEWSKI, Tad. Configurable K-best MIMO Detector Architecture. En: 3RD INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS, CONTROL, AND SIGNAL PROCESSING (ISCCSP). St Julians, Malta. 2008. pp. 1565-1569.
- [4] LARSSON, Erik. MIMO Detection Methods: How They Work. IEEE signal processing Mag. vol. 26, Mayo 2009. pp. 91-95.
- [5] MATTHAIU, Michail, *et al.* Reduced Complexity Detection for Ricean MIMO Channels Based on Condition Number Thresholding. En: 2008 INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE. Grecia. 2008. pp. 988-993.
- [6] ROMANO, Gianmarco, *et al.* A tree-search algorithm for ML decoding in underdetermined MIMO systems. En: PROCEEDINGS OF THE 2009 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS. Italia. 2009. pp. 662-666.
- [7] ROGER, Sandra. *et al.* Recent Advances in MIMO Wireless Systems. En: 9TH INT. CONF. MATHEMATICAL AND NUMERICAL ASPECTS OF WAVES PROPAGATION. 2009.
- [8] OUERTANI, Rym y BEN-OTHTMAN, Ghaya. Hard and Soft Spherical-Bound Stack decoder for MIMO systems (Online). Noviembre 2008. <http://arxiv.org/abs/0811.1000>
- [9] ELSHOKRY, Auda. Complexity and Performance Evaluation of Detection Schemes for Spatial Multiplexing MIMO Systems. Gaza, 2011, Tesis de Maestría. Universidad Islamica de Gaza. Departamento de Ingeniería.
- [10] MOHAISEN, Manar. Detection Techniques for MIMO Multiplexing: A Comparative Review. KSII

- transactions on internet and information systems, vol. 3, no.6, Diciembre 2009. pp. 647-666.
- [11] BARBERO, Luis y THOMPSON, John. Performance Analysis of a Fixed-Complexity Sphere Decoder in High-Dimensional MIMO Systems. En: IEEEInt. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing Proc.. Francia. 2006. pp. 4-7.
- [12] LIU, L. et al. An Iterative QRD-M Detection Algorithm for MIMO Communication System. En: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMP. China. 2009.
- [13] CHIN, W. QRD Based Tree Search Data Detection for MIMO Communication Systems. En: IEEE 61ST VEH. TECHNOLOGY CONF. PROC. 2005.
- [14] MOHAISEN, Manar y CHANG, KyungHi. On Improving the Efficiency of the Fixed-Complexity Sphere Decoder. En: PROC. 2009 IEEE 70TH VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE FALL. 2009. pp 1-5.
- [15] BARBERO, Luis y THOMPSON, John. Fixing the Complexity of the Sphere Decoder for MIMO Detection. IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 7, no. 6, Jun. 2008. pp. 2131-2008.
- [16] BARBERO, Luis y THOMPSON, John. Extending a Fixed-Complexity Sphere Decoder to Obtain Likelihood Information for Turbo-MIMO Systems. IEEE Trans. Vehicular Technology, vol. 57, no. 5, Sep. 2008. pp. 2804-2814.
- [17] ASTAIZA, Evelio, *et al.* Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones. Padilla Bejarano. 2007.
- [18] GUEREQUETA, Rosa y VALLECILLO, Antonio. Técnicas de Diseño de Algoritmos (Online). 1998 (citado Enero de 2012) <http://www.lcc.uma.es/~av/Libro/indice.html>
- [19] PEÑA, Daniel. Análisis de Datos Multivariantes. McGraw-Hill, 2004.