

EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO PARA SELECCIÓN DE OPORTUNIDADES ESPECTRALES EN REDES INALÁMBRICAS COGNITIVAS

EVALUATION OF AN ALGORITHM FOR THE SELECTION OF SPECTRAL OPPORTUNITIES IN COGNITIVE WIRELESS NETWORKS

Resumen: Las redes de radio cognitiva son una alternativa para mitigar la saturación del espectro radioeléctrico en algunas bandas de frecuencia, a través de una asignación espectral dinámica, donde el usuario secundario aprovecha de forma oportunista los canales de frecuencia libres de la banda licenciada del usuario primario. En el presente artículo se desarrolla un algoritmo para seleccionar los canales de frecuencia libres u oportunidades espectrales en una red de radio cognitiva, basado en el método de Colonia de Abejas Artificiales. La evaluación del algoritmo propuesto se realiza a través de simulaciones que incorporan el comportamiento real del usuario primario, utilizando trazas de ocupación espectral reales, obtenidas a través de la monitorización del espectro con la técnica de detección de energía, y teniendo como criterios de evaluación, el tiempo de ejecución y el número de handoffs fallidos. Los resultados evidencian una reducción del 62% en los tiempos de ejecución y del 36% en el número de handoffs fallidos, al pasar de una población de colonia de abejas de 50 a 450.

Palabras clave: Asignación espectral, espectro radioeléctrico, inteligencia de enjambre, ocupación espectral, radio cognitiva, redes inalámbricas.

Abstract: The cognitive radio networks are an alternative to mitigate the saturation of the radio spectrum in some frequency bands, through a dynamic spectral assignment, where the secondary user opportunistically takes advantage of the free frequency channels of the licensed band of the primary user. In the present article an algorithm is developed to select free frequency channels or spectral

opportunities in a cognitive radio network, based on the Artificial Bee Colony method. The evaluation of the proposed algorithm is carried out through simulations that incorporate the real behavior of the primary user, using real spectral occupancy traces, obtained through the spectrum monitoring with the energy detection technique, and having as evaluation criteria, the execution time and the number of failed handoffs. The results show a reduction of 62% in the execution times and 36% in the number of failed handoffs, when going from a bee colony population of 50 to 450.

Key Words: Spectral assignment, radioelectric spectrum, swarm intelligence, spectral occupation, cognitive radio, wireless networks.

1. Introducción

Actualmente se evidencia un uso ineficiente del espectro radioeléctrico, en donde algunas bandas de frecuencia son prácticamente inutilizadas o infrautilizadas mientras que otras se usan ampliamente hasta llegar al borde de su capacidad, cómo lo muestran los resultados arrojados por campañas de medición de ocupación del espectro realizados en países de la Unión Europea y Estados Unidos en dónde se obtienen valores de ocupación espectral del 15% al 80% [1]. Gracias a esto, algunas entidades como la FCC (Federal Communications Commission) han comenzado a regular el nivel de ocupación espectral buscando mantener la calidad y funcionamiento de las redes inalámbricas dentro de un rango que no afecte la satisfacción de los usuarios.

El concepto de radio cognitiva nace como respuesta a la problemática referenciada anteriormente, buscando darle un uso más eficiente al espectro radioeléctrico por medio de una asignación espectral dinámica que se ajuste a los cambios en tiempo real que se dan en una red de comunicaciones. En una red de radio cognitiva existen dos tipos de usuarios: primarios y secundarios, los usuarios primarios o PU son quienes tienen un contrato con la empresa prestadora del servicio de comunicaciones y pagan

por usar una banda de frecuencia, por otro lado, los usuarios secundarios (SU) son quienes usan una banda de frecuencia que le corresponde a un PU de manera oportunista para comunicarse. El uso oportunista se refiere a que un SU puede establecer comunicación mientras el PU no requiera usar la banda de frecuencia que le corresponde, y cuando el PU requiera de su uso, el SU debe retirarse y buscar una nueva frecuencia para continuar su comunicación [2].

El cambio de frecuencia o “salto” que efectúa el SU mencionado en el proceso anterior se denomina handoff espectral. Pueden existir dos situaciones cuando se realiza un handoff espectral: uno, el caso en el que la nueva frecuencia esté disponible obteniendo un handoff exitoso, y otro, el caso en el que la nueva frecuencia esté ocupada obteniendo un handoff fallido. Cuando se obtiene un handoff exitoso el SU utiliza la frecuencia hallada para continuar su comunicación sin ningún inconveniente mientras que cuando se obtiene un handoff fallido debe continuar con la búsqueda de canales hasta encontrar uno libre y obtener un handoff exitoso.

Existen varias definiciones para radio cognitiva, una de ellas se muestra a continuación, la cual se presenta en [3], cuyo autor es la Unión Internacional de Telecomunicaciones: “Una radio o sistema que detecta y es consciente de su entorno de operación y en consecuencia puede ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros de operación.”

Teniendo en cuenta la definición anterior se pueden determinar los requerimientos de un modelo de asignación espectral para radio cognitiva: el modelo debe ajustarse a los cambios de la ocupación del espectro partiendo de datos medidos y debe ser capaz de seleccionar por sí mismo las bandas de frecuencia entre las alternativas disponibles para establecer la comunicación de un SU teniendo en cuenta criterios de operación definidos inicialmente, razón por la cual, el presente artículo propone un algoritmo de optimización basado en la inteligencia de enjambre.

El presente artículo tiene por objetivo proponer y evaluar un algoritmo para selección de oportunidades espectrales en redes inalámbricas cognitivas, basado en la inteligencia de enjambre a través del método de Colonia de Abejas Artificiales. El algoritmo propuesto será evaluado a partir de simulaciones realizadas con datos de ocupación espectral reales capturado en una campaña de medición realizada en la ciudad de Bogotá en un proyecto de investigación previo. Las métricas de evaluación utilizadas son el tiempo de procesamiento del algoritmo y el número de cambios de canal (handoff espectral) fallidos.

2. Trabajos relacionados

A continuación, se presentan las publicaciones más relevantes que sirvieron como base para el desarrollo y concepción de la presente investigación.

En [4], se describen los temas relevantes de la radio cognitiva y en especial de la movilidad espectral, se analizan los parámetros y factores que intervienen en el handoff espectral, los cuales se deben tener en cuenta para el desarrollo de cualquier algoritmo de decisión espectral, tales como: causas, requerimientos, impacto, clasificaciones, tipos de enfoque, criterios de control y criterios de evaluación. Lo anterior se tuvo en cuenta para desarrollar el algoritmo propuesto en el presente artículo.

En [5] se presenta la propuesta de un algoritmo híbrido multicriterio para la asignación de espectro en redes de radio cognitiva basado en los algoritmos Analytical Hierarchical Process (AHP) y Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution (VIKOR), se compara su rendimiento con respecto al algoritmo Grey Relational Analysis (GRA) y una asignación de espectro aleatoria (Random). Las métricas de evaluación utilizadas fueron el número acumulado de handoff fallidos, el número acumulado de handoff totales, el promedio de ancho de banda, el retardo promedio acumulado y el throughput promedio acumulado. Su funcionamiento se basa en usar el AHP para darle una jerarquía

a los diferentes criterios de evaluación, así como encontrar el peso que tendrán cada una de sus configuraciones, seguidamente el algoritmo VIKOR decide cuales oportunidades espectrales son las mejores.

En [6], se describe el desarrollo y prueba de una red de radio cognitiva experimental, conformada por: (1) un controlador cognitivo quien recolecta y procesa los datos obtenidos, se utiliza para tal fin una computadora; (2) dos ruteadores cognitivos quienes simulan la función de usuarios secundarios y dentro de los cuales uno de ellos actúa como maestro conectado directamente al controlador cognitivo y a la etapa de detección espectral, la cual se realiza con un RDS (radio definido por software). El otro ruteador actúa con un rol de esclavo; y (3) un usuario primario simulado por otro RDS. En dicha publicación también se presenta el algoritmo aplicado para la detección y asignación espectral de dicha red experimental. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en el sentido que la comunicación de los SU se mantuvo en presencia del PU aunque como era de esperarse, con una disminución en el rendimiento.

3. Metodología

El desarrollo de la siguiente investigación tuvo como punto de partida los datos de ocupación espectral obtenidos a partir de la monitorización del espectro, con ellos se midió el rendimiento del algoritmo propuesto para dos niveles de ocupación (alto y bajo). Para diseñar el algoritmo se realizó una adaptación del algoritmo ABC (Artificial Bee Colony), que basado en su mecanismo de búsqueda de posibles soluciones, sus resultados puedan ser aplicados a los requerimientos de las redes de radio cognitiva, como la selección de oportunidades espectrales en las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico que se encuentran libres para establecer comunicación. Al obtener los canales se procede a evaluar el desempeño del algoritmo.

3.1 Datos de ocupación espectral

Los datos de ocupación espectral capturados en una campaña de medición previa, se utilizaron para evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto. Para realizar la captura de los datos de ocupación espectral se utilizó la técnica de detección de energía, a partir de la cual se construyó una matriz de potencias. Posteriormente, se definió a partir de la probabilidad de falsa alarma, el umbral de decisión para determinar la ocupación o disponibilidad de cada canal de frecuencia monitorizado, determinando la matriz de disponibilidad.

Luego de un análisis estadístico de la matriz de disponibilidad, se determinaron dos trazas de ocupación espectral con niveles de ocupación alto y bajo, respectivamente, las cuales se dividieron a su vez en 50% para el entrenamiento del algoritmo propuesto y 50% para su evaluación.

4. Algoritmo ABC propuesto

El algoritmo a implementar debe caracterizarse por darle varias opciones de frecuencia a los usuarios secundarios para que puedan establecer comunicación y éstas opciones deben adaptarse a los cambios que tenga el espectro radioeléctrico manifestado a través de la ocupación por usuarios primarios. Teniendo lo anterior en cuenta se piensa en adaptar el algoritmo Artificial Bee Colony ABC, el cual es un algoritmo de inteligencia de enjambre que simula el comportamiento de una colonia de abejas en el proceso de búsqueda de fuentes de alimento.

En el algoritmo ABC existen tres grupos de abejas: empleadas, observadoras y exploradoras, cada fuente de alimento representa una posible solución, el número de abejas empleadas es igual al número de abejas empleadas y tiene los siguientes parámetros de entrada [7]:

- Población de abejas observadoras o empleadas SN
- Número de ciclos a repetir el algoritmo MCN

- Límite de intentos para explotar una fuente de alimento L
- Rango en el que se encuentra la solución $[z_{min} z_{max}]$

La función de cada grupo de abejas tiene una estrecha correlación en el proceso de búsqueda de alimento y se explica a continuación. En un primer momento, se encuentran las primeras fuentes de alimento z_j con la ecuación (1), que serán visitadas por el grupo de abejas empleadas, quienes se encargan de buscar nuevas fuentes cercanas w_j y seleccionar la mejor fuente encontrada con la ecuación (2), cuando se posicionan en una fuente específica, califican cada fuente con un valor de aptitud s_j y comunican esta información mediante una danza a las abejas observadoras que se encuentran en las cercanías.

$$z_j = z_{min} + rand(0,1)(z_{max} - z_{min}) \quad (1)$$

$$Con j \in [1,2,3,4 \dots SN]$$

$$w_j = z_j + \phi_j(z_j - z_k) \quad (2)$$

$$Con j \neq k \text{ y } \phi_j \text{ número real aleatorio entre } [-1, 1]$$

Con la información obtenida, las abejas observadoras eligen las mejores fuentes de alimento para explotarlas, teniendo como criterio de selección la probabilidad P_i calculada con la ecuación (3). Luego de explotar las primeras fuentes de alimento se repite la búsqueda, comparación y selección entre las nuevas w_j con antiguas z_j por las empleadas, así como una nueva selección y explotación por las observadoras teniendo como base la información de las empleadas. Si una fuente de alimento en la que se encuentra una abeja empleada no es seleccionada por una observadora después de L intentos, la empleada de dicha fuente se convierte en una abeja exploradora y encuentra una fuente de alimento nueva utilizando la ecuación (1). Este proceso se repite hasta encontrar una solución aceptable o hasta que se cumpla el número de ciclos MCN especificado inicialmente.

$$s_j \rightarrow f(z_j)$$

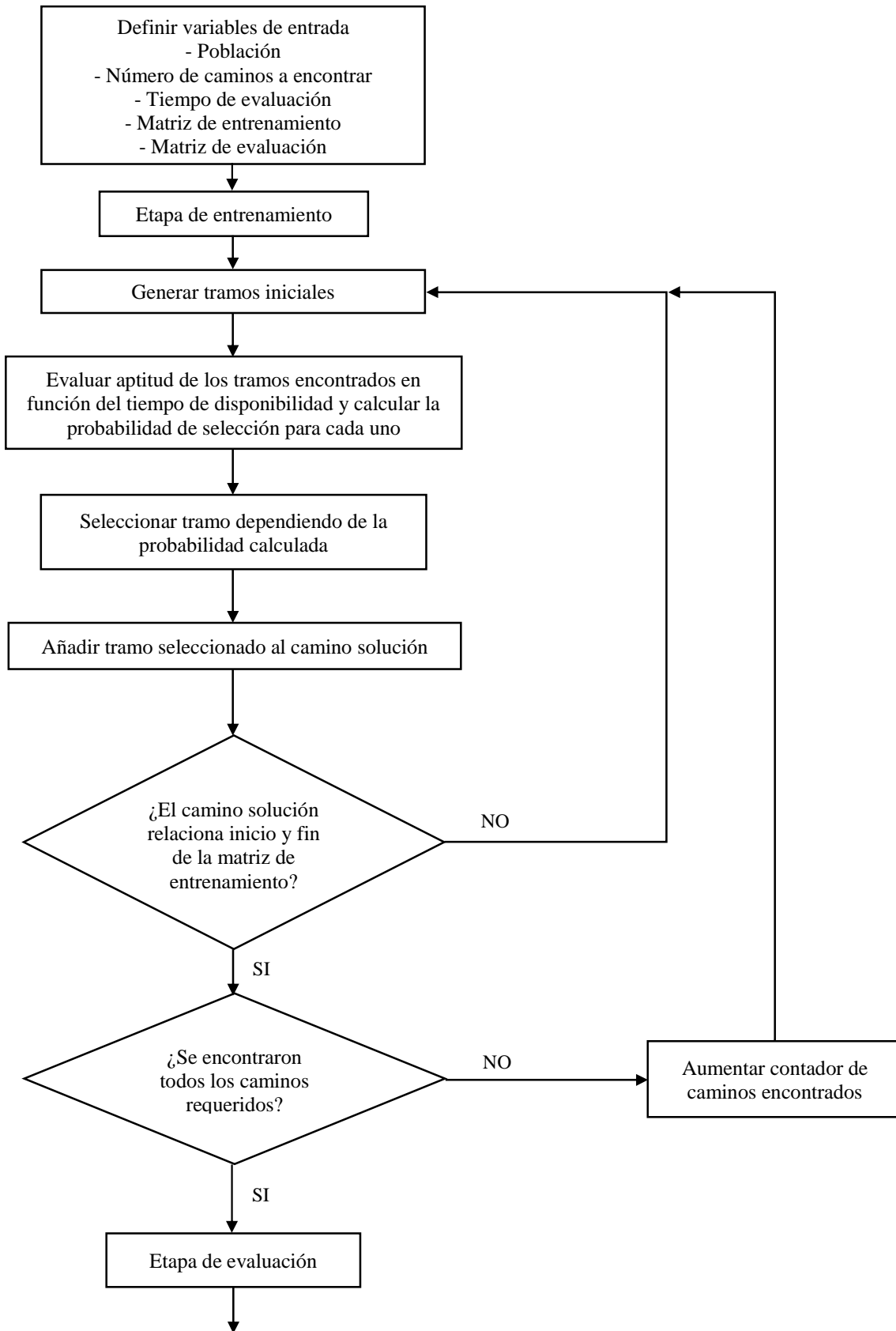
$$P_j = \frac{s_j}{\sum_{n=1}^{SN} s_j} \quad (3)$$

El algoritmo propuesto consta de dos fases: entrenamiento y evaluación. El funcionamiento de la etapa de entrenamiento se basa en el algoritmo ABC en la búsqueda de tramos de frecuencia libres con los que se construyen “camino” que se utilizarán en la etapa de evaluación, la caracterización de aptitud para la comparación de dichos tramos será con base en su tiempo de disponibilidad, buscando tiempos de disponibilidad más prolongados.

En la etapa de evaluación se simula la introducción de un usuario secundario dentro de una red de comunicaciones, quien intenta establecer comunicación en las bandas de frecuencia de los caminos encontrados en la etapa de entrenamiento, en el caso donde dicha frecuencia se encuentre ocupada se intenta establecer comunicación en las bandas de frecuencia de los restantes caminos solución hallados anteriormente hasta encontrar una disponible.

5. Pseudocódigo

La Figura 1 describe el diagrama de flujo del comportamiento del algoritmo propuesto.



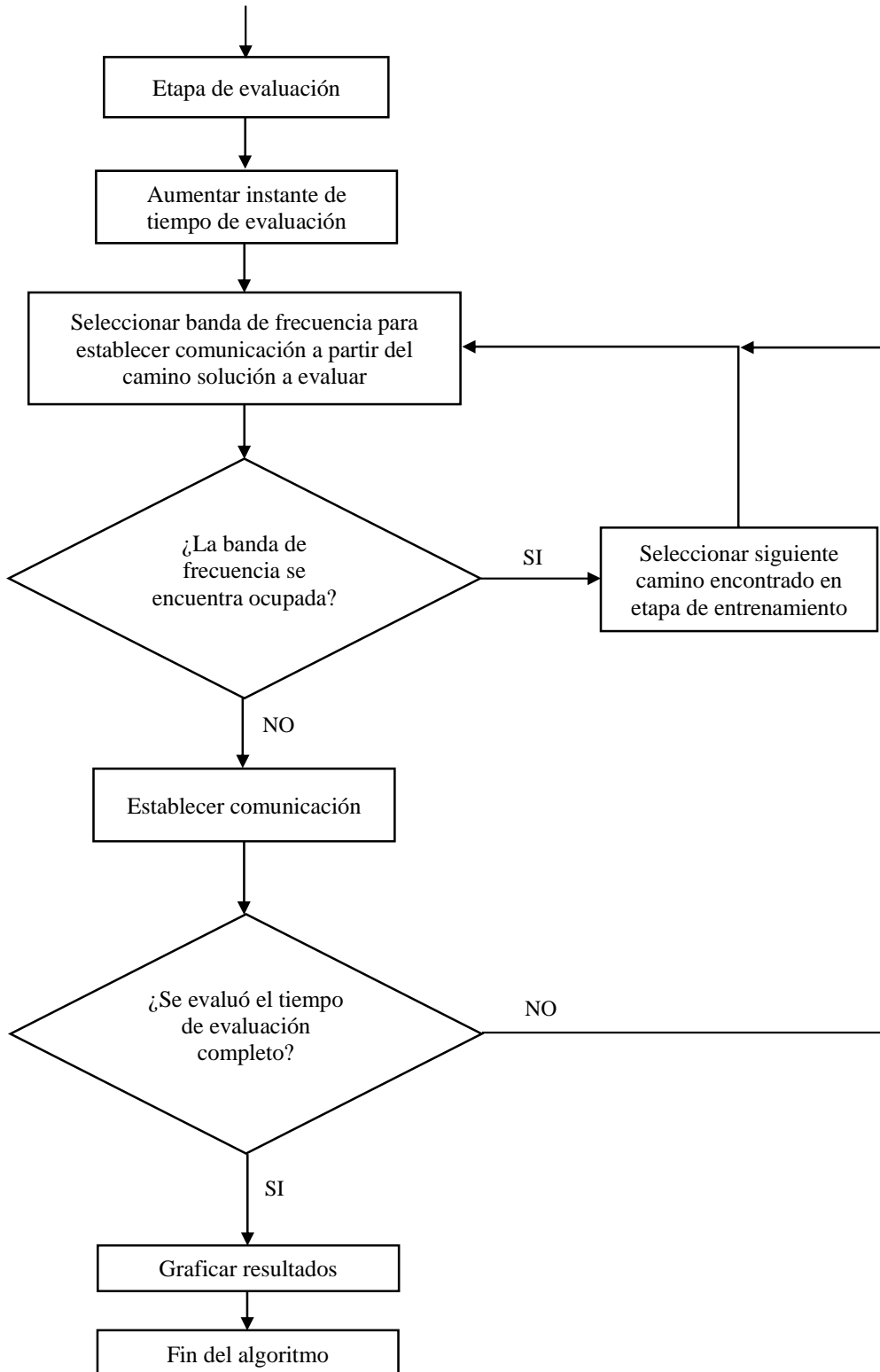


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto. Fuente: elaboración propia de los autores

6. Métricas de evaluación

Se evaluará el rendimiento del algoritmo propuesto con base en los resultados de handoffs fallidos y tiempo de ejecución para diferentes valores de población de abejas y para dos valores de ocupación espectral (o niveles de tráfico): alto y bajo, el objetivo es determinar la influencia de la población en los diferentes resultados para tener criterios de selección de este parámetro y utilizarlos en investigaciones futuras.

7. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos para handoffs fallidos en dos niveles de tráfico: tráfico alto y tráfico bajo evaluando el método propuesto para distintos valores de población de la colonia de abejas: 50, 150, 250, 350 y 450 correspondientes a la Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6 respectivamente. Se realizaron 5 ejecuciones del algoritmo para cada número de población y se muestra el promedio de resultados en la Tabla 1. Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores., se realiza de esta manera para tener un panorama claro del comportamiento del algoritmo.

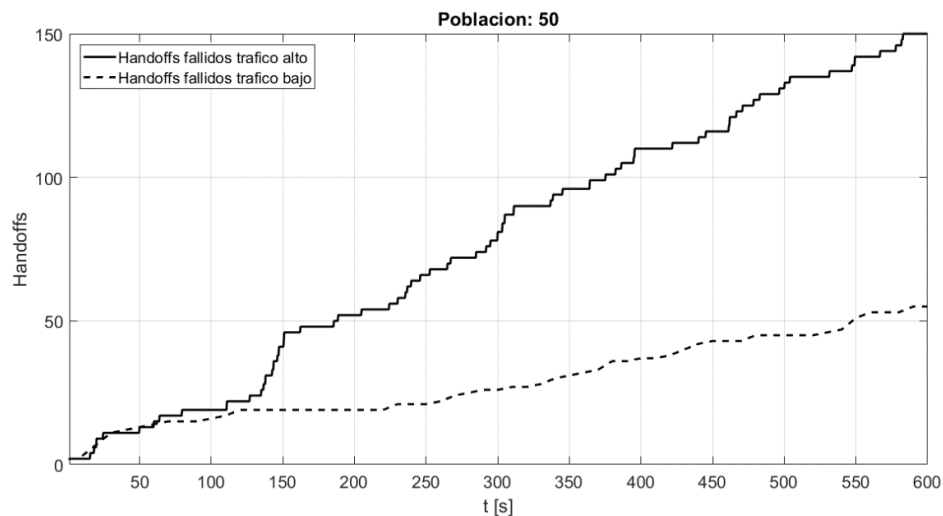


Figura 2. Resultados método propuesto para una población de 50. Fuente: elaboración propia de los autores

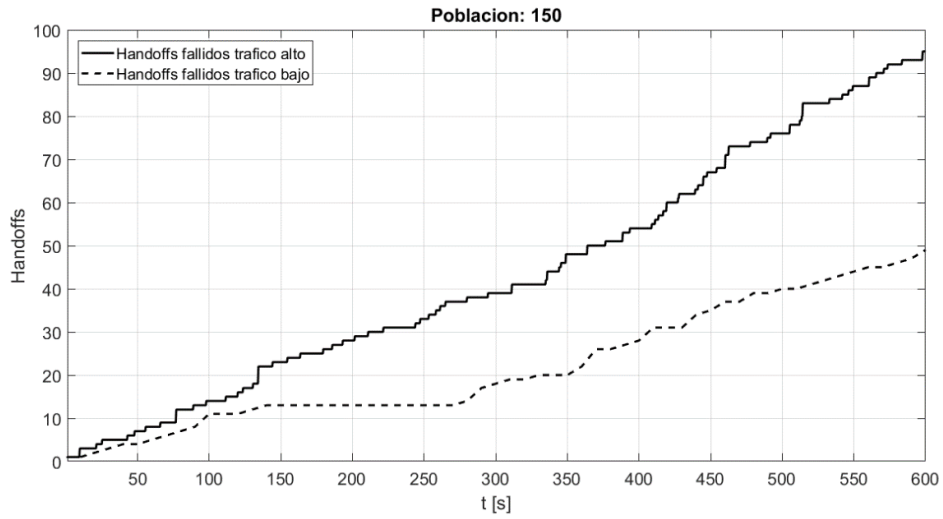


Figura 3. Resultados método propuesto para una población de 150. Fuente: elaboración propia de los autores.

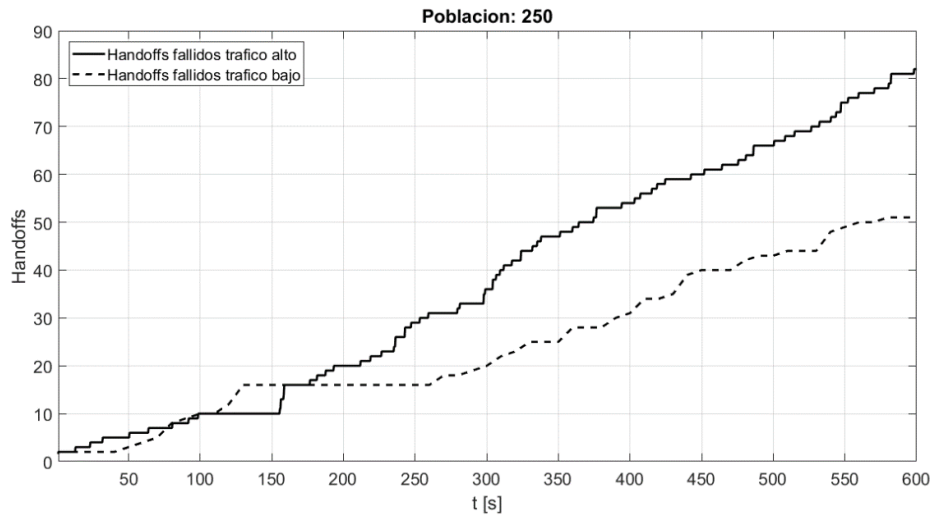


Figura 4. Resultados método propuesto para una población de 250. Fuente: elaboración propia de los autores.

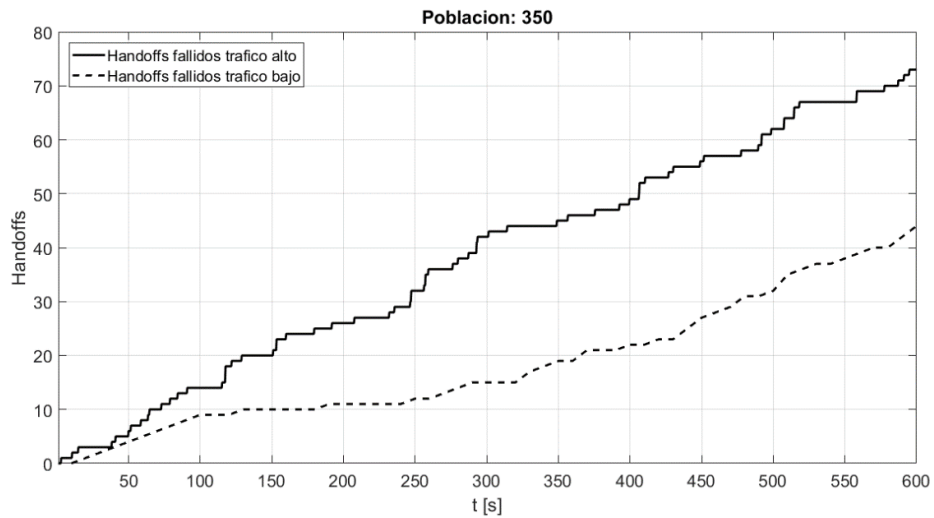


Figura 5. Resultados método propuesto para una población de 350. Fuente: elaboración propia de los autores.

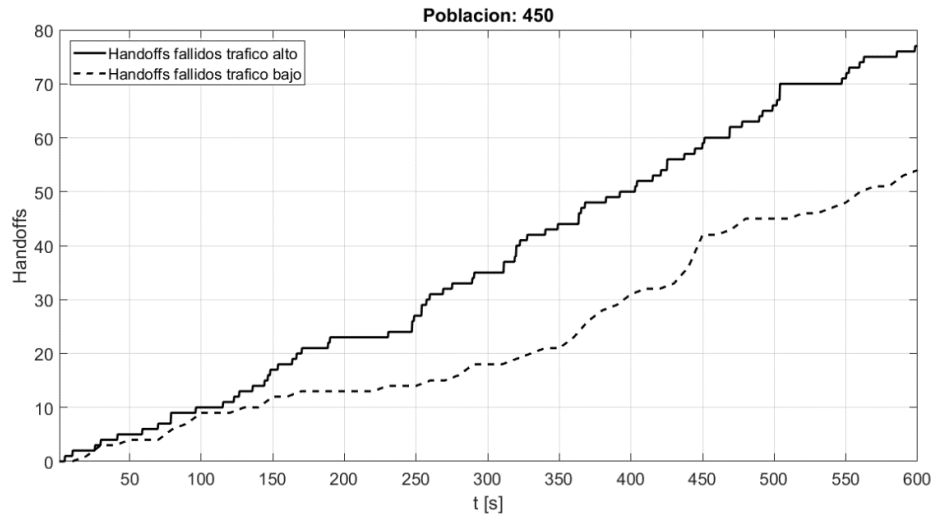


Figura 6. Resultados método propuesto para una población de 450. Fuente: elaboración propia de los autores

El resumen del promedio de los resultados para 5 ejecuciones de cada población se muestra la Tabla 1.

Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores.:

Población	Handoffs fallidos		Tiempo de ejecución [s]
	Tráfico alto	Tráfico bajo	
50	122	65	269
150	94	57	158
250	82	56	123
350	76	47	104
450	78	52	102

Tabla 1. Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores.

Se encuentra que en niveles de tráfico bajo la ocupación espectral es menor y se tiene un mayor tiempo de disponibilidad de los canales, razón por la que se tiene un menor número de handoffs fallidos, en contraste con los handoffs fallidos para niveles de tráfico alto donde existe una mayor ocupación espectral y por ende se debe realizar una mayor búsqueda de frecuencias libres, como lo muestra la Tabla 1. Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores., para niveles de tráfico bajo se obtienen hasta 65 handoffs fallidos mientras que para niveles de tráfico alto se obtienen hasta 122 handoffs fallidos. También se encuentra que para ambos niveles de tráfico existe una disminución de handoffs fallidos conforme se aumenta el tamaño de la población, volviendo a la Tabla 1. Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores., para una población de 50

individuos se tienen 122 y 65 handoffs fallidos para los dos niveles de tráfico y para una población de 350 individuos se tienen 76 y 47 handoffs fallidos.

El siguiente criterio de evaluación propuesto es el tiempo de ejecución del algoritmo para cada número de población, se muestran los resultados en la Tabla 1. Resumen promedio de resultados obtenidos. Fuente: elaboración propia de los autores., y en la Tabla 2. Porcentaje de participación del tiempo de ejecución para cada población. Fuente: elaboración propia de los autores

se realiza una comparación entre el tiempo de ejecución y el tiempo de evaluación con el fin de determinar la viabilidad del método y encontrar el número de población más eficiente, se buscan menores porcentajes de participación que significan mayor rendimiento. Para un tiempo de evaluación de 10 minutos se encuentra que la población más eficiente es 450, con una participación de 17.1%, seguida por las poblaciones 350, 250, 150 con una participación de 17.3%, 20.5% y 26.4%, finalmente, la población menos eficiente es 50 con una participación de 44.8%.

Población	Tiempo de ejecución [s]	Tiempo de evaluación [s]	% Participación
50	269.1	600	44.8%
150	158.2	600	26.4%
250	122.7	600	20.5%
350	104.0	600	17.3%
450	102.4	600	17.1%

Tabla 2. Porcentaje de participación del tiempo de ejecución para cada población. Fuente: elaboración propia de los autores

8. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se encuentra una tendencia de disminución del tiempo de ejecución conforme se aumenta el tamaño de población, siguiendo los resultados de la Tabla 2. Porcentaje de participación del tiempo de ejecución para cada población. Fuente: elaboración propia de los autores

, el tiempo de ejecución máximo (269.1 segundos) se presenta con el valor mínimo de población (50 individuos) y disminuye a medida que se aumenta la población hasta llegar al menor tiempo de ejecución (102.4 segundos) para el valor máximo de población (450 individuos), esto se puede atribuir al hecho de que cada abeja dentro del algoritmo representa un posible solución, y al existir más opciones de selección el algoritmo encuentra los tramos de tiempo de disponibilidad de manera más eficiente.

La población que presenta un mejor rendimiento teniendo en cuenta los dos criterios de evaluación: tiempo de ejecución y handoffs fallidos es la de 350. Vale la pena mencionar que una población de 450 arroja resultados muy similares de tiempo de ejecución (102.4 segundos) pero con un mayor número de handoffs fallidos, razón por la cual se opta por la población de 350.

De los resultados y el funcionamiento del algoritmo también se puede establecer que no se debe asignar un valor muy elevado de población ya que podría resultar en una búsqueda excesiva y ser contraproducente en el sentido de que aumentaría el tiempo de ejecución. Teniendo todo lo anterior en mente, se concluye que el tamaño de la población con la que se ejecuta el algoritmo depende del tiempo de evaluación requerido y hay que ser cuidadoso de no darle un valor ni muy pequeño ni muy elevado.

Referencias

- [1] J. Aguilar Rentería y A. Navarro Cadavid, «Radio cognitiva – Estado del arte,» *Revista Sistemas y Telemática*, 2011.
- [2] C. A. Hernández Suarez, I. P. Páez Parra y D. A. Giral Ramírez, Modelo adaptativo multivariable de handoff espectral para incrementar el desempeño en redes de radio cognitiva, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [3] F. Casadevall Palacio y I. Perejil Sabaté, Implementación de terminales de Radio Cognitiva en la banda de TV, Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, 2016.

- [4] C. Hernández, L. Pedraza, I. Páez y E. Rodríguez, «Análisis de la Movilidad Espectral en Redes de Radio Cognitiva,» *Información Tecnológica*, 2015.
- [5] C. Hernández, I. Páez y D. Giral, «Modelo AHP-VIKOR para handoff espectral en redes de radio cognitiva,» *Tecnura*, 2015.
- [6] D. Carrillo, F. Mathilde, R. Yoshimura y J. Bazzo, «Red Experimental Cognitiva: Algoritmos y Resultados,» *IEEE*, 2013.
- [7] D. Karaboga y B. Basturk, «Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems,» *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 789-795, 2007.
- [8] C. Sánchez López, Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: l' Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, 2016.
- [9] J. E. Ponce Pinos, Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico y análisis de factibilidad de uso de radio cognitiva en la banda UHF (450 – 512 MHz) Para su optimización en la ciudad de Riobamba, Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2019.
- [10] C. Peng Lim, L. Jain y S. Dehuri, *Innovations in Swarm Intelligence*, India: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [11] L. F. Pedraza, F. Forero y I. P. Paez, «Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia,» *Ingeniería y Ciencia*, pp. 127-143, 2014.
- [12] L. Pedraza, D. Lopez y O. Salcedo, «Enrutamiento basado en el algoritmo de Dijkstra para una red de radio cognitiva,» *Tecnura*, 2011.
- [13] J. C. Ordoñez, Caracterización de usuarios primarios para la implementación de un modelo predictor para la toma de decisiones en redes inalámbricas de radio cognitiva, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [14] F. R. Narvárez Romero, Diseño de un detector de energía para señales de radio FM en radio cognitiva, Loja: Universidad Nacional de Loja, 2016.
- [15] A. F. Mejía Ardila, Análisis de ocupación de canales para redes de Radio Cognitiva en el espectro de señales GSM durante un periodo de seis meses, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [16] H. R. Márquez Ramos, «Arquitecturas de radio cognitiva: Una revisión actual,» *Tecnura*, 2014.
- [17] S. Gómez, F. Mera y M. Schneeberger, *Radios Cognitivos y Sensado del Espectro Radioeléctrico*, Montevideo: Universidad de La Republica, 2014.
- [18] R. Bordón López y S. Montejo Sánchez, «La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio,» *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, pp. 42-55, 2015.

