



Desarrollo de algoritmos para la selección de canales espectrales en redes inalámbricas de radio cognitiva usando las estrategias reactiva y proactiva

Development of algorithms for the selection of spectral channels in wireless networks of cognitive radio using the recovery and proactive strategies

Desenvolvimento de algoritmos para spectral seleção de canais em redes wireless usando o rádio e cognitivos estratégias proativas reactiva

Danilo Alfonso López-Sarmiento¹
Jorge Enrique Salamanca-Cespedez²
Adriana Patricia Gallego-Torres³

Fecha de recepción: enero 2017

Fecha de aceptación: abril 2017

Para citar este artículo: López-Sarmiento, D.A.; Salamanca-Cespedez, J.E., y Gallego-Torres, A.P (2017). Desarrollo de algoritmos para la selección de canales espectrales en redes inalámbricas de radio cognitiva usando las estrategias reactiva y proactiva. *Revista Científica*, 29 (2), 180-194. **Doi:** [10.14483/udistrital.jour.RC.2016.29.a6](https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.29.a6)

Resumen

La radio cognitiva (CR) es el paradigma que permite optimizar la eficiencia del espectro radio eléctrico a través de una gestión dinámica basado en el censado, decisión, compartición y movilidad espectral, siendo la toma de decisiones la encargada de la selección del mejor/mejores canales para la transmisión de los datos de los nodos cognitivos (SUs), dependiendo de la calidad de servicio solicitada (Best Effort [BE] o Real Time [RT]). La literatura existente plantea implícitamente la utilización de una estrategia reactiva para la selección de dichas bandas. No obstante, ello implica que las solicitudes de los SUs solo se procesarán una vez arriben a la estación base (BS) de la red cognitiva, generando retrasos adicionales en el envío de los datos. En el presente artículo se plantea el uso de la estrategia proactiva planteada en López, Rivas y Pedraza (2017), pretendiendo con ello que el procesamiento de las solicitudes de asignación de espectro

para los SUs se realice de manera más rápida o eficiente (tiempo menor de procesamiento en la BS), y con ello optimizando la etapa de decisión espectral en CR. La metodología utilizada parte del uso de una base de datos real que incluye la presencia o ausencia de usuarios primarios o licenciados (PUs) en la banda celular GSM caracterizada mediante redes bayesianas (López, Ordoñez y Rivas, 2016), y donde el ranking de canales disponibles en un slot de tiempo para la asignación a SUs (ordenado de mejor a peor canal) y el ranking de SUs (organizado de acuerdo a los recursos solicitados, dando prelación a las solicitudes Real Time) se implementa a través de algoritmos basados en Topsis y FAHP. Los resultados demuestran que el sistema proactivo reduce el tiempo de asignación de canales a los SUs sin degradar la comunicación del PU.

Palabras Clave: radio cognitiva, estrategia proactiva y reactiva, usuarios secundarios, Topsis, FAHP.

¹. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: dalopez@udistrital.edu.co
². Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: jsalamanca@udistrital.edu.co
³. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: adpgallegot@udistrital.edu.co

Abstract

The Cognitive Radio (CR) is the paradigm that allows optimizing the efficiency of the electric radio spectrum through a dynamic management based on sensing, decision, sharing and spectral mobility, being the decision maker responsible for selecting the best Channels for the transmission of data from cognitive nodes (SUs), depending on the requested quality of service (Best Effort (BE) or Real Time (RT)). The existing literature implicitly proposes the use of a reactive strategy for the selection of such bands; However, this implies that SU requests will only be processed once they arrive at the base station (BS) of the cognitive network, generating additional delays in sending the data. This article proposes the use of the proactive strategy proposed in (López, Rivas y Pedraza, 2017), thus pretending that the processing of spectrum assignment requests for SUs is carried out more quickly or efficiently (less processing time at the BS), thereby optimizing the spectral decision step in CR. The methodology used, part of the use of a real database that includes the presence or absence of primary or licensed users (PUs) in the GSM cellular band characterized by Bayesian Networks (López, Ordoñez y Rivas, 2016), and where the ranking of available channels in a slot Of time for allocation to SUs (sorted from best to worst channel) and SUs ranking (organized according to requested resources, giving priority to Real Time requests) is implemented through algorithms based on Topsis and FAHP. The results show that the proactive system reduces channel allocation time to SUs without degrading PU communication.

Keywords: cognitive radio, proactive and reactive strategy, secondary users, Topsis, FAHP.

Resumo

Cognitive Radio (CR) é o paradigma que otimiza a eficiência do espectro radioelétrico através de uma gestão dinâmica com base em sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade espectral, com a tomada de decisões a cargo de selecionar o melhor / melhor canais para transmissão de dados a partir dos nós cognitivas (SUS), dependendo da qualidade do serviço solicitado (Best Effort (BE) ou Tempo real (RT)). A literatura implicitamente colocada através da utilização de uma

estratégia de reactivo para a selecção destas bandas; No entanto, isto significa que os pedidos SUS só são processados uma vez chegar na estação de base (BS) da rede cognitiva, gerando atrasos adicionais no envio de dados. Neste artigo o uso da estratégia proativa proposto em (López, Rivas y Pedraza, 2017) surge que pretendia o processamento de pedidos de atribuição de espectro para o SUS ser realizada mais rapidamente ou com eficiência (tempo de processamento menor na BS), otimizando assim espectral CR decisão fase. A avaliação da utilização de um banco de dados real que inclui a presença ou ausência de utilizadores primárias ou licenciado (UP) na banda celular GSM caracterizado por redes Bayesian (López, Ordoñez y Rivas, 2016), e, onde a classificação de canais disponíveis em um slot tempo para a atribuição ao SUS (ordenados do melhor ao pior canal) ea classificação do SUS (organizados de acordo com os recursos solicitados, dando prioridade aos pedidos em tempo real) é implementado através de algoritmos baseados em Topsis e FAHP. Os resultados mostram que o sistema proativa reduz o tempo de atribuição de canais para as SUs sem degradar comunicação PU.

Palavras-chave: rádio cognitivo; estratégia pró-ativa e reativa; usuários secundários; Topsis; FAHP.

Introducción

Estudios recientes muestran que uno de los principales problemas en la inserción de nuevas aplicaciones y tecnologías inalámbricas está asociada con la manera ineficiente de distribución de espectro disponible por parte de los organismos gubernamentales (QinetiQ, 2016). Es decir, existen algunas regiones actualmente con licencia donde el espacio radioeléctrico es subutilizado (bandas VHF/UHF) (Federal Communications Commission, 2010), (Taher, Bacchus, Zdunek y Roberson, 2011) y otras regiones espectrales donde se ha generado una degradación en la calidad de servicio. Varios investigadores, como Mitola y Akyildys, han concluido que el acceso dinámico al espectro (DSA) es la metodología adecuada para abordar la problemática de administración del espectro radioeléctrico. En Mitola (1999), plantean la posibilidad de

que la administración se realice de forma dinámica a través de la CR y por ello, con el fin de realizar un aporte en la fase de decisión espectral, se presentan los resultados encontrados, cuando en el procesamiento de las solicitudes en la BS se aplica la utilización de una estrategia proactiva que se anticipe a la selección de la banda/bandas adecuadas antes de que el SU solicite la asignación del canal/canales, a partir de la caracterización de los PUs y del ranking de canales. En tal sentido, el artículo incluye las secciones: marco teórico, modelo de ranking para Topsis y FAHP, diagrama de flujo para la selección de canales, resultados como componentes principales.

Marco teórico

La radio cognitiva (CR) se puede definir como un sistema inteligente de comunicación inalámbrica que tiene por objetivo proveer una transmisión de datos altamente confiable mediante la utilización eficiente del espectro, esto es posible gracias a que posee conciencia del entorno que le rodea, aprendiendo de este y adaptándose a las variaciones estadísticas en el estímulo de entrada (Haykin, 2005). Se podrían definir tres etapas con diferentes funciones en un ciclo cognitivo como se observa en la figura 1, en la que el sub-bloque "Decisión" se refiere a la selección de la banda más adecuada en determinado tiempo, frecuencia y ubicación específica, de tal manera que se logre satisfacer los requerimientos de calidad de servicio (QoS) del usuario cognitivo, sin causar interferencia a otros usuarios (García, López y Rivas, 2016); su éxito va a depender de que tan eficiente es el modelo de caracterización del PU y del sistema de procesamiento de las solicitudes en la BS (búsqueda de recursos y asignación del espectro) (figura 2).

Diagrama del sistema para la selección de canales (estrategia reactiva)

El modelo propuesto para la simulación de la estrategia reactiva (figura 3) inicia con la caracterización

de los usuarios primarios en los canales, es decir, la predicción del comportamiento en el siguiente "time slot" de los PUs aplicando el modelo basado en Redes Bayesianas mostrado en López, Ordoñez y Rivas (2016). Se discriminó la existencia o no de los PUs entre 0 (canal disponible) y 1 (canal ocupado) a partir de la definición del umbral en GSM. Seguidamente se estableció para cada espectro disponible el ancho de banda en MHz, la probabilidad de disponibilidad y el tiempo estimado de disponibilidad en segundos, y se agregó un parámetro que indica el retardo en cada canal. Como la base de datos solo relaciona niveles de potencia, los valores para la variable retardo en el canal se definió al azar entre 0 y 1 segundos. Con dichas métricas se construyó un algoritmo basado en Topsis y otro en FAHP que generara un ranking de canales con el fin de establecer cuáles canales presentan las mejores características ordenándolos descendientemente para su posterior asignación a SUs.

Para la estrategia reactiva de procesamiento (mostrada en la parte inferior de la figura 3) se propone que los SUs que deseen transmitir tengan un comportamiento de arribo exponencial y le comuniquen a la BS por medio de una "trama de presentación" las características del tráfico, indicando si son de tipo RT (pudiendo solicitar cinco o siete canales) o BE (uno o tres canales). Cabe destacar que para determinar la cantidad de canales que se pueden utilizar en cualquiera de los dos tipos de flujo se tomó como base el estudio y análisis hecho en Hernández (2016).

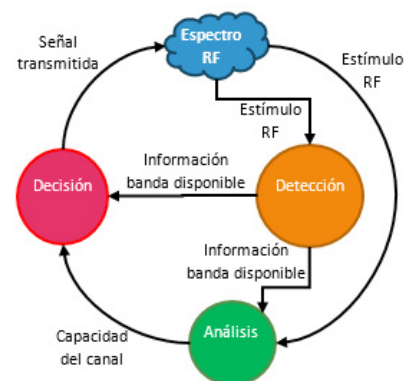


Figura 1. Ciclo cognitivo en CR.

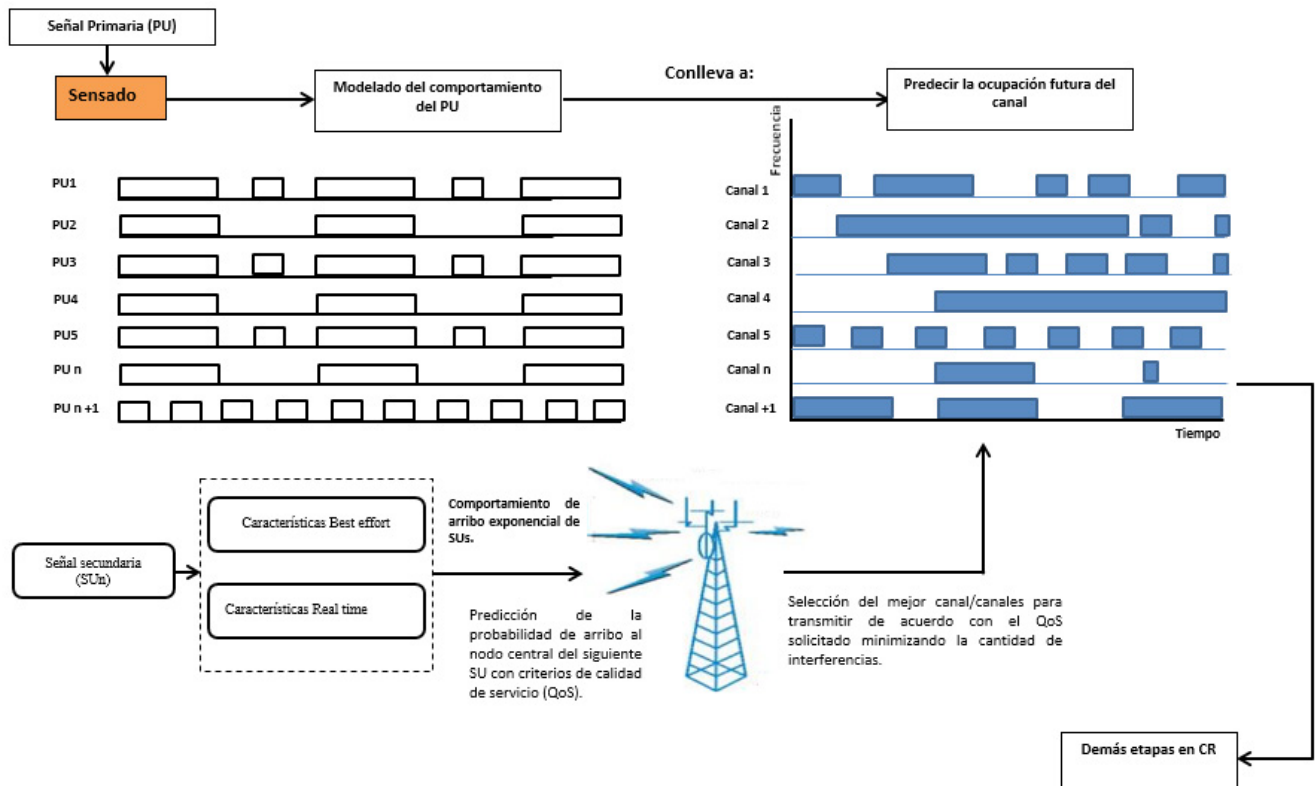


Figura 2. Diagrama lógico del sistema de selección de canales propuesto.

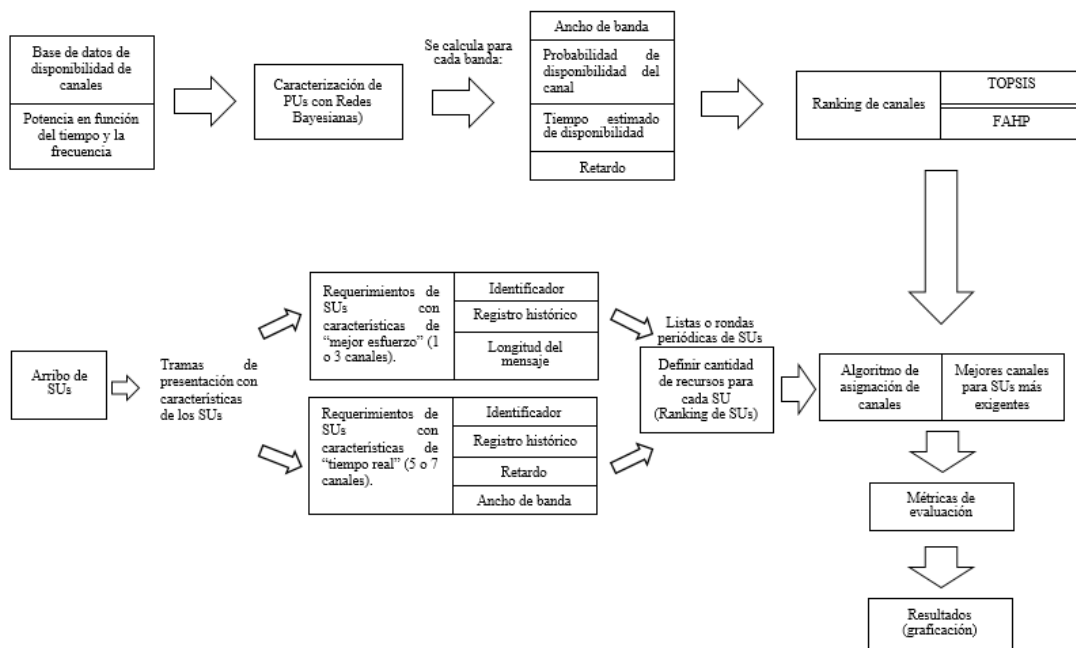


Figura 3. Diagrama a bloques para el sistema reactivo.

A partir de los datos recibidos en la trama de presentación, el sistema establecerá la prioridad de los SUs teniendo en cuenta sus requerimientos, con el fin de asignarle a cada uno y dentro de lo posible recursos suficientes. Además, se tendrá en cuenta un registro del rendimiento histórico obtenido por cada SU con el fin de que el algoritmo aplique el criterio de justicia, permitiendo el acceso a los SUs que han sido repetidamente rechazados. Una vez se ha realizado el procesamiento de canales y de SUs, se ejecuta el algoritmo de asignación de canales, que asigna los que según el ranking se consideran los mejores espectros, a los primeros nodos cognitivos del ranking de SUs.

Diagrama del sistema para la selección de canales (estrategia proactiva)

La estructura mostrada en la figura 4 difiere de la figura 3 en lo que se refiere al proceso de solicitud de los SUs en la BS, ya que la selección de canales se gestiona (o reservan) antes de que arriben las peticiones de los nodos cognitivos calculando la probabilidad de arribo del siguiente SU, como se desarrolla en López, Rivas y Pedraza (2017), con

ello se pueden generar parejas SU-canal/canales, de tal manera que cuando realmente arribe el SU, la asignación del espectro y por consiguiente el transporte de los datos se lleve a cabo en menor tiempo si se compara frente al caso reactivo, optimizando la etapa de decisión espectral.

Otra diferencia radica en la caracterización, variable que resulta importantísima ya que el éxito para el establecimiento acertado de las parejas SU-Canal va a depender del porcentaje de acierto en la predicción de *rango largo* de uso del canal por parte del PU.

Modelo de ranking para FAHP

La metodología del proceso analítico jerárquico difuso (FAHP) surge de la combinación de lógica difusa (Zadeh, 1965) con el proceso analítico jerárquico (AHP). Específicamente AHP se basa en dividir el problema (que para nuestro caso consiste en generar un ranking de canales para la selección de los mejores espectros disponibles de acuerdo a criterios de QoS) en una jerarquía (Volaric, Brajkovic y Sjekavica, 2014), utilizando valores exactos para representar la decisión de los

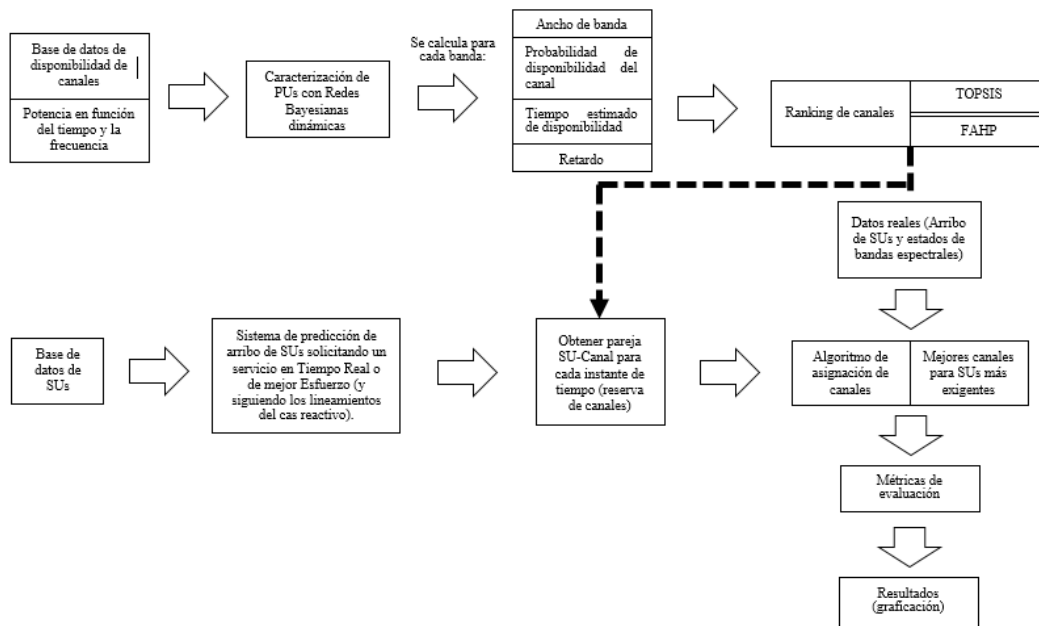


Figura 4. Diagrama a bloques para el sistema proactivo.

expertos cuando estos hacen comparaciones dos a dos. Por el contrario, FAHP introduce números difusos triangulares para hacer comparaciones y usa un método analítico para sintetizar los valores de dichas comparaciones.

En FAHP el problema también se modela a través de una jerarquía, una vez esta se construye, se procede por niveles a elaborar una matriz de comparación según la importancia relativa que un elemento tenga sobre otro. La jerarquía final para la generación del ranking para selección de mejores canales aparece en la figura 5, a partir del cual se construyó la matriz de juicios de acuerdo con lo establecido en la ecuación 1 (Mehbodniya, Kaleem, Yen y Adachi, 2012) que consiste en evaluaciones comparativas que definen el nivel de importancia relativa entre cada combinación posible de parejas de criterios, descrito de acuerdo a la ecuación (2), donde se debe tener en cuenta que la matriz está dada en términos de números difusos triangulares, aunque también puede darse como el promedio de la suma de los datos numéricos.

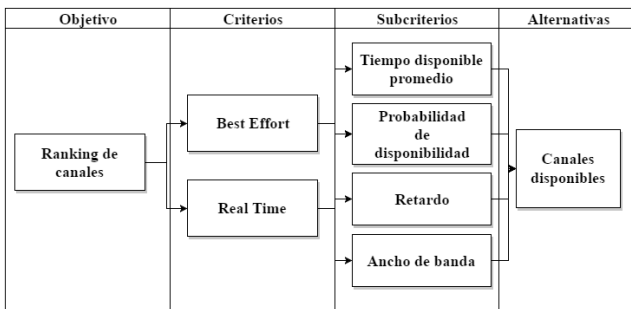


Figura 5. Jerarquía del algoritmo FAHP propuesto.

$$\tilde{A}(\tilde{a}_{ij})_{n \times n} = \tag{1}$$

$$A^P = [a_{ij}^P]_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11}^P & \dots & a_{1n}^P \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^P & \dots & a_{nn}^P \end{bmatrix} \quad P = 1, 2, \dots, t$$

donde P representa el número de “decision makers”, $i = j = 1, 2, \dots, n$ (para este caso en particular $P = 1$), y n es la cantidad de atributos.

$$\begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1, 1, 1) & \dots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & (1, 1, 1) \end{bmatrix} \tag{2}$$

donde

$$(\tilde{a}_{ij}) = [\tilde{a}_{ij}]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}}\right).$$

Para el caso particular del algoritmo, la matriz de juicios para los criterios Best Effort y Real Time se muestran en las tablas 1 y 2 en términos de valores numéricos promedio.

Como se evidencia en la tabla 1, para BE se llegó a que el retardo y el ancho de banda presentan una menor importancia relativa al comparar los datos con los de la matriz de juicios para RT (tabla 2). Esto debido a que dichas variables son menos importantes para tráfico tipo BE, pero

Tabla 1. Matriz de juicios para aplicaciones Best Effort.

Subcriterios	Tiempo de disponibilidad promedio	Probabilidad de disponibilidad	Retardo	Ancho de banda
Tiempo de disponibilidad promedio	1	0.833	0.618	0.666
Probabilidad de disponibilidad	1.2	1	0.68	0.75
Retardo	1.62	1.47	1	1.176
Ancho de banda	1.5	1.35	0.85	1

Tablas 2. Matriz de juicios para aplicaciones Real Time.

Subcriterios	Tiempo de disponibilidad promedio	Probabilidad de disponibilidad	Retardo	Ancho de banda
Tiempo de disponibilidad promedio	1	0,833	5	2
Probabilidad de disponibilidad	1.2	1	6	2.4
Retardo	0.2	0.166	1	0.4
Ancho de banda	0.5	0.4166	2.5	1

más representativos para RT. Se observa también que para el caso BE, los subcriterios con mayor importancia relativa son el tiempo promedio de disponibilidad y la probabilidad de disponibilidad, mientras que para RT los subcriterios más importantes son el retardo y el ancho de banda.

Con las matrices de juicios definidos, se calculan los pesos normalizados para cada criterio de los modelos propuestos, a partir de lo descrito en (Mehbodniya *et al.*, 2012; Chang, 1996):

El valor del *i*-ésimo objeto del análisis extendido es definido en las ecuaciones 3 y 4.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (3)$$

donde:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right) \quad (4)$$

y

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right)$$

Para obtener el vector de pesos normalizados es necesario obtener el grado de posibilidad (ecuaciones 5 y 6) de que un número difuso convexo sea mayor que *k* números difusos convexos, \tilde{S}_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$).

$$V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i) = [(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1) \wedge (\tilde{S} \geq \tilde{S}_2) \dots (\tilde{S} \geq \tilde{S}_k)] \quad (5)$$

$$V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i) = \min\{V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i)\} \quad (6)$$

donde el grado de posibilidad de que $\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2$ y que $\tilde{S}_2 \geq \tilde{S}_1$ está dado por las ecuaciones 7 y 8.

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ 0 & l_2 \geq u_1 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (7)$$

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (8)$$

Al asumir que $d'_i = \min\{V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k)\}$, el vector de pesos estaría dado por la ecuación 9.

$$w' = (d'_1, d'_2, \dots, d'_n)^T \quad (9)$$

Finalmente, se encuentra el vector de pesos no-difuso normalizado en concordancia con la ecuación 10.

$$W = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T = \left(\frac{d'_1}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \frac{d'_2}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \dots, \frac{d'_n}{\sum_{i=1}^n d'_i} \right) \quad (10)$$

A partir del procedimiento anterior se llega a que los pesos normalizados para cada criterio se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Pesos normalizados de los criterios.

Criterios	Pesos normalizados BE	Pesos normalizados RT
Tiempo de disponibilidad promedio	0.3268	0.1871
Probabilidad de disponibilidad	0.3922	0.2163
Retardo	0.0654	0.3164
Ancho de banda	0.1634	0.2801

Los pesos obtenidos, tal como se esperaba, indican que se dará mayor importancia al retardo y al ancho de banda de los canales para el ranking de tipo RT, mientras que para el ranking BE los subcriterios representativos serán la probabilidad de disponibilidad y el tiempo promedio de disponibilidad.

Para evaluar la validez del algoritmo FAHP se calculó el índice de consistencia (CI), utilizando la ecuación 11. El resultado obtenido para cada tipo de tráfico es el mostrado en la tabla 4, que es menor a 0.10, por lo que de acuerdo con Miranda (2001), el desarrollo del modelo es satisfactorio y puede ser utilizado.

$$CI = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j>1}^n (\ln a_{ij} - \ln (\frac{v_i}{v_j}))^2}}{(n-1) * (n-2)} \quad (11)$$

donde, n es el número de criterios, i el valor de la fila de la matriz de juicios, j es el valor de la columna de la matriz de juicios, a_{ij} hace referencia al valor del elemento de la fila i y la columna j de la matriz de juicios, v_i corresponde a la media geométrica de la fila i , v_j es la media geométrica de la columna j .

Tabla 4. Índices de consistencia.

Matriz de juicios	Índice de consistencia
Mejor esfuerzo	0.0018
Tiempo real	0.0017

A partir de los pesos normalizados obtenidos se desarrolló el ranking de canales calculando un

puntaje para cada espectro (ecuaciones 12 y 13) igual a la suma de sus atributos normalizados (subcriterios), cada uno multiplicado por su respectivo peso. Al ser el retardo una variable de costo en el caso de RT, es decir, que entre mayor sea el retardo, menor será la calidad del canal, se operó con signo negativo para RT, mientras que para BE se conservó el signo positivo, ya que para tráfico tipo BE el retardo no es una variable tan relevante.

$$P_{FAHP,RT} = 0.1871 * tp + 0.2163 * pd - 0.3164 * r + 0.2801 * ab \quad (12)$$

$$P_{FAHP,BE} = 0.3268 * tp + 0.3922 * pd + 0.0654 * r + 0.1634 * ab \quad (13)$$

donde: $P_{FAHP,RT}$ = puntaje FAHP para RT; $P_{FAHP,BE}$ = puntaje FAHP para BE; tp = tiempo promedio de disponibilidad; pd = probabilidad de disponibilidad; r = retardo; ab = ancho de banda.

Después de calcular el puntaje para cada canal, se organizó el ranking de canales según el puntaje de cada uno en orden descendente. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en Matlab (Matlab, 2016) para obtener el ranking de canales con FAHP se observa en la figura 6.

Modelo de ranking para topsis

La metodología llamada técnica para el orden de preferencia por similaridad a la solución ideal (Topsis) fue propuesta por Hwang y Yoon en 1987. Se usa para elegir entre un grupo de alternativas. La idea fundamental consiste en que la alternativa

seleccionada debe tener la distancia más alejada de la solución negativa ideal en el sentido geométrico (distancia euclidiana) (Tzeng y Huang, 2011). Se basa en establecer dos soluciones: la solución ideal positiva (mejor alternativa posible) y la solución ideal negativa (peor alternativa posible), y donde lo que se busca es comparar un conjunto de alternativas calculando la distancia geométrica entre cada elección y la opción ideal.

El cálculo del modelo Topsis incluye los pasos definidos en Fernández y Rodríguez (2012), Abou-El-Enien, (2013), Mahdavi, Nezam, Heidarzade y Nourifar (2008). Inicia con establecer una matriz de decisión para el ranking (tabla 5).

Tabla 5. Matriz de decisión en Topsis.

	C_1	C_2	...	C_n
A_1	d_{11}	d_{12}	...	d_{1n}
A_2	d_{21}	d_{22}	...	d_{2n}
...
A_m	d_{m1}	d_{m2}	...	d_{mn}

donde: A_i = alternativas; C_j = criterios; d_{ij} = valor que indica la calificación de la i-esima alternativa con respecto al j-esimo criterio.

En la figura 7 se muestra la matriz de decisión para algunos canales. Los criterios son los atributos de los canales (tp , pd , r y ab) y se muestran normalizados respecto al máximo valor existente de cada uno de ellos; las alternativas son los canales.

Posteriormente, se calcula la matriz normalizada de decisión. El valor normalizado n_{ij} se obtiene con la ecuación 14.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

Para el criterio de beneficio (mayor es mejor) se aplica la ecuación 15:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-} \quad (15)$$

donde $x_j^+ = \max_i x_{ij}$ (nivel deseado);
 $x_j^- = \min_i x_{ij}$ (peor nivel).

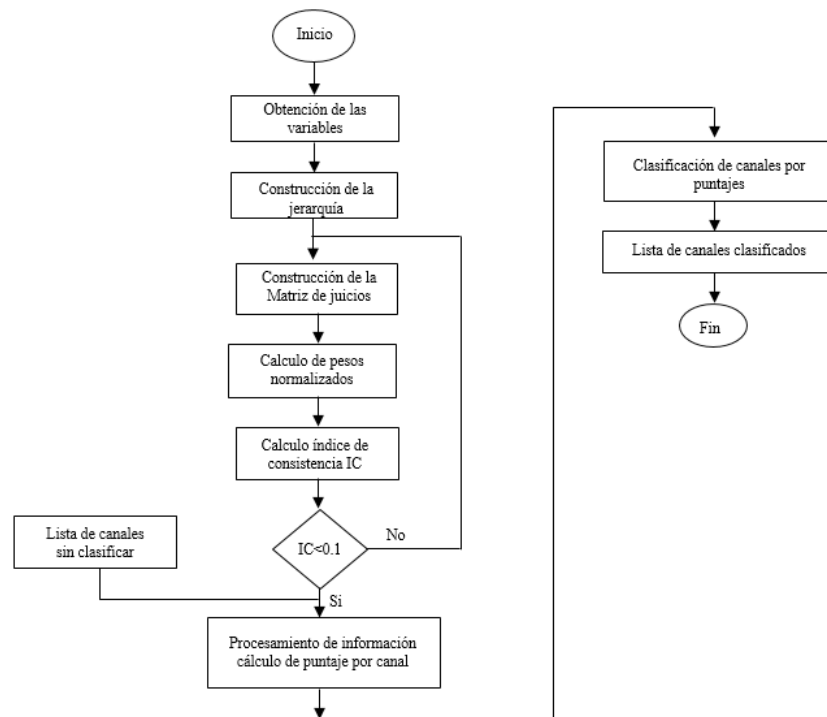


Figura 6. Diagrama de flujo para el ranking de canales en FAHP.

Para el criterio de costo (menor es mejor) se define (ecuación 16):

$$r_{ij} = \frac{x_j^- - x_{ij}}{x_j^- - x_j^*} \quad (16)$$

Luego se calculan los pesos normalizados mediante la ecuación 17.

$$S_{ij} = w_j r_{ij}; \quad i: 1, 2 \dots m, \quad j: 1, 2 \dots n \quad (17)$$

Los resultados de realizar la normalización mencionada (anteriormente) a las alternativas se muestran en la tabla 7. Se debe tener en cuenta que la normalización se hizo con la totalidad de canales o alternativas de la base de datos, que por cuestiones de espacio no se muestran todas. Por lo tanto, al aplicar la ecuación 14 únicamente a los datos de la tabla 6 los resultados no coincidirán, pues en dicha figura no se muestra la totalidad de la información operada.

Tabla 6. Matriz de decisión con algunas alternativas (canales).

Pesos BE	0.3268	0.3922	0.0654	0.1634
Pesos RT	0.1871	0.2163	0.3164	0.2801
Criterios	tp	pd	r	ab
Alternativas	0.7040	0.9240	0.8390	1.0000
	0.6850	0.9160	0.9810	1.0000
	0.7470	0.9390	0.4270	1.0000
	0.8410	0.9670	0.0540	1.0000
	0.9050	0.9830	0.7950	1.0000
	0.9290	0.9890	0.6370	1.0000
	0.9480	0.9950	0.5140	1.0000
	0.9910	0.9990	0.5740	1.0000
	0.9910	0.9980	0.3120	1.0000
	0.9640	0.9950	0.7550	1.0000
	0.8940	0.9810	0.3400	1.0000
	0.8730	0.9760	0.8920	1.0000
	0.8800	0.9750	0.3370	1.0000

Seguidamente se debe calcular el punto ideal positivo (PIS) (ecuación 18) y el punto ideal negativo (NIS) (ecuación 19):

$$A_i^+ = \{máx_i S_{ij} | j \in J_1\} \cup \{mín_i S_{ij} | j \in J_2\} \quad (18)$$

$$A_i^- = \{mín_i S_{ij} | j \in J_1\} \cup \{máx_i S_{ij} | j \in J_2\} \quad (19)$$

donde, J_1 son los atributos de beneficio y J_2 los atributos de los costos.

Aplicando el anterior criterio a la solución del problema del establecimiento del ranking en la etapa de decisión espectral en CR, se definieron las soluciones ideales positivas y negativas para el caso del servicio tipo RT y para el caso de servicio tipo BE según los valores de los parámetros o atributos de los canales (tiempo promedio de disponibilidad tp , probabilidad de disponibilidad pd , retardo r y ancho de banda ab), como sigue:

- Solución ideal positiva para BE: $tp=1, pd=1, r=1, ab=1$.
- Solución ideal positiva para RT: $tp=1, pd=1, r=0, ab=1$.
- Solución ideal negativa para BE: $tp=0, pd=0, r=0, ab=0$.
- Solución ideal negativa para RT: $tp=0, pd=0, r=1, ab=0$.

Tabla 7. Matriz de decisión normalizada con algunas alternativas (canales).

0.0826	0.0903	0.1275	0.0913
0.0803	0.0895	0.1491	0.0913
0.0876	0.0918	0.0649	0.0913
0.0986	0.0945	0.0082	0.0913
0.1062	0.0961	0.1209	0.0913
0.1090	0.0967	0.0968	0.0913
0.1112	0.0972	0.0781	0.0913
0.1162	0.0976	0.0873	0.0913
0.1162	0.0975	0.0474	0.0913
0.1131	0.0972	0.1148	0.0913
0.1049	0.0959	0.0517	0.0913
0.1024	0.0954	0.1356	0.0913
0.10302	0.0953	0.0512	0.0913

Los valores de las soluciones ideales definidas son 0 o 1 (valores mínimo y máximo) a causa de que, para realizar el ranking, todos los valores de los parámetros de los canales se deben normalizar. La solución ideal positiva para BE se estableció como [1 1 1 1], debido a que un SU con estas características buscará canales con alto tiempo de

disponibilidad, alta probabilidad de ocupación y alto ancho de banda. En vista de que los SUs con criterios BE no son tan restrictivos como en RT en términos de retardo, se consideró ideal que los SUs BE busquen siempre los canales que presenten mayor retardo; lo contrario se estableció para la solución ideal positiva en el caso RT quedando definido como [1 1 0 1]. Cabe destacar que los valores de las soluciones ideales negativas para RT y para BE son los casos contrarios a los establecidos para las soluciones positivas correspondientes.

Una vez establecidas las soluciones ideales positivas y negativas para cada caso, se calculó para cada frecuencia los valores de las distancias euclidianas a dichas soluciones (ecuaciones 20 y 21) y con estos valores se encontró la proximidad relativa (ecuación 22) (Fernández, Rodríguez, 2012; Abou-El-Enien, 2013; Mahdavi, Nezam, Heidarzade y Nourifar, 2008) a la solución ideal para cada uno de los espectros de radio frecuencia.

$$D_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n [v_{ij} - v_j^+]^2 \right)^{1/2} \quad i = 1, 2 \dots m \quad (20)$$

$$D_i^- = \left(\sum_{j=1}^n [v_{ij} - v_j^-]^2 \right)^{1/2} \quad i = 1, 2 \dots m \quad (21)$$

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i = 1, 2 \dots m \quad (22)$$

donde, $C_i^* \in [0,1]$ para todo $i = 1, 2 \dots m$.

Finalmente, el orden se puede obtener según los valores C_i^* de forma descendente del mejor al poco ideal. En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo para el algoritmo Topsis implementado.

Diagrama de flujo para la asignación de canales

El algoritmo desarrollado para la asignación del espectro disponible a los SUs que arriban a la BS en cada instante o ranura de tiempo (establecido en 290 milisegundos) se muestra a manera de diagrama de flujo en la figura 8.

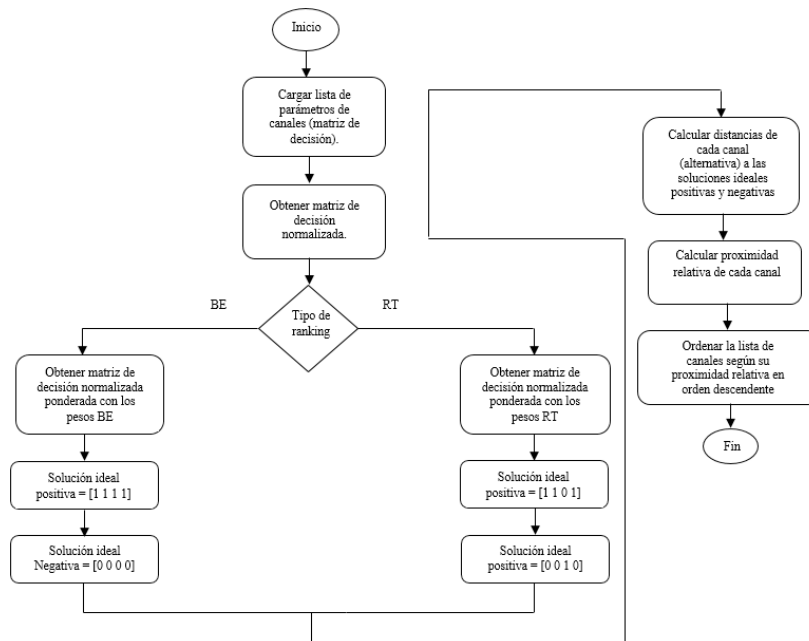


Figura 7. Diagrama de flujo para el ranking Topsis.

El sistema proactivo lleva a cabo un procedimiento similar al indicado en la figura 8, la diferencia radica en que la asignación de canales, se realiza con anticipación a la utilización del espectro disponible, mediante el uso de predicciones para el arribo de SUs a la BS y disponibilidad espectral en *rango largo*. Cabe destacar que por cuestiones de espacio no se incluye el diagrama correspondiente.

Resultados

La evaluación del sistema (figuras 9, 10 y 11) se realiza mediante la comparación en el tiempo, de las estrategias reactiva y proactiva para las métricas: tiempo de computo (definida como el tiempo que tarda el sistema en procesar las solicitudes y asignar canales libres); probabilidad de éxito (que es la razón entre la cantidad de transmisiones

exitosas y la cantidad total de intentos de transmisión); probabilidad de éxito RT y probabilidad de éxito BE (similar a la anterior variable, pero aplicado individualmente a flujos tipo RT y BE).

Error de retardo (que representa el exceso de retardo que se le tuvo que otorgar a los SUs que lograron transmitir respecto al retardo esperado por cada uno); error de asignación (valor absoluto de la diferencia entre la cantidad de canales solicitados por el SU y los que realmente se le asignaron; transmisiones exitosas (es la cantidad de envíos que se llevaron a cabo satisfactoriamente, independientemente del tipo de transmisión o de la longitud de la misma); throughput (tasa de información efectiva enviada por unidad de tiempo).

Índice de Jain, métrica utilizada para medir la justicia o equitatividad de un sistema (Jain, Chiu y Hawe, 1984), colisiones (se relaciona con la cantidad de transmisiones interrumpidas).

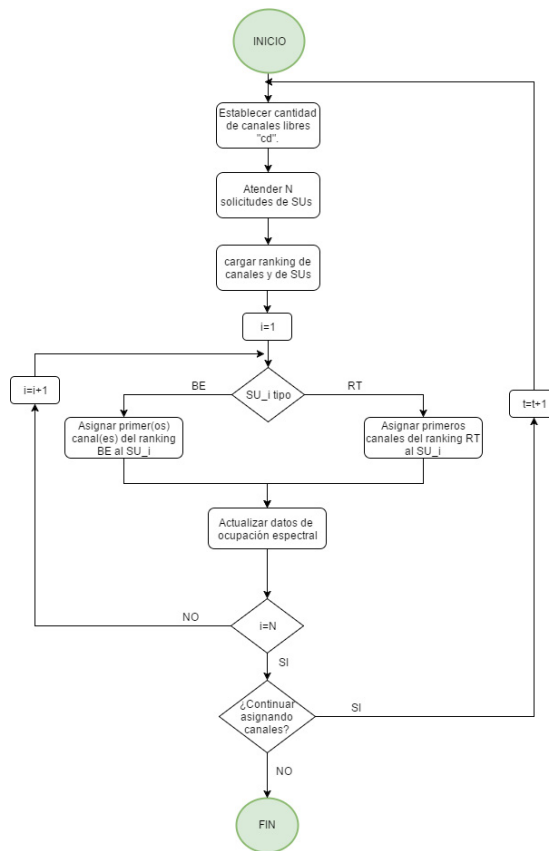


Figura 8. Diagrama de flujo para la asignación de canales (caso reactivo).

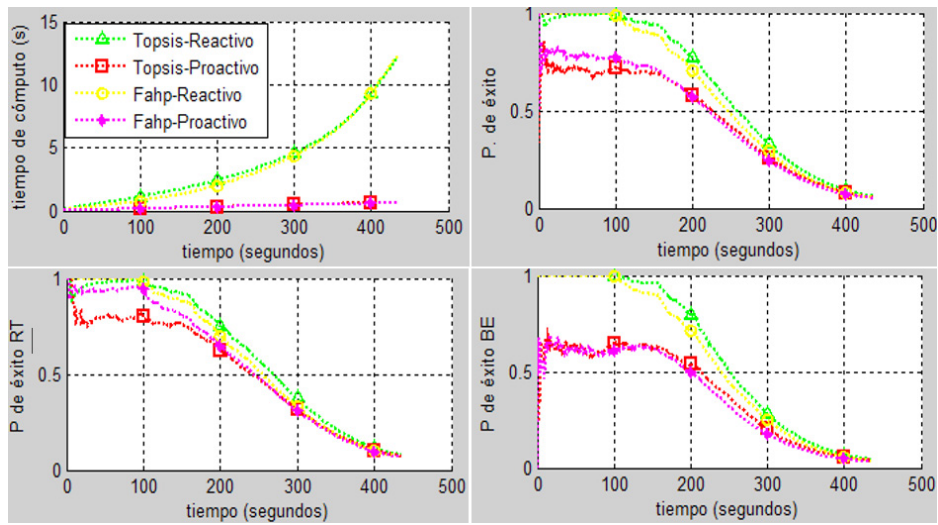


Figura 9. Métricas de evaluación de los sistemas.

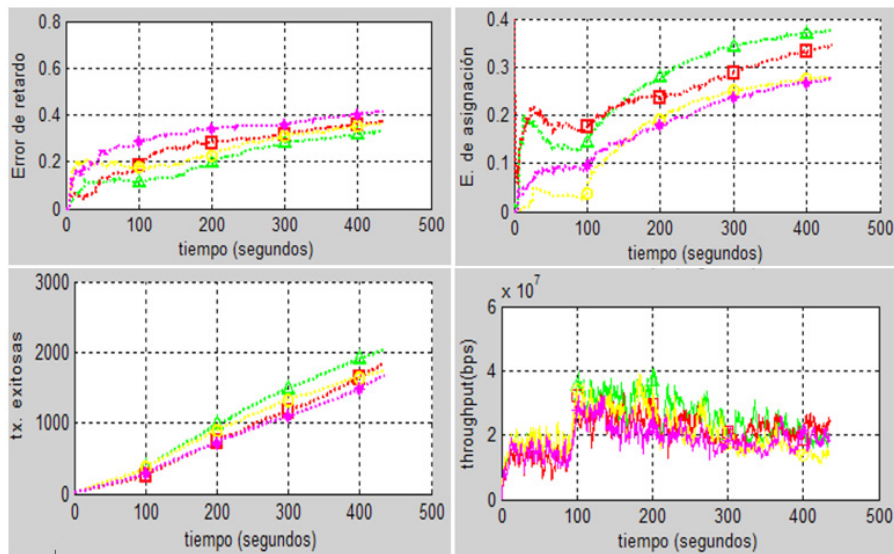


Figura 10. Métricas de evaluación de los sistemas.

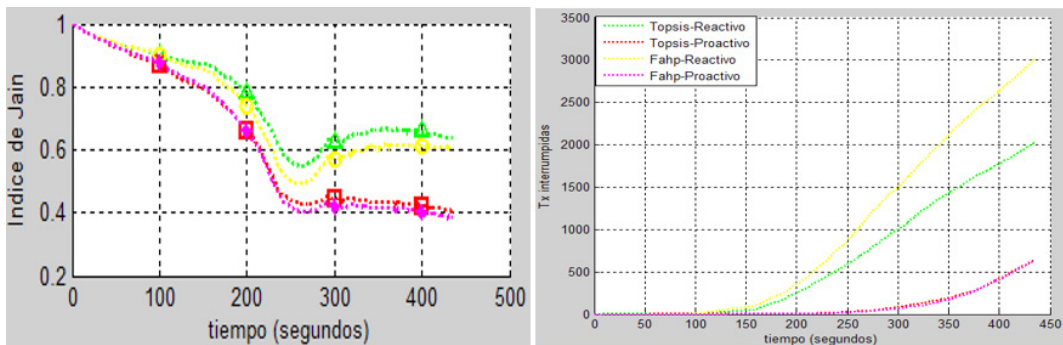


Figura 11. Métricas de evaluación de los sistemas.

Conclusiones

De los resultados de la figura 9, teniendo en cuenta que la caracterización de los PUs para GSM tuvo una efectividad promedio del 80 % y que el cálculo en el acierto de la probabilidad de arribo de SUs está ubicado en igual proporción, se demuestra que la utilización de una estrategia proactiva es más eficiente en tiempo de procesamiento en la BS que la reactiva, pudiendo optimizar la etapa de selección de canales en redes inalámbricas de RC.

De la figura 10, el error de asignación de canales a los SUs presenta un mejor desempeño para la estrategia proactiva, debido a que previo al arribo de las solicitudes cognitivas se puede llegar a negociar las características de los canales que se utilizará durante la transferencia de flujos de información.

El índice de Jain presenta un mejor comportamiento en el caso reactivo, ya que dentro del algoritmo se incluye un registro histórico de la medida de satisfacción de uso de la red para cada SU, con el fin de que la asignación de recursos sea más equitativa; criterio que no fue posible implementar en el sistema proactivo por la misma naturaleza de procesamiento de los SUs en la BS.

Desde el punto de vista de las metodologías utilizadas (FAHP y Topsis), bajo las condiciones establecidas en el artículo y para flujos de datos GSM presenta un mejor desempeño Topsis para las métricas valoradas.

Referencias

- Abou-El-Enien, T. (2013). *TOPSIS Algorithms for Multiple Objectives Decision Making: Large Scale Programming Approach*. Alemania: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Chang, D-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655.
- Federal Communications Commission. (2010). *Spectrum policy task force report*. Tech. Rep. ET Docket 02-155. Recuperado de: http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/bpaside/documents/webpage/bpa_048826.pdf
- Fernández, M. y Rodríguez, F. (2012). *Análisis comparativo de técnicas de generación eléctrica; AHP Y TOPSIS fuzzificado*. Recuperado de: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2963/pfc4430.pdf?sequence=1>.
- García, A., López, D. y Rivas, E. (2016). Evaluation of Efficiency Techniques for Spectrum Decision Making in Cognitive Radio Wireless Networks. *Journal of Engineering and Applied Science*, 11(12), 2729-2739.
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201-220.
- Hernández, C. (2016). *Modelo adaptativo de handoff spectral para la mejora en el desempeño de la movilidad en redes móviles de radio cognitiva* (tesis de doctorado). Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Jain, K., Chiu, W. y Hawe, W. (1984). A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation and shared computer system. Obtenido de <http://www.cse.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf>.
- López, D., Ordoñez, J. y Rivas, E. (2016). User Characterization through Dynamic Bayesian Networks in Cognitive Radio Wireless Networks. *International Journal of Engineering*, 8(4), 1771-1783.
- López, D., Rivas, E. y Pedraza, L. (2017). Estimating SUs Arrival for Channel Selection in Cognitive Radio. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(7), 2159-2162.
- Mahdavi, I., Nezam, M-A., Heidarzade, A. y Nourifar, R. (2008). Designing a model of fuzzy TOPSIS in multiple criteria decision making, *Applied Mathematics and Computation*, 2016(2), 607-617.
- Matlab, productos. (2016). *MathWorks*. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

- Mehbodniya, A., Kaleem, F., Yen, K. y Adachi, F. (2012). *A fuzzy MADM ranking approach for vertical mobility in next generation hybrid networks*. Ponencia presentada en el 4th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), ST Petersburg, pp. 262-267.
- Miranda, E. (2001). Improve subjective estimates using paired comparison. *Journal IEEE Software*, 18, 87-91.
- Mitola, J. (1999). *Software radios - survey, critical evaluation and future directions*. Ponencia presentada en Proceedings of the National Telesystems Conference (NTC 1992), 13/15–13/23, Washington D.C, EE.UU.
- QinetiQ. (2016). *Cognitive Radio Technology-A study for OFCOM*. Vol. 2. Recuperado de: https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0021/35841/cograd_app1.pdf?lang=eolubadbs.
- Taher, T., Bacchus, R., Zdunek, K. y Robertson, D. (2011). *Long-term spectral occupancy findings in Chicago*. Ponencia presentada en IEEE International Symposium Dynamic Spectrum Access Networks, Aachen, Germany.
- Tzeng, G. y Huang, J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Volaric, T., Brajkovic, E. y Sjekavica, T. (2014). FAHP and TOPSIS methods for the selection of appropriate multimedia application for learning and teaching. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science*, 8, 224-232.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

