

## AHP-TOPSIS para el diseño de redes de sensores inalámbrica con topología tipo clúster con nodos sensores en tierra y nodo sumideros instalado en un vehículo aéreo no tripulado.

## AHP-TOPSIS for the design of wireless sensor networks in a cluster topology with sensor nodes on the ground and a sink node installed in an unmanned aerial vehicle.

\*Luis Camargo<sup>1</sup>, Maira Gasca, Luis Castrillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. en Ciencias mención gerencia, [lcamargoa@unimagdalena.edu.co](mailto:lcamargoa@unimagdalena.edu.co), ORCID: 0000-0002-7956-441X, Universidad del Magdalena, Colombia.

<sup>2</sup> Ph.D. en Ciencias mención gerencia, [magasca@uan.edu.co](mailto:magasca@uan.edu.co), ORCID: 0000-0003-0801-1161, Universidad Antonio Nariño, Colombia.

<sup>3</sup> Ing. en Electrónica, [luiscastrillojf@unimagdalena.edu.co](mailto:luiscastrillojf@unimagdalena.edu.co), ORCID: 0000-0003-3312-351X, Universidad del Magdalena, Colombia.

**Como citar:** L. Camargo, M. Gasca, L.Castrillo, “AHP-TOPSIS para el diseño de redes de sensores inalámbrica con topología tipo clúster con nodos sensores en tierra y nodo sumideros instalado en un vehículo aéreo no tripulado”, *Respuestas*, vol. 26, no. 2 35- 47, 2021.

Recibido: Octubre 27, 2020; Aprobado: Marzo 8, 2021

### RESUMEN

#### Palabras Claves:

Redes de sensores inalámbricos,  
AHP,  
TOPSIS,  
Líder del clúster,  
VANT

Las redes inalámbricas de sensores regularmente están formadas por numerosos nodos con baja capacidad de energía, comunicación, procesamiento y almacenamiento. El diseño de estas redes presenta desafíos relacionados con el consumo energético, latencia y modo de recolección de la información. La configuración de los nodos en clústeres y el uso de vehículo aéreo no tripulado como nodo recolector mejora el rendimiento energético de la red y facilita la recopilación de los datos. Sin embargo, se requiere de la selección de un nodo líder de clúster que concentre los datos recolectados por los otros nodos y los envíe al equipo móvil en el aire. El objetivo de este trabajo consiste en la selección del nodo líder de clúster que optimice el rendimiento de la red. Para la selección se aplica métodos de toma de decisiones multicriterio. Primero se emplea el proceso analítico jerárquico para identificar la prioridad de los criterios empleados en la toma de decisión. Posteriormente, se emplea la técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal para la selección del nodo líder. Como resultado se obtiene el vector de prioridades de los criterios: energía residual 56.51%; nivel de intensidad de señal recibida 27.2%, energía empleada en la transmisión 10.38%, y número de nodos vecinos 5.91%. Además, se propone el algoritmo para optimizar la selección del nodo líder en el clúster.

\*Corresponding author.

E-mail address: [lcamargoa@unimagdalena.edu.co](mailto:lcamargoa@unimagdalena.edu.co) (Luis Camargo)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santande  
This is an article under the license CC BY 4.0

**ABSTRACT****Palabras Claves:**

WSN,  
AHP,  
TOPSIS,  
Cluster Head,  
UAV

Wireless sensor networks regularly consist of numerous nodes with low energy, communication, processing and storage capacity. The design of these networks presents challenges related to energy consumption, latency and data collection mode. The configuration of nodes in clusters and the use of unmanned aerial vehicle as a collector node improves the energy efficiency of the network and facilitates data collection. However, it requires the selection of a cluster leader node that concentrates the data collected by the other nodes and forwards it to the mobile equipment in the air. The objective of this work is to select the cluster leader node that optimizes the network performance. Multi-criteria decision making methods are applied for the selection. First, the hierarchical analytical process is used to identify the priority of the criteria used in the decision making process. Subsequently, the technique for the order of preference by similarity with the ideal solution is used for the selection of the leading node. As a result, the vector of priorities of the criteria is obtained: residual energy 56.51%; received signal strength level 27.2%, energy used in transmission 10.38%, and number of neighboring nodes 5.91%. In addition, the algorithm to optimize the selection of the leader node in the cluster is proposed.

**Introducción**

Las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Network, WSN) se usan frecuentemente para monitorear los parámetros ambientales de un área amplia. Estas redes allanan el camino para el desarrollo de Internet de las cosas (Internet of Things, IoT). Las WSN centran sus esfuerzos en la conexión de las máquinas sensitivas haciendo uso óptimo de los recursos, e IoT representa una infraestructura que permite ofrecer Teleservicios avanzados y globales, gracias a la interoperabilidad de diferentes tecnologías, incluyendo las WSN [1, 2].

Estas redes normalmente están formadas por varios nodos sensores y un nodo sumidero o puerta (Gateway). El nodo sumidero es el encargado de conectar la WSN con otras redes, y también puede actuar como nodo sensor. Los nodos sensores tienen la capacidad de medir variables, almacenar y enviar datos, además de reenviar datos de otros nodos sensores [3]. Estos nodos se componen de sensores y o traductores, unidad de procesamiento, y un sistema de comunicación. Estas partes regularmente se encuentran embebidos en una sola placa electrónica y en la mayoría de los casos no están conectados a la red eléctrica requiriendo fuente de alimentación, restringiendo la vida útil del nodo y de la red. Adicionalmente la electrónica usada en estos dispositivos tiene limitación en cuanto a procesamiento, almacenamiento y comunicación [4].

Los principales problemas que se consideran en el diseño de una WSN son: la vida útil de la red que depende de la fuente de alimentación de los nodos; la forma de recolectar los datos si hay desplegados muchos nodos en una gran extensión de tierra; y el retraso en la transmisión si requiere de muchos saltos o retransmisiones antes de llegar a la puerta [5].

La WSN con nodos configurados en una topología red tipo malla que hacen uso de protocolos de enrutamiento de múltiples saltos para controlar la mejor ruta que debe seguir cada trama de datos que se envíe desde un nodo sensor hacia un nodo sumidero, dan solución al tema de los retardos [6]. Pero, esto desfavorece en gran medida la vida útil de la red, debido a que los nodos sensores que se encuentran cercanos al sumidero o aquellos que se encargan de múltiples retransmisiones consumen más energía que aquellos que se encuentran en el borde de la red [7].

El uso de nodos sumideros en movimiento mejora el rendimiento de la red al evitar algunas retransmisiones al acercarse en algún instante el nodo puerta a los nodos sensores [8]. Con esto se puede alcanzar un consumo uniforme de energía de los nodos sensores, prolongando el tiempo de funcionamiento de la red [9]. Los Ve-

hículos Aéreos no Tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) con su capacidad para acceder a terrenos difíciles representa una alternativa para implementar nodos sumideros móviles en estos [10]. En WSN con número pequeña de nodos, un UAV actuando como sumidero puede comunicarse con cada uno de los nodos sensores de la red [11]. Mientras que para redes a gran escala se debe emplear otra metodología para recolectar información, ya que sobrevolar todos los nodos sensores en una red densa, implica más tiempo de vuelo, más distancia recorrida y un alto consumo de energía por parte del UAV haciendo poco eficiente esta alternativa. La problemática anterior puede ser solucionada con la implementación de un enfoque denominado Clustering [12]. Este consiste en la creación de grupos de nodos sensores y la elección de una cabeza de grupo o Clúster Head (CH) [13], quien es el encargado de comunicarse con el nodo sumidero o puerta, para retransmitir la información recolectada por su clúster [14]. En nuestro caso de estudio se evitaría los grandes recorridos que debería dar el UAV con el nodo sumidero debido que solo debe sobrevolar los CH.

Existen diversos protocolos o algoritmos para generar los Clúster y la selección del CH en una red como el protocolo LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), el cual mejora la eficiencia energética de una red mediante la fusión del enrutamiento basado en clúster con el acceso al medio y las aplicaciones de recolección de datos [15]; el protocolo HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) en el que se toma en cuenta la energía residual del nodo, así como un segundo parámetro, bien sea la proximidad entre nodos o el grado del nodo para la selección del CH, para conseguir aumentar el tiempo de vida de la red, y obtener clústeres más balanceado con la capacidad de soportar la escalabilidad de la red en el tiempo [16]; el protocolo rHEED el cual es una mejora para el protocolo HEED presenta un algoritmo optimizado para la creación de clústeres en una red donde un UAV actúa como nodo sumidero, y en el que, además de los parámetros antes mencionados en el método HEED, también tomaron en cuenta el RSSI de la señal enviada desde el UAV y recibida por el nodo, con lo cual lograron aumentar la cobertura en la red y se observó una mejora en la eficiencia del consumo energético [17]; y el protocolo EEHC (Energy Efficient Heterogeneous Clustering scheme) que tiene como objetivo generar clústeres en una red heterogénea -donde los nodos cuentan con características diferentes- teniendo en cuenta la energía residual de cada nodo para realizar la mejor elección del CH [18].

La elección de Cluster Head se presenta como un problema de toma de decisiones, ya que al tener un grupo de alternativas se debe escoger la más adecuada. Para este caso los nodos candidatos a CH. Es así como en la literatura se encuentran trabajos en los que se utilizan métodos de toma de decisiones de múltiples criterios para llevar a cabo la selección del CH, Métodos como AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) son utilizados para estos.

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) es utilizado para determinar de forma sencilla y ordenada, cuáles son los criterios más favorables para la selección de la mejor alternativa a través del porcentaje de prioridad que se le asigne a cada criterio. Criterios como estado de energía solar, balance de energía de la red, relación señal a ruido (SNR) y probabilidad de interrupción de la señal. El método Fuzzy-TOPSIS también puede ser empleado para realizar la selección del CH. El método TOPSIS puede definir una alternativa ideal y una alternativa anti-ideal, y la selección de las mejores alternativas se realiza partiendo de una solución compromiso, la cual debe tener la distancia euclidiana más alejada de la alternativa anti-ideal y la distancia euclidiana más corta de la alternativa ideal. Esto se realiza a partir de la consideración de criterios como energía residual, tasa de consumo de energía del nodo, número de vecinos del nodo, promedio de la distancia entre vecinos y distancia desde el nodo sumidero [19].

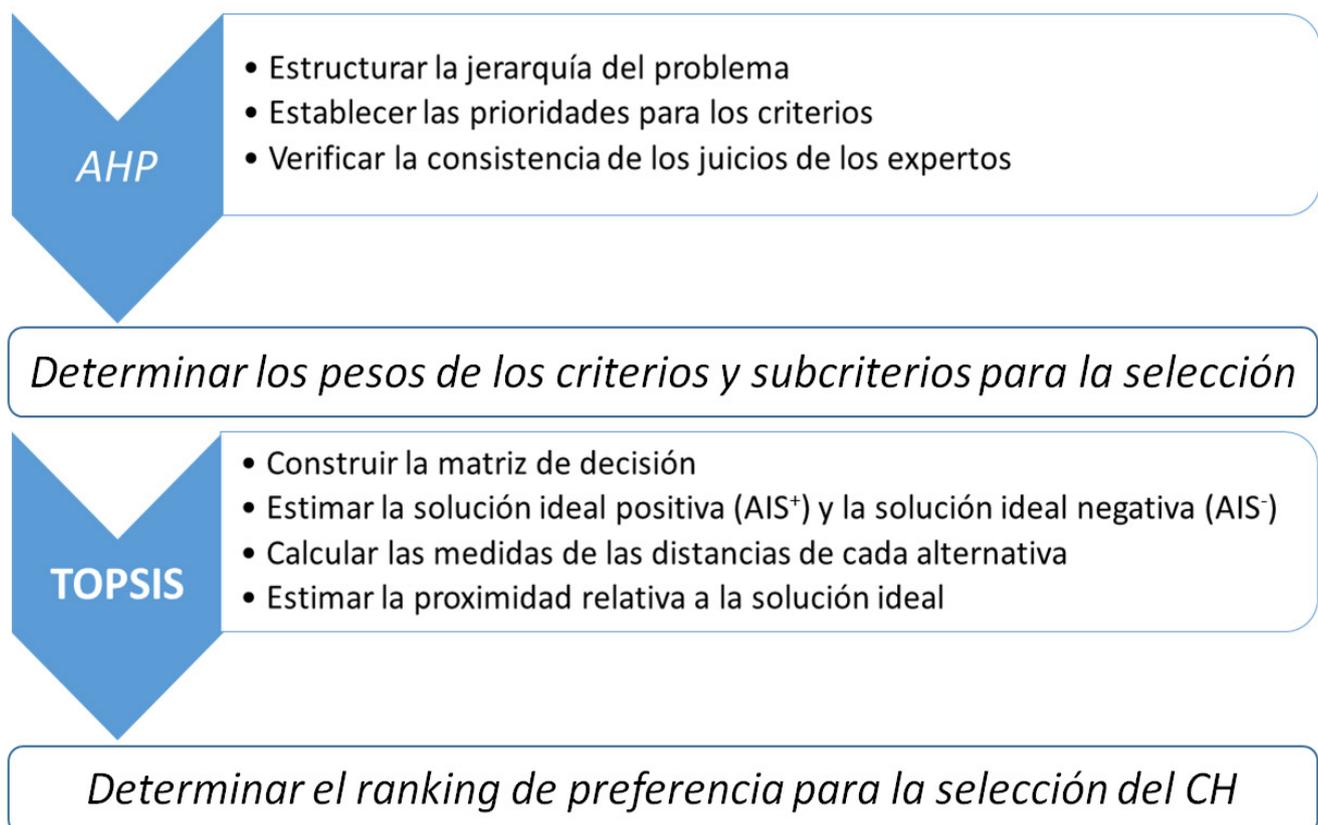
En el presente estudio se emplea los métodos de toma de decisiones multicriterio con el objetivo de plasmar

un algoritmo que permita realizar la selección del clúster cabeza de un grupo de nodos sensores. Nodo que se conecte a un nodo sumidero en UAV. Se utiliza el método AHP para determinar los pesos o porcentaje de prioridad de cada criterio, los cuales son Energía Residual del Nodo, Costo de la Transmisión, RSSI y el Número de vecinos. Luego, para el desarrollo del algoritmo se plantea utilizar como base el método TOPSIS para llevar a cabo la selección del CH, teniendo en cuenta los valores de preferencia de los nodos candidatos que se obtengan a través de la implementación del método.

Los resultados obtenidos pueden ser aplicados a cualquier tecnología de WSN independiente del protocolo y la frecuencia de operación. Tecnologías o módulos como Xbee, LoRa, LoRaBee, Z-Wave, entre otros.

## Materiales y Métodos

La metodología implementada incluye dos fases. La primera corresponde a la aplicación del método AHP para determinar los pesos o porcentaje prioridad de los criterios y subcriterios. Mientras que en la otra fase es utilizado el método TOPSIS como base para el diseño del algoritmo que permita la selección del CH a partir de los pesos obtenidos por el método AHP, y las preferencias que este método arroja como resultado [20]. El diseño metodológico se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Diseño metodológico de la investigación

### Determinar los pesos de los criterios y subcriterios con AHP

Para llevar a cabo esta fase se realiza el siguiente procedimiento:

- Estructurar la jerarquía del problema.

Se ubica el objetivo en la parte superior de la estructura jerárquica. Lo siguiente sería ubicar los criterios en un nivel debajo del objetivo. Por último, en la parte inferior de la jerarquía irían las alternativas. Sin embargo, ese nivel se ignora por ahora, ya que no es el objetivo de esta fase seleccionar una de las alternativas [21].

- Establecer las prioridades para los criterios.

El objetivo de este paso es establecer la forma de asignarle un valor numérico que denote la prioridad de cada criterio de acuerdo con la información brindada por los expertos. La manera de asignar dichos valores es a través del desarrollo de una matriz de comparación pareada en la que el experto compara los criterios por pares (de dos en dos), tomando como base la escala fundamental de Saaty, la cual se presenta en la tabla I [22].

**Tabla I.** Escala fundamental de Saaty

| Clasificación numérica | Definición   |
|------------------------|--|
| 1                      | X es igual de importante que Y   |
| 3                      | X es ligeramente más importante que Y  |
| 5                      | X es fuertemente más importante que Y  |
| 7                      | X es muy fuertemente más importante que Y  |
| 9                      | X es extremadamente más importante que Y   |
| 2,4,6,8                | Valores intermedios  |
| Recíprocos             | Si X tiene a importancia respecto a Y, entonces: X frente a Y es a Y frente a X es 1/a (recíproco) |

**Fuente:** Adaptado de [22].

La matriz de comparación pareada estaría compuesta por términos  $a_{xy}$  ( $w_x/w_y$ ) resultado de la comparación entre los criterios X y y, como se aprecia en la ecuación 1. Luego, se calcula el vector propio de la matriz A, el cual corresponde al vector de prioridades o de pesos de los criterios, que se denota como  $w = [w_1, w_2, \dots, w_j]$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ a_{12} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{12}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

- Verificar la consistencia de los juicios de los expertos.

Para esto se calcula el Índice de Consistencia CI, el cual se calcula mediante la ecuación 2. Donde  $\lambda_{max}$  es el auto valor dominante de la matriz de comparación pareada A. Además, se verifican los valores de CI realizando una comparación entre este y el Índice de Consistencia Aleatorio, RI, el cual está definido como la media de diferentes CI calculados luego de numerosas matrices con entradas aleatorias y sus valores se representan en la tabla II. La relación entre CI y RI está definida como relación de consistencia, CR, ( $CR = CI/RI$ ). Es así como se concluye que cuando CR sea menor a 0.1 (10%) los resultados son consistentes, de lo contrario, si CR es mayor que 0.1 existe inconsistencia y los resultados se deben revisar [21, 22]

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Tabla II. Valores de RI

|    |   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| RI | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.49 |

Fuente: Adaptado de [23].

### Determinar el ranking de preferencia para la selección del CH.

Para esta fase se tiene en cuenta que cada nodo sensor de la WSN envía la información de cada subcriterio a sus vecinos a través de baliza, por lo tanto, cada nodo sensor tiene una lista de los valores de los subcriterios que cada nodo vecino le notifique.

Para el desarrollo de esta etapa se realiza los siguientes pasos:

- Construir la matriz de decisión.

Para cada nodo sensor la matriz de decisión debe contener los pesos globales de los subcriterios, y los valores de los subcriterios que cada vecino le notifique. Del mismo modo, la matriz contiene los valores de los subcriterios del propio nodo sensor para poder realizar una comparación entre él y sus vecinos. La forma de la matriz se puede apreciar en la tabla III. Donde  $j = 1, \dots, n$  denota los subcriterios e  $i = 1, \dots, m$  las alternativas o nodos candidatos a CH.

|                   |                 |                 |      |                 |
|-------------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|
|                   | C <sub>1</sub>  | C <sub>2</sub>  | ---- | C <sub>j</sub>  |
| Peso              | W <sub>1</sub>  | W <sub>2</sub>  | ---- | W <sub>j</sub>  |
| Nodo <sub>1</sub> | X <sub>11</sub> | X <sub>12</sub> | ---- | X <sub>1j</sub> |
| Nodo <sub>2</sub> | X <sub>21</sub> | X <sub>22</sub> | ---- | X <sub>2j</sub> |
| ⋮                 | ⋮               | ⋮               | ⋮    | ⋮               |
| Nodo <sub>i</sub> | X <sub>i1</sub> | X <sub>i2</sub> | ---- | X <sub>ij</sub> |

Fuente: Autores.

Posteriormente, se normaliza la matriz de decisión aplicando la ecuación 4 a cada elemento de tabla III. El resultado de esta normalización se puede apreciar en la tabla IV.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (4)$$

**Tabla IV.** Matriz de decisión normalizada

|                   | C <sub>1</sub>  | C <sub>2</sub>  | ---- | C <sub>j</sub>  |
|-------------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|
| <b>Peso</b>       | W <sub>1</sub>  | W <sub>2</sub>  | ---- | W <sub>j</sub>  |
| Nodo <sub>1</sub> | n <sub>11</sub> | n <sub>12</sub> | ---- | n <sub>1j</sub> |
| Nodo <sub>2</sub> | n <sub>21</sub> | n <sub>22</sub> | ---- | n <sub>2j</sub> |
| ⋮                 | ⋮               | ⋮               | ⋮    | ⋮               |
| Nodo <sub>i</sub> | n <sub>i1</sub> | n <sub>i2</sub> | ---- | n <sub>ij</sub> |

**Fuente:** Autores.

Para finalizar se construye la matriz de decisión normalizada ponderada. Esto se realiza aplicando la ecuación 5 a cada elemento de la tabla IV.

$$P_{ij} = w_j \times n_{ij} \quad (5)$$

**Tabla V.** Matriz de decisión normalizada y ponderada

|                   | C <sub>1</sub>  | C <sub>2</sub>  | ---- | C <sub>j</sub>  |
|-------------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|
| Nodo <sub>1</sub> | P <sub>11</sub> | P <sub>12</sub> | ---- | P <sub>1j</sub> |
| Nodo <sub>2</sub> | P <sub>21</sub> | P <sub>22</sub> | ---- | P <sub>2j</sub> |
| ⋮                 | ⋮               | ⋮               | ⋮    | ⋮               |
| Nodo <sub>i</sub> | P <sub>i1</sub> | P <sub>i2</sub> | ---- | P <sub>ij</sub> |

**Fuente:** Autores.

- Estimar la solución ideal positiva (AIS<sup>+</sup>) y la solución ideal negativa (AIS<sup>-</sup>)

La solución ideal positiva está representada como el vector  $AIS^+ = [A_1^+, A_2^+, \dots, A_j^+]$ . Donde  $A_j^+$  es el valor máximo de los  $P_{ij}$  del subcriterio  $C_j$ .

La solución ideal negativa AIS<sup>-</sup> está representada como el vector  $AIS^- = [A_1^-, A_2^-, \dots, A_j^-]$ . Donde  $A_j^-$  es el valor mínimo de los  $P_{ij}$  del subcriterio  $C_j$ .

- Calcular las medidas de las distancias de cada alternativa:

Para este paso se emplean las ecuaciones 6 y 7; obteniendo como resultado la tabla VI

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_{ij} - A_j^+)^2} \quad (6)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_{ij} - A_j^-)^2} \quad (7)$$

**Tabla VI.** Matriz de distancias positivas y negativas

|                   | Distancia ideal positiva | Distancia ideal negativa |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nodo <sub>1</sub> | $d_1^+$                  | $d_1^-$                  |
| Nodo <sub>2</sub> | $d_2^+$                  | $d_2^-$                  |
| ⋮                 | ⋮                        | ⋮                        |
| Nodo <sub>i</sub> | $d_i^+$                  | $d_i^-$                  |

Fuente: Autores.

- Estimar la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa se calcula a partir de la tabla VI usando la ecuación 8.

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ - d_i^-} \quad (8)$$

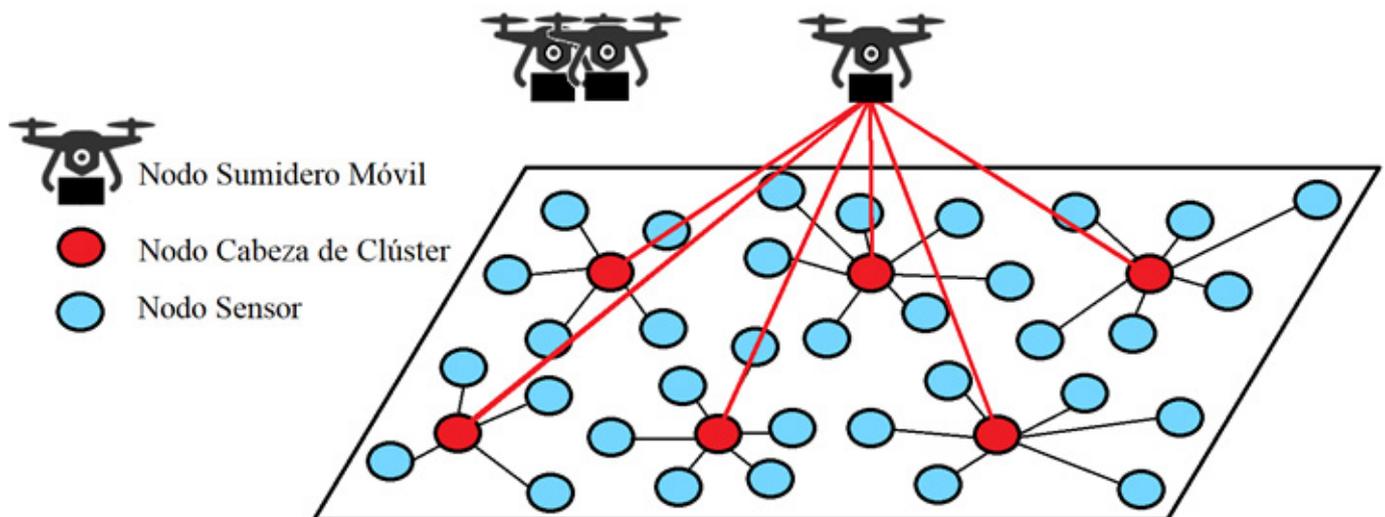
El resultado es un vector con elemento que representan la proximidad relativa de los nodos  $R = [R_1, R_2, \dots, R_i]$ . El valor máximo del vector corresponde a la alternativa que se debe seleccionar.

## Resultados y Discusión

Los principales resultados de la investigación se enuncian a continuación:

### A. Estructura jerárquica

La topología de la WSN a optimizar se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Red Inalámbrica de sensores en topología tipo clúster y nodo sumidero en UAV

La figura 2 muestra la estructura jerárquica del problema, la cual está comprendida por el objetivo: seleccionar el nodo cabeza de clúster, y los criterios: Energía Residual del Nodo, Costo de la Transmisión, RSSI y el Número de vecinos

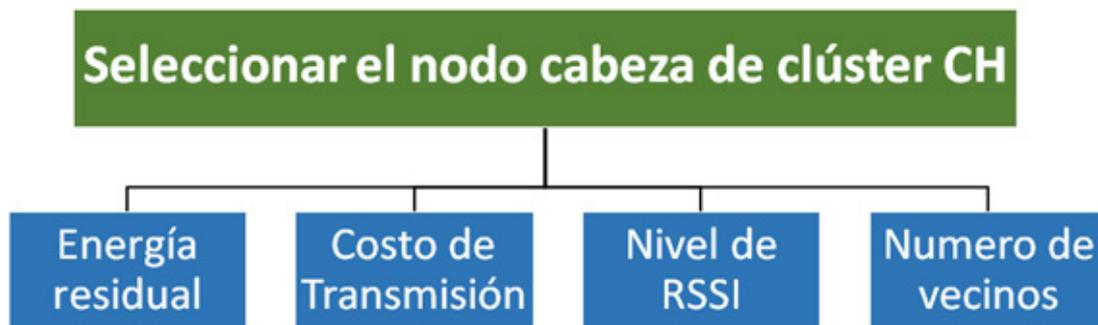


Figura 2. Estructura jerárquica del problema

La energía residual del nodo se define como la energía restante en la batería de un nodo. La unidad utilizada para este criterio es Watts (W).

El costo de transmisión representa la energía que se consume en la transmisión desde el nodo adyacente hasta su vecino. Se representa como  $E_{tx}$  y está dada por la ecuación 9.

$$E_{tx}(k, d) = T \times E_{elec} + T \times E_{amp} \times d^2 \quad (9)$$

Donde  $T$  es el número de bits de la trama a transmitir,  $E_{elec}$  es la energía que se disipa en los circuitos electrónicos,  $E_{amp}$  es la energía disipada por el transmisor de radio frecuencia al enviar la señal, y  $d$  es la distancia entre los nodos. La distancia  $d$  se obtiene de forma indirecta a partir de la potencia recibida,  $P_R$ .

$$P_R = P_T G K d^\alpha \quad (10)$$

Dónde:  $P_R$ , es potencia recibida.  $P_T$ , es potencia transmitida.  $K$ , representa la atenuación promedio del canal.  $G$ , es el producto de las ganancias de las antenas transmisora y receptora en la dirección de línea de vista.  $\alpha$ , es el exponente de pérdida de trayecto que depende de la frecuencia y del medio en el que se desarrolla la transmisión.  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

Para la comunicación con el UAV se tiene en cuenta que la ganancia de las antenas del trasmisor y del receptor depende de la altitud del UAV y la proximidad al nodo. Esto se debe al patrón de radiación de la antena. Si la antena seleccionada para los nodos es de  $\lambda/4$  la ganancia de la antena se describe a continuación.

$$G_T = G_R = 1.64 \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)} \right]^2 \quad (11)$$

El ángulo  $\theta$  se mide con respecto al eje vertical.  $\theta$ , varía según la posición del UAV y es igual al inverso de la tangente de la proximidad sobre la altitud.

El RSSI se define como el nivel de potencia de la señal recibida por el candidato a clúster cabeza desde el UAV.

El Número de vecinos es la cantidad de nodos asociados al nodo candidato a CH.

## B. Ponderación de los criterios

Para ponderar los criterios se realizó una encuesta a tres expertos en WSN. Estos expertos se encargaron de valorar cada uno de los criterios respecto a los demás. Las tablas VII, VIII y IX presentan las matrices de comparación pareada de los expertos 1, 2 y 3, respectivamente; mientras que la tabla X muestra la matriz de comparación pareada ponderadas de todos los expertos, esta se logra calculando la media geométrica de los elementos ubicados en cada posición de la matriz. En las tablas las abreviaciones  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  corresponden a los criterios Energía Residual, Costo de Energía, RSSI y Número de Vecinos, respectivamente.

**Tabla VII.** Matriz de comparación pareada Experto 1

|       | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_1$ | 1     | 7     | 3     | 5     |
| $C_2$ | 1/7   | 1     | 1/3   | 3     |
| $C_3$ | 1/3   | 3     | 1     | 5     |
| $C_4$ | 1/5   | 1/3   | 1/5   | 1     |

Inconsistencia: 0.091 (9.1%)

**Fuente:** Autores.

**Tabla VIII.** Matriz de comparación pareada Experto 2

|       | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_1$ | 1     | 5     | 3     | 5     |
| $C_2$ | 1/5   | 1     | 1/5   | 2     |
| $C_3$ | 1/3   | 5     | 1     | 7     |
| $C_4$ | 1/5   | 1/2   | 1/5   | 1     |

Inconsistencia: 0.094 (9.4%)

**Fuente:** Autores.

**Tabla IX.** Matriz de comparación pareada Experto 3

|       | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_1$ | 1     | 5     | 4     | 7     |
| $C_2$ | 1/5   | 1     | 1/3   | 3     |
| $C_3$ | 1/4   | 3     | 1     | 5     |
| $C_4$ | 1/7   | 1/3   | 1/5   | 1     |

Inconsistencia: 0.067 (6.7%)

**Fuente:** Autores.

**Tabla X.** Matriz de comparación pareada ponderada

|                | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| C <sub>1</sub> | 1              | 5.5934         | 3.3019         | 5.5934         |
| C <sub>2</sub> | 0.1788         | 1              | 0.2811         | 2.6207         |
| C <sub>3</sub> | 0.3029         | 3.5569         | 1              | 5.5934         |
| C <sub>4</sub> | 0.1788         | 0.3816         | 0.1788         | 1              |

Inconsistencia: 0.076 (7.6%)

**Fuente:** Autores.

En las tablas se logra apreciar que los expertos fueron consistentes con sus resultados ( $CR < 0.1$ ).

La tabla XI muestra el vector de prioridades o de pesos de los criterios partiendo de la matriz de comparación pareada ponderada. Como se puede apreciar el criterio que para los expertos tiene más importancia en la selección del Cluster Head es la Energía Residual (C1) con un 56.61% de prioridad, seguida del RSSI (C3) con un 27.2%, el Coste de Transmisión (C2) con un 10.38%, por último, el Número de Vecinos (C4) con un 5.91% de prioridad.

**Tabla XI.** Vector de prioridades de los criterios

|                | W      | W (%) |
|----------------|--------|-------|
| C <sub>1</sub> | 0.5651 | 56.61 |
| C <sub>2</sub> | 0.1038 | 10.38 |
| C <sub>3</sub> | 0.2720 | 27.2  |
| C <sub>4</sub> | 0.0591 | 5.91  |

**Fuente:** Autores.

### C. Algoritmo propuesto

Teniendo en cuenta los pesos de cada criterio para la selección del Cluster Head (CH), se procede a plantear el algoritmo que permitirá a cada nodo sensor, realizar su respectiva elección. El algoritmo se basa en el método TOPSIS, por lo tanto, se definen los criterios Energía Residual y RSSI como criterios de beneficios, por lo que se debe buscar su maximización; mientras que el Coste de Transmisión y Número de Vecinos se consideran criterios de costos, por lo tanto, se deben minimizar.

### Pseudocódigo del Algoritmo para la selección del CH

1. **Inicio**
2. **Iniciar matriz**
3.  $W \leftarrow [0.5651, 0.1038, 0.2720, 0.0591]$
4.  $k \leftarrow$  Tamaño de la trama (bits)
5.  $E_{elec} \leftarrow$  Energía disipada por los circuitos electrónicos
6.  $E_{amp} \leftarrow$  Energía disipada por el amplificado
7.  $P_T \leftarrow$  Potencia de transmisión
8.  $T \leftarrow$  Tamaño de la trama a enviar
9. **Si** (UAV se conecta con el nodo) **entonces:**
10. **Leer** la potencia recibida  $P_R$
11.  $RSSI \leftarrow P_R$  recibido del UAV
12. **Si no**
13.  $RSSI \leftarrow (-999)$
14. **Fin del Si**
15. **Proceso Enviar beacon** (Timer):
16. energía residual  $\leftarrow$  **Leer** Energía residual del nodo
17. numero\_vecinos  $\leftarrow$  **Leer** tamaño(matriz)
18. beacon  $\leftarrow$  **Estructurar\_beacon** (ID\_nodo, RSSI, energía\_residual, numero\_vecinos)
19. **Enviar\_broadcast** (beacon)

**20. Fin Proceso Enviar beacon****21. Proceso Recibir beacon (Interrupcción):**

22. beacon  $\leftarrow$  Leer beacon\_recibido
23. ID  $\leftarrow$  beacon[“ID\_nodo”]
24. energía\_residual  $\leftarrow$  beacon[“energía\_residual”]
25. numero\_vecinos  $\leftarrow$  beacon[“numero\_vecinos”]
26. RSSI  $\leftarrow$  beacon[“RSSI”]
27. Leer la potencia recibida  $P_R$  en el UAV.
28.  $d \leftarrow (P_R/P_TKG)^{1/\alpha}$  // Ecuación 11.
29.  $E_{Tx} \leftarrow (TE_{elec} + TE_{amp}d^2)$  // Ecuación 9.
30. Elemento  $\leftarrow$  [ID, energia\_residual, Etx, RSSI, numero\_vecinos]
31. **Agregar Elemento a matriz**
32. **Terminar Proceso Recibir beacon**
33. **Proceso Seleccionar CH (evento)**
34. // calcular matriz normalizada
35.  $n_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}$ . Para  $j = 1, 2, 3, 4$  // Ecuación 4
36. // Calcular matriz normalizada ponderada
37.  $p_{ij} = w_j \times n_{ij}$  Para  $j = 1, 2, 3, 4$  // Ecuación 5
38. // Estimar la Solución Ideal Positiva y la Solución Ideal Negativa
39.  $AIS^+ = [MAX(P_{i1}), MIN(P_{i2}), MAX(P_{i3}), MIN(P_{i4})]$  Para  $i = 1, 2, \dots, \text{tamaño(matriz)}$
40.  $AIS^- = [MIN(P_{i1}), MAX(P_{i2}), MIN(P_{i3}), MAX(P_{i4})]$  Para  $i = 1, 2, \dots, \text{tamaño(matriz)}$
41. //Calcular vectores de distancia
42.  $d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_{ij} - A_j^+)^2}$  Para  $i = 1, 2, \dots, \text{tamaño(matriz)}, j = 1,2,3,4$  // Ecuación 6
43.  $d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_{ij} - A_j^-)^2}$  Para  $i = 1, 2, \dots, \text{tamaño(matriz)}, j = 1,2,3,4$  // Ecuación 7
44. // Calcular proximidad relativa
45.  $R_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-)$  // Ecuación 8
46. //Elegir el CH
47. CH  $\leftarrow$  MAX(Ri)
48. **Terminar proceso**

Este algoritmo puede ser codificado en cualquier lenguaje de programación, (Java, C, C#, Python, entre otros), y simulado en entornos especializado como Cooja, NetLog, entre otros.

**D. Trabajos futuros**

La motivación para seguir adelantando investigaciones relacionadas con las WSN es el alto grado de aplicabilidad de este tipo de redes en diferentes entornos. Estas se están implementando en agricultura de precisión, domótica, control de procesos industriales, logística, monitoreo estructural, monitoreo de riesgos ambiental, ciudades inteligentes, entre otros. Esto debido a que las WSN permiten recolectar datos que se convertirán en información que facilite la toma de decisión en la gestión de cualquier proceso.

Como trabajo futuro a esta investigación se plantea el uso de programación lineal o no lineal, para optimizar la ruta del UAV a partir de la ubicación de los nodos CH dentro del espacio de la WSN.

## Conclusiones

Es posible optimizar una WSN en topología de clúster con nodo sumidero móvil ubicado en un vehículo aéreo no tripulado. Esto a partir de la selección adecuada de un nodo cabeza de clúster usando métodos de decisión multicriterio como AHP y TOPSIS.

AHP y los expertos consultados facilitaron la priorización de los criterios que ayudan a tomar la decisión sobre la elección del CH dentro de la WSN. El criterio más significativo es la energía residual. Este tiene una inferencia de 56.1% en la selección. El criterio menos significativo es el número de vecinos que tendrá el CH seleccionado, con una inferencia del 5.9% en la decisión.

El algoritmo de selección propuesto basado en TOPSIS permitió establecer la distancia euclidiana entre las posibles soluciones de selección y la elección ideal. Además, de la distancia euclidiana entre las posibles soluciones de selección y la elección menos favorable. A partir de estas distancias se calcula la proximidad relativa de cada posible solución; y en base a esto, el algoritmo puede elegir un CH que optimice la WSN

## Referencias

- [1] P. Bellavista, G. Cardone, A. Corradi, and L. Foschini, "Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no 10, pp. 3558-3567, 2013 doi:10.1109/ICE348803.2020.9122891
- [2] J. Rueda, and J. Talavera, "Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora," *Revista Colombiana de Computación*, vol. 18, no 2, pp. 58-74, 2017 doi:10.29375/25392115.3218
- [3] J. Gomez-Rojas, L. Camargo, and R. Montero, "Mobile wireless sensor networks in a smart city," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 11, no 1, pp. 1-8, 2018 doi:10.21307/ijssis-2018-009
- [4] L. Camargo, J. Gomez-Rojas and M. Gasca, "La ciudad inteligente y la gestión de las TIC Caso de estudio: ciudad de Santa Marta. Santa Marta," *Editorial Unimagdalena*, 2020. <https://editorial.unimagdalena.edu.co/Editorial/Publicacion/4153>
- [5] J. Rao, and S. Biswas, "Network-assisted sink navigation for distributed data gathering: Stability and delay-energy trade-offs," *Computer Communications*, vol. 33, no. 2, pp. 160-175, 2010 doi: 10.1016/j.comcom.2009.08.009.
- [6] L. Cañete, A. Soto, P. Olavarrieta and C. Alvarez, "Diseño de una tipología tipo clúster de prueba para IWSN estática basada en un algoritmo secuencial de optimización," *Trilogía: ciencia, tecnología y sociedad*, vol. 24, no 1, pp. 103-113, 2012.
- [7] S. Nikhitha and M. Panda, "Optimal sensor data harvesting using a mobile sink," *Procedia computer science*, vol. 143, no. 1, pp. 921-930, 2018. doi: 10.1016/j.procs.2018.10.343
- [8] S. Chellappan, and N. Dutta "Mobility in Wireless Sensor Networks," *In Advances in Computers*, vol. 90, no. 1, pp. 185-222, 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-408091-1.00003-8.
- [9] C. Wang, F. Ma, J. Yan, D. De, and S. Das, "Efficient aerial data collection with UAV in large-scale wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 11, pp. 286080. 2015. doi: 10.1155/2015/286080

- [10] P. Mitchell, J Qiu, H. Li and D. Grace, "Use of aerial platforms for energy efficient medium access control in wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 33. no. 4, pp. 500-512, 2010. doi: 10.1016/j.comcom.2009.10.015
- [11] J. Neto, A. Boukerche, R. Yokoyama, D. Guidoni, R. Meneguetto, J. Ueyama, and L. Villas, "Performance evaluation of unmanned aerial vehicles in automatic power meter readings," *Ad Hoc Networks*, vol. 60, no. 1, pp. 11-25, 2017. doi: 10.1016/j.adhoc.2017.03.003
- [12] S. Pradhan, and K. Sharma, "Cluster head rotation in wireless sensor network: a simplified approach," *International Journal of Sensor and Its Applications for Control Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 1-10, 2016. doi: <https://doi.org/10.14257/ijcsacs>.
- [13] K. Miranda, A. López-Jaimes, and A. García-Nájera, "Análisis multiobjetivo de la selección de líderes en redes inalámbricas de sensores," *Research in Computing Science*, vol. 134, no. 1, pp. 11-125, 2017
- [14] O. Gul and A. Erkmén. M. "Energy-efficient cluster-based data collection by a UAV with a limited-capacity battery in robotic wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 20, pp. 5865, 2020. doi: 10.3390/s20205865
- [15] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS '00)*, 2000. doi: 10.1109/HICSS.2000.926982
- [16] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 366–79, 2004. doi: 10.1109/TMC.2004.41
- [17] H. Okcu and M. Soyuturk, "Distributed clustering approach for UAV integrated wireless sensor networks," *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 15, no. 3, pp. 106-120, 2014. doi: 10.1504/IJAHUC.2014.059912
- [18] D. Kumar, T. Aseri, and R. Patel, "EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks," *Computer communications*, vol. 32, no. 4, pp. 662-667, 2009. doi: 10.1016/j.comcom.2008.11.025
- [19] B. Khan, R. Bilal, and R. Young, "Fuzzy-TOPSIS based cluster head selection in mobile wireless sensor networks," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 928-943, 2018. doi: 10.1016/j.jesit.2016.12.004
- [20] D. Mehta and S. Saxena, "Hierarchical WSN protocol with fuzzy multi-criteria clustering and bio-inspired energy-efficient routing (FMCB-ER)," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, no. 1, pp. 35083–35116, 2020. doi: 10.1007/s11042-020-09633-8
- [21] A. Robles, A. Polo 20 A., & Ospino Castro, A. (2017). An Analytic Hierarchy Process Based Approach for Evaluating Renewable Energy Sources. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(4), 38–47.
- [22] T. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83-98, 2008. doi: 10.1504/IJSSci.2008.01759
- [23] T. Saaty, "The Analytic Hierarchy and Analytic Network Measurement Processes: Applications to Decisions under Risk" *European journal of pure and applied mathematics*, vol. 1, no. 1, pp. 122-196, 2008. doi: 10.29020/nybg.ejpam.v1i1.6