

## DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES DISTRIBUIDOS

■ Blando, Karen

e-mail: karenblandoc@yahoo.com

Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela

■ Vargas, Jesús

e-mail: jesusdavidvargas@gmail.com

Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela

Fecha de Recepción: 18 de Julio de 2010

Fecha de Aceptación: 25 de Febrero de 2011

---

### RESUMEN

En los últimos años, se ha presentado un gran auge en las comunicaciones inalámbricas, ya que permiten una gran flexibilidad para la transmisión de datos, utilizando como medio el aire, y así, proporcionando la combinación de conectividad y movilidad. Entre las diversas tecnologías inalámbricas existentes se encuentran, las redes inalámbricas de sensores. Las mismas requieren un establecimiento de comunicación eficiente, desde el punto de vista energético y computacional. Esto se garantiza, mediante el desarrollo de algoritmos óptimos para protocolos de comunicación. El estudio especializado de este tipo de redes, permitió la realización de dos diseños de algoritmos, uno con topología lineal y el otro en árbol. La escogencia de una topología lineal, fue porque cada nodo contiene como máximo dos enlaces de comunicación, por tal motivo se consideró que el consumo energético sería menor que en otras topologías, donde existen mayores enlaces por cada nodo. En el caso de la topología en árbol, la razón fue que no existen restricciones sujetas al número de enlaces de cada nodo, por tanto se consideró que el tiempo de convergencia sería menor.

Los dos algoritmos diseñados fueron simulados, tomando en cuenta las mismas condiciones y parámetros, a fin de establecer comparaciones entre ellos y definir así, cuál es el más óptimo. Dicha simulación se efectuó en MATLAB, mediante la creación de una interfaz gráfica que le permite al usuario insertar parámetros de entrada,

tales como: número de nodos, dimensión del área, radio de cobertura de los nodos y nivel de optimización en el algoritmo lineal.

El resultado obtenido en todas las pruebas realizadas fue que el algoritmo de árbol presenta una eficiencia superior que el lineal, debido a que no tiene que ejecutar una etapa de optimización para lograr el establecimiento topológico de la red.

**Palabras clave:** algoritmo lineal, algoritmo de árbol, eficiencia, consumo energético y tiempo de convergencia.

number of nodes, size of area, radio coverage of nodes and level linear optimization algorithm.

The result obtained in all tests was that the tree algorithm was higher efficiency than linear one, because they do not need to run an optimization step in order to get the establishment of the network topology.

**Keywords:** linear algorithm, tree algorithm, efficiency, energy consumption and convergence time.

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR COMMUNICATION PROTOCOLS IN DISTRIBUTED WIRELESS SENSOR NETWORKS

### ABSTRACT

In the last few years, there has been a boom in wireless communications, allowing great flexibility for data transmission, using air as a medium, and so providing a combination of connectivity and mobility. Among the various wireless technologies are available, wireless sensor networks. They require an establishment of efficient communication, from the standpoint of energy and computational. This is guaranteed through the development of optimal algorithms for communication protocols. The specialized study of these networks, allowed the completion of two designs of algorithms: one with linear topology and the other tree. This linear topology was chosen because each node contains at most two communication links, for that reason it was considered that the energy consumption would be lower than in other topologies, which require more links per node. In the case of the tree topology, the reason was that there are no restrictions related to the number of links of each node, therefore it was considered that the convergence time would be less.

The two algorithms designed were executed under the same conditions and parameters in order to make better comparisons between them and to define, what is the most optimal. This execution or simulation as well, was done at MATLAB, creating a graphical interface that allows the user to insert input parameters, such as: the

## 1. INTRODUCCIÓN

La creación de nuevas tecnologías inalámbricas como las redes inalámbricas de sensores, han facilitado la conexión de dispositivos en lugares de difícil acceso.

El presente trabajo está enfocado en el desarrollo de algoritmos para protocolos de comunicación que permitan el establecimiento eficiente de las redes inalámbricas de sensores desde el punto de vista energético y computacional.

La estructura de la investigación se basó en cinco (5) partes siguientes: planteamiento del proyecto, marco teórico, metodología y desarrollo, resultados, y conclusiones y recomendaciones.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las redes inalámbricas de sensores distribuidos están constituidas por una colección de micro dispositivos electro-mecánicos, esparcidos al interno de un área delimitada. Es importante mencionar que los sensores de dichas redes inalámbricas, tienen la capacidad de revelar múltiple información de un territorio y de intercambiar, y transmitir esta data sobre un canal para redes inalámbricas de sensores. Estos sensores dependen del uso de baterías o pilas, lo cual genera un principal problema ya que contienen una limitada autonomía energética, necesitando así una estación base cercana para el envío de información y procesado de ésta.

En virtud de lo anteriormente expuesto, es menester sugerir que las redes inalámbricas sensoras se interconecten en un modo eficiente. Para ello, el punto clave es el desarrollo del algoritmo para protocolos de comunicación en dichos tipos de redes, ya que su elaboración juega un papel muy importante en cuanto a la disminución del consumo de potencia, monitorización en zonas de difícil acceso y el aumento de la velocidad de convergencia en la topología.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo General

Para la realización de este trabajo se propuso como objetivo general desarrollar un algoritmo de comunicación entre los nodos, que sea lo suficientemente eficiente desde el punto de vista energético y computacional, para implementarlo en un modo distribuido entre varios sensores dispuestos en una zona geográfica adaptada

a los parámetros de alcance de los dispositivos, y así recopilar información relevante que posteriormente será transmitida hacia una estación de elaboración de datos.

### 3.2 Objetivos específicos

A continuación se presentan los objetivos específicos:

- Estudiar las características generales de un sistema *Wireless Sensor Network* (WSN).
- Estudiar los distintos parámetros de caracterización que abastece el sistema de comunicaciones (WSN).
- Estudiar las diferentes técnicas y métodos de ingeniería para poder realizar conexiones lógicas y físicas entre sensores inalámbricos.
- Estudiar cómo funcionan los dispositivos y definir sus limitaciones a nivel de potencia y de vida media.
- Evaluar los requerimientos de software disponibles para elaborar un simulador que permita modelar las configuraciones del sistema.
- Obtener varios algoritmos que sean lo suficientemente eficientes a nivel energético y computacional, para que sean soportados en una red de sensores inalámbricos.
- Crear una interfaz amigable que permita la introducción de datos y el análisis de los diferentes algoritmos que se desarrollen.
- Comparar los múltiples algoritmos para la transmisión entre micro-dispositivos.
- Determinar el mejor algoritmo que sea capaz de utilizar menos potencia para un arreglo aleatorio de dispositivos.
- Demostrar la eficiencia de los diferentes algoritmos de comunicaciones entre sensores a través del consumo de energía para diferentes topologías de redes.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1 Características generales de un sistema inalámbrico de sensores

#### a) Red inalámbrica de sensores

Se denomina red inalámbrica de sensores a un conjunto de computadores muy pequeños, equipados con micro-dispositivos electromecánicos, que son capaces de captar información sobre alteraciones ocurridas en el medio ambiente, y así, recopilar y distribuir, en forma

inalámbrica, los datos estadísticos que registren. Los pequeños computadores reciben el nombre de “nodos de la red”, y los micro-dispositivos que realizan las mediciones del medio ambiente, son los que se conocen como “sensores” [1].

Las redes inalámbricas de sensores son de tipo “Ad- Hoc”, es decir, están basadas en una tecnología inalámbrica de comunicación en la que no existen nodos centrales. De esta manera, no poseen una infraestructura física definida, ni una administración central, siendo capaces de establecer una comunicación, todos contra todos, dentro de ciertos parámetros definidos.

#### 4.2. Características principales de redes inalámbricas de sensores.

- *Topología dinámica:* Este tipo de topología debe ser cambiante para poder comunicar los nuevos datos adquiridos.
- *Variabilidad de canal:* El canal es muy variable ya que se ve afectado por diversos factores como la atenuación de espacio libre, desvanecimientos rápidos o lentos, que pueden producir errores en los datos.
- *No se utiliza infraestructura de red:* En las redes inalámbricas de sensores no son necesarias infraestructuras para que puedan funcionar, ya que los nodos pueden actuar como emisores, receptores o enrutadores de la información deseada.
- *Tolerancia a errores:* El dispositivo sensor debe ser capaz de seguir funcionando a pesar de los errores en el sistema.
- *Comunicaciones multisalto o broadcast:* En las aplicaciones sensoras, es muy común utilizar mensajería basada en *broadcast*.
- *Consumo energético:* Es uno de los factores de más cuidado debido a que la unidad de energía es limitada. El nodo sensor debe contar con un procesador de consumo muy bajo, al igual que el transceptor radio y el software.
- *Limitaciones de hardware:* Debido al uso restringido de la energía, el hardware debe ser lo más sencillo posible, al igual, que el transceptor de radio, haciendo el proceso muy limitado.
- *Costes de producción:* Los dispositivos sensores deben ser en cantidad elevados para que la red WSN obtenga datos fiables. Dichos nodos son económicos si la producción se realiza en grandes cantidades.

#### 4.3 Estructura de las redes inalámbricas de sensores

La red inalámbrica de sensores está constituida por: nodos secundarios, nodos principales, un nodo recolector, una estación base y nodos *cluster head*.

Los nodos secundarios son dispositivos electrónicos que tienen la capacidad de captar la información del entorno donde se encuentran y así, procesarla y transmitirla inalámbricamente, a los nodos principales. A su vez, estos nodos principales establecen la comunicación entre ellos mismos, para transmitir la información captada por los nodos secundarios y poder enviarla al nodo recolector, el cual recoge toda la información de la red y la envía a la estación base. Se llama nodo *cluster head* al conjunto de un nodo principal con sus correspondientes nodos secundarios.

La estación base consta básicamente de un computador, el cual recibe toda la información de la red a través del nodo recolector. En dicha estación se ordenan, sistemáticamente, los datos suministrados por la red para ser estudiados posteriormente.

#### 4.4 Características de los sistemas de comunicaciones de una Red Inalámbrica de Sensores

a) Descripción de parámetros que influyen en la comunicación dentro de la WSN

- *Potencia de Transmisión:* Es la energía medida en *dBm* que es capaz de transmitir un sensor, y por tanto es la que define con certeza el alcance o radio de cobertura de estos dispositivos. La potencia de transmisión en los sensores inalámbricos se puede ajustar dependiendo de la distancia de separación entre el sensor origen y el destino.
- *Potencia de Recepción:*

Es la potencia recibida de la señal en el nodo destino. Ésta es medida en *dBm* y una vez conocida por el nodo receptor, el mismo debe ser capaz de calcular la distancia a la que se encuentra el nodo origen para ajustar sus futuras transmisiones al nodo detectado, generando como consecuencia la disminución de su consumo energético y la interferencia para otros nodos emisores.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{RX} + G_{TX} - L_b - L_X$$

Eq 1. Potencia de Recepción

La ecuación anterior corresponde a la potencia recibida por un nodo *cluster head* ( $P_{RX}$ ), y en la misma,

$P_{TX}$  indica la potencia de transmisión de otro nodo *cluster head* medida en *dBm*,  $G_{RX}$  y  $G_{LX}$  representan la ganancia de los elementos radiantes de ambos *cluster head* respectivamente,  $L_b$  sería la atenuación máxima permisible debido a la propagación, mientras que  $L_x$  representa atenuación por factores externos como vegetación, obstáculos, lluvia o factores internos al transmisor o receptor. Tanto las ganancias como las atenuaciones están expresadas en *dB*.

Hoy en día existen numerosas herramientas informáticas que operando con modelos digitales de terreno, permiten la predicción de la pérdida básica de propagación y de la cobertura radioeléctrica de cada *cluster head*, utilizando métodos clásicos disponibles en la literatura técnica general, así como métodos propietarios con expresiones genéricas con parámetros que se ajustan según los resultados de mediciones de las pérdidas de propagación.

Dentro de los modelos existentes, se encuentran los determinísticos. Los mismos, se basan en el trazado de rayo entre el transmisor y un cierto entorno del receptor *ray tracing*, y realizan las predicciones aplicando la teoría de rayos, según las interacciones de éstos con los obstáculos interpuestos entre el transmisor y el receptor (reflexiones, difracciones). También, requieren una completa caracterización de área de predicción (modelo digital tridimensional del terreno), así como los materiales constructivos (permisividad y conductividad). Son bastantes precisos, pero suelen requerir un elevado tiempo de ejecución, así como un gran volumen de datos. Permiten la caracterización del canal radio eléctrico. Por su complejidad y tiempo de cálculo suelen circunscribirse a aplicaciones en escenarios de tamaño limitado.

Como se asumirá un ambiente uniforme y plano, en el que no existirán obstrucciones entre nodos *cluster head* y cuyas distancias de interconexión serán menores a 200m, se puede considerar despreciable el efecto de la multitrayectoria, por tal razón decidimos implementar el modelo de propagación de Friis o de espacio libre.

Aplicando una potencia  $P_{TX}$  a un radiador esférico isotrópico, se obtiene a una distancia  $R$  una densidad de potencia, tal y como se indica en la siguiente ecuación:

$$\text{densidad } P_{RX} = \frac{P_{TX}}{4\pi R^2}$$

### Eq 2. Densidad de potencia en la recepción

Si la antena es dotada de una cierta directividad, es decir, concentra la emisión en una cierta dirección, en

igualdad de condiciones (misma potencia transmitida  $P_{TX}$  y misma distancia  $R$ ), se obtiene una densidad de potencia mayor en la dirección preferencial, equivalente a lo representado en la ecuación siguiente (Eq. 3).

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX}}{4\pi R^2}$$

### Eq 3. Potencia de Recepción para una antena dotada con cierta directividad

Si la antena receptora posee una cierta superficie  $A_R$ , intercepta una potencia igual al producto de la densidad de potencia por su superficie tal como se presenta en la ecuación (Eq. 4)

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX} A_R}{4\pi R^2}$$

### Eq 4. Potencia de Recepción para una antena con cierta superficie

La relación entre el área equivalente y la ganancia en recepción es una constante independiente de la antena y es representada como:

$$\frac{A_R}{G} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

### Eq 5. Relación entre el área equivalente y la ganancia en la recepción.

Utilizando las ecuaciones (Eq. 4) y (Eq. 5) se obtiene la forma homogénea de la ecuación de propagación en espacio libre. [2]

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

### Eq 6. Ecuación de propagación en espacio libre

La ecuación anterior se puede reescribir como:

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{G_{TX} G_{RX}}{L_b}$$

### Eq 7. Ecuación de propagación en espacio libre en función de la atenuación

Teniendo entonces que la ecuación lineal que representa la atenuación ( $L_b$ ) sigue la próxima expresión.

$$L_b = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

#### Eq 8. Ecuación de la atenuación en función de la longitud de onda.

Vale destacar, en la (Eq.8), que la longitud de onda será sustituida, recordando que su valor indica el resultado de dividir la velocidad de la luz ( $c$ ) entre la frecuencia de la señal ( $f$ ). De esta sustitución se deriva la ecuación (Eq .9).

$$L_b = \left( \frac{4\pi Rf}{c} \right)^2$$

#### Eq 9. Ecuación de la atenuación en función de la frecuencia.

Debido a que se busca conocer cuál será el valor de la atenuación, en unidades de decibelios, a la ecuación adimensional (Eq .9) se le aplica el logaritmo y se multiplica por diez (10). Obteniendo así:

$$L_b = 10 \text{Log} \left( \frac{4\pi Rf}{c} \right)^2$$

#### Eq 10. Ecuación de la atenuación expresada en decibelios

Por propiedades matemáticas de la función logaritmo, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$L_b = 20 \text{Log} \left( \frac{4\pi Rf}{c} \right)$$

#### Eq 11. Otra forma de expresa la ecuación de la atenuación en decibelios

Una vez ubicados en la ecuación (Eq. 11), por propiedades logarítmicas, podemos transformarla en una suma de tres términos. Uno de estos términos nos resultará un valor numérico, el segundo dependerá de la distancia y el tercero de la frecuencia de transmisión.

$$L_b = 20 \text{Log} \left( \frac{4\pi}{c} \right) + 20 \text{Log}(R) + 20 \text{Log}(f)$$

#### Eq 12. Ecuación de la atenuación en función de sumas de tres términos

Tomando en consideración el valor de la velocidad de la luz  $c= 3 \times 10^8$  (m/s), éste será sustituido en la ecuación (Eq. 12) a fin de simplificarla resolviendo el primer término.

$$L_b = -27,5582 + 20 \text{Log}(R) + 20 \text{Log}(f)$$

#### Eq 13. Ecuación de la atenuación resumida.

Finalmente, se tiene que la atenuación de espacio libre ( $L_b$ ) es directamente proporcional a la frecuencia de la señal transmitida ( $f$ ) y a la distancia entre los nodos origen y destino ( $R$ ), tal y como lo indica la ecuación (Eq. 13). Es importante señalar que los valores de las variables de distancia y frecuencia, deben ser ingresadas a la ecuación (Eq. 13) en las unidades de metros ( $m$ ) y mega Hertz respectivamente (MHz).

Con el conocimiento de las ecuaciones (Eq. 1) y (Eq. 13), los dispositivos receptores al percibir una potencia ( $P_r$ ), serán capaces de hallar la distancia relativa ( $d$ ), puesto que los demás parámetros se conocen, ya que se asume que todos los nodos de la red serán de la misma marca y mismo modelo. Esto hace que cada nodo conozca por sus propias características, la potencia de transmisión y la frecuencia de operación de todos los nodos de la red.

- *Sensibilidad de Recepción*: Es un valor de umbral fijo, que indica el mínimo de potencia con la cual el dispositivo es capaz de comprender la información de la señal recibida. Este valor de sensibilidad viene dado por el fabricante en las especificaciones técnicas del equipo.
- *Ganancia de las antenas*: Es básicamente una amplificación que se le da a la señal, tanto en las antenas transmisoras como receptoras, con el objeto de aumentar la potencia de recepción. Los valores ganancia son expresados en  $dB$ , vienen dados por los fabricantes y se pueden encontrar en los *data sheets* de cada uno de los equipos.
- *Distancia*: Se refiere a la separación que existe entre dos nodos que establecen comunicación entre sí. El parámetro de la distancia es de suma importancia, ya que está relacionada en forma directa con la cantidad de dispersión de energía que hay en los enlaces inalámbricos, a través de los cuales los nodos establecen la comunicación.
- *Alcance o radio de cobertura*: La distancia es un parámetro que se encuentra estrechamente ligado con el radio de cobertura de los sensores. Es la máxima distancia que puede tener un sensor, eso va a depender de la potencia de transmisión.

#### 4.5 Técnicas y métodos de ingeniería en conexiones lógicas y físicas entre sensores inalámbricos

Para estudiar el establecimiento de las redes inalámbricas de sensores, es necesario ubicarse en el escenario en el cual los sensores se encuentran distribuidos en la zona donde se quieren recolectar los datos, y aún no ha habido ningún tipo de comunicación entre ellos. Este es el punto donde comienza todo el proceso de establecimiento de conexión de red, y culmina una vez que todos los nodos han sido integrados a la red y en conjunto crean una estructura topológica, propiciando de esta manera la convergencia de la red WSN.

Los nodos no tienen un conocimiento de la topología de la red, pues, deben descubrirla. Lo fundamental del nodo es anunciar su presencia y escuchar los anuncios *broadcast* de sus nodos vecinos. Entonces, mediante su alcance, el nodo se informa de la existencia de nuevos nodos y puede definir una manera de enrutarse a través de los mismos. Transcurrido un tiempo, cada nodo sabrá qué nodos tiene alrededor y una o más formas de alcanzarlos.

##### a) Modelos de algunos algoritmos ya existentes

- *Modelo de un salto*: Se basa en una comunicación directa donde todos los nodos en la red, transmiten a la estación base. Bajo esta modalidad, no se garantiza el alcance de los nodos a la estación, pues poseen un rango de cobertura limitado, lo cual hace que no sea una buena opción para las comunicaciones en redes de sensores inalámbricos.
- *Modelo multi-salto*: Su mecanismo consiste en que un nodo transmite la información a su vecino más cercano de la estación base, a su vez, éste reenvía los datos a otro vecino más próximo hasta llegar al nodo base. Así que, la transmisión se va realizando salto a salto desde la fuente hacia el destino. Por tanto, este modelo es apto para las comunicaciones de redes inalámbricas de sensores.
- *Modelo esquemático basado en clústeres*: Para obtener una optimización de la técnica anterior, se puede trabajar con un mecanismo para la agregación de datos mediante los protocolos de enrutamiento basados en clústeres. En este caso, los nodos se agrupan en clústeres con un nodo cabeza, el cual es el responsable de enrutar desde ese clúster a los nodos cabezas de otros clústeres o a la estación base. Así pues, los

datos viajan desde un clúster a otro hasta llegar, de una forma más rápida, a la estación base. La latencia en este modelo es mucho menor que en la técnica MultiHop. El crear clústeres provee una capacidad inherente de optimización en las cabezas de clúster. Por tanto, este modelo será mejor que los anteriores para redes con gran cantidad de nodos en un espacio amplio y será el usado en el desarrollo de este trabajo.

##### b) Control de Acceso al Medio (MAC) en redes inalámbricas de sensores

Un protocolo MAC tiene como principal objetivo controlar el acceso al medio compartido, siendo en este caso un canal de radio. El protocolo debe evitar las interferencias entre las transmisiones. Los tipos de protocolos para WSN son:

- *Protocolos Proactivos*: En estos protocolos, los nodos mantienen la información sobre la topología de la red de forma total o parcial., mediante tablas de enrutamiento que constantemente se van intercambiando. Con ello, la información de enrutamiento se difunde abarcando toda la red. Para buscar un camino hacia un destino, el nodo ejecuta un algoritmo el cual se basa en la topología guardada. Algunos ejemplos de protocolos proactivos son: el protocolo de enrutamiento DSDV (*Destination Sequence Distance Vector*), el protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) y el protocolo WRP (*Wireless Routing Protocol*).
- *Protocolos Reactivos o bajo consumo*: En este tipo de protocolos, los nodos buscan la ruta cuando la necesitan. Esto genera un retardo en el establecimiento de la conexión si se compara con el protocolo anterior. Algunos ejemplos de protocolos reactivos son: TORA (*Temporary Ordered Routing Algorithm*), DSR (*Dynamic Source Routing*), AODV (*Ad Hoc on Demand Distance Vector*) o DYMO (*Dynamic MANET On Demand*). Los protocolos DSR y AODV utilizan el envío *unicast* para que llegue la respuesta de la petición de la ruta que un nodo realizó, mediante el camino inverso al que siguió la petición para llegar al destino
- *Protocolos de enrutamiento Híbridos*: Utiliza una combinación de los protocolos reactivos y proactivos. Es decir, los nodos que se encuentren localizados en una determinada distancia del nodo en cuestión o que se encuentren en la zona geográfica definida, se toman dentro de la zona de enrutamiento dado. Para enrutar al

nodo que se encuentra en dicha zona, se usa un algoritmo proactivo, mientras que los nodos que se encuentran afuera, utilizan métodos reactivos.

#### 4.6 Descripción del funcionamiento de los dispositivos de WSN y su limitación de energía.

a) Arquitectura y descripción del hardware de un nodo sensor

Para describir la arquitectura de un nodo es necesario analizar las tareas de un nodo y cuáles componentes son requeridos para realizar dichos cometidos.

Al establecer una red inalámbrica de sensores, se deben evaluar ciertos elementos como: el costo, el tamaño y el consumo de energía de los nodos. Estos parámetros son un factor fundamental para la aplicación que se desee. Un nodo sensor básico comprende 5 componentes: un controlador para procesar todos los datos pertinentes, una memoria para almacenar los programas y datos intermedios, unos sensores y actuadores que puedan observar o controlar parámetros físicos del medio ambiente, dispositivo de comunicación para poder enviar y recibir información y una fuente de alimentación, la que se encuentra en forma de baterías. [3]

b) Descripción del consumo de energía en la transmisión.

La energía consumida por un transmisor es debido a dos factores: primeramente, la generación de la señal de radiofrecuencia, la cual depende de la modulación que se utilice, la distancia entre nodos, y por ende, la potencia de transmisión (potencia radiada por la antena). De segundo, los componentes electrónicos necesarios como, por ejemplo, los filtros.

La potencia de transmisión es generada por el amplificador de un transmisor. El propio consumo de potencia del amplificador depende del diseño del mismo e inclusive el consumo se basa en la potencia que los mismos generan. En la siguiente ecuación muestra un modelo del consumo de potencia del amplificador, el cual se asume un nivel constante de potencia, independientemente de la potencia radiada por la antena.

$$P_{amp} = \alpha_{amp} + \beta_{amp} \cdot P_{tx}$$

#### Eq 14. Potencia generada por el amplificador de un transmisor [3]

Donde,  $P_{tx}$  es la potencia de transmisión y,  $\alpha_{amp}$  y  $\beta_{amp}$ , son constantes que dependen de la tecnología usada y de la arquitectura del amplificador.

La energía que consume un nodo sensor cuando transmite un bit ( $E_{tx}$ ) sobre una distancia  $d$ , se define como:

$$E_{tx} = E_{txelec} + E_{comp} + \epsilon d^2$$

#### Eq 15. Energía que consume un nodo sensor [3]

Donde,  $E_{txelec}$  es la energía consumida por el transmisor electrónico, se asume que es igual en el receptor.  $E_{comp}$ , es la energía computacional proveniente de los cálculos y tomas de decisiones realizadas por los chips.  $\epsilon$ , es un factor que está relacionado a la sensibilidad, la ganancia y la frecuencia, para que un transmisor pueda enviar a una cierta distancia "d". El modelo asume que el costo de transmitir de un nodo "A" hacia un nodo "B" es el mismo costo si se estuviese transmitiendo de "B" a "A".

c) Descripción del modelo de consumo de energía durante la recepción

El receptor puede estar activo o inactivo. Mientras se encuentre activo, él puede recibir un paquete o puede estar observando el canal y estar listo para recibir. Las diferencias entre estar recibiendo y estar esperando para recibir un paquete se pueden asumir como nulas.

El consumo de energía de la recepción ( $E_{rx}$ ) se define como:

$$E_{rx} = E_{rxelec} + E_{rcomp}$$

#### Eq 16. Consumo de energía en la recepción [3]

Donde,  $E_{rxelec}$  es la energía consumida por el dispositivo electrónico receptor y  $E_{rcomp}$  es la energía consumida por los cálculos y tomas de decisiones que debe ejecutar el receptor.

## 5. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

A continuación se presentan las fases de investigación.

### Fase I: Investigación documental

La investigación documental, se ejecutó mediante la recolección de información proveniente de fuentes bibliográficas, tesis relacionadas a WSN y material consultado en Internet. Vale acotar, que la misma puede ser consultada en el marco referencial de la investigación.

### Fase II: Diseño y evaluación preliminar de algoritmos

En esta fase se procedió a analizar los parámetros que influyen en el desarrollo de los algoritmos, en cuanto



a consumo de energía y procesamiento computacional, cuyo resultado condujo al diseño de dos algoritmos, uno con topología lineal, y el otro en árbol.

En tal sentido, se escogió realizar una topología lineal debido a que en ésta cada nodo contiene, como máximo, dos enlaces de comunicación, por esta razón se consideró que el consumo energético sería menor que en otras topologías donde existen más de dos enlaces por nodo.

Así también, cambiando un poco el enfoque del criterio de escogencia, el motivo por el cual se seleccionó el algoritmo en árbol, fue en función de obtener el menor tiempo de convergencia posible para el establecimiento de la red, ya que no existen restricciones sujetas al número de enlaces de comunicación que puede atender cada nodo.

Como se mencionó anteriormente, las dos topologías deben ser eficientes en cuanto a consumo energético y convergencia de la red. La energía que consume un nodo sensor cuando transmite la información, depende de la energía consumida por el transmisor electrónico; la energía computacional proveniente de los cálculos y toma de decisiones de los chips; la sensibilidad, ganancia y frecuencia; y la distancia requerida para llegar al nodo receptor. Con respecto al tiempo de convergencia, existen factores que influyen en la determinación de su valor, como por ejemplo: el controlador y la distancia requerida. Por estas razones, para poder medir el consumo energético del nodo y el tiempo de convergencia se necesita el conocimiento detallado del modelo del nodo sensor que se va a emplear.

Posteriormente, se procedió al diseño de cada uno de los algoritmos, programándolos a través de la herramienta de edición del software MATLAB 7.0. El primer algoritmo diseñado fue el lineal, y para lograr el objetivo de interconectar cada uno de los nodos en una red lineal, se dividió este trabajo en tres etapas que a continuación serán explicadas.

Retomando lo expuesto, los algoritmos de topología lineal y de árbol no fueron diseñados para un modelo específico. Por tanto, para poder establecer un valor cuantitativo de potencia consumida en cada nodo y el tiempo de convergencia de la red, se procedió a definir dos parámetros, los cuales son el paso de energía consumida y el paso de tiempo de convergencia.

El paso de energía consumida por nodo es la energía que se consume cuando un nodo transmisor emite una señal a un nodo receptor, la misma está normalizada a uno (1). Por ejemplo, si un nodo "A" solicita una petición de conexión a un nodo "B" mediante la irradiación de

una señal, el nodo "A" necesitaría un paso de energía consumida para realizar dicha petición. A su vez, si el nodo "B" responde a dicha petición, de igual forma, irradia una señal requiriendo también, un paso de energía consumida.

Para definir el paso de tiempo de convergencia, primero hay que explicar en qué consiste un tiempo de conexión lógica y un tiempo de conexión física. El tiempo de conexión lógica es la medida de tiempo que existe desde que un nodo emisor transmite una señal hasta que el nodo receptor la escucha. Por el contrario, el tiempo de conexión física, es aquel tiempo requerido para que se establezca un enlace de comunicación entre dos nodos, es decir, es la suma de tiempos de conexión lógica que permiten formar un enlace de comunicación. Al igual que en el caso de la energía consumida, el tiempo de conexión tanto lógica como física, son normalizados a uno (1).

Ahora bien, el paso de tiempo de convergencia es la sumatoria de los tiempos de conexión lógica totales en la red.

Para que se establezca una conexión física entre dos nodos sensores, el nodo transmisor emite una señal de petición al nodo receptor, por tanto le debe tomar un paso de energía consumida. A su vez, el nodo receptor lo escucha y le responde enviando una señal, para ello el nodo receptor también debe utilizar un paso de energía consumida. Finalmente, el nodo transmisor se conecta al nodo receptor, gastando un paso de energía consumida.

Por tanto, el paso de energía necesario para que se pueda establecer un enlace de comunicación entre un nodo transmisor y un nodo receptor, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$PECe = 2 \times PECt + PEC$$

#### **Eq17. Ecuación general del paso de energía para establecer un enlace.**

Donde  $PECe$  es el paso de energía consumida en un enlace,  $PECt$  es el paso de energía consumida en el transmisor y  $PECr$  es el paso de energía consumida en el receptor.

##### a) Topología lineal

Fue elaborado en las tres etapas siguientes:

- Primera Etapa

En esta primera etapa del diseño, el algoritmo es capaz de realizar sistemáticamente las siguientes tareas:

- i.1) Genera, en una ubicación aleatoria, la distribución de los nodos sobre una superficie de dimensiones especificadas por el usuario.

i.2) Selecciona el nodo raíz que cumplirá, dentro de la topología, las funciones de nodo colector. El criterio tomado dentro del algoritmo para la selección del nodo raíz, fue tomar el nodo de menor coordenada en el eje de las abscisas.

i.3) Conexión del nodo más cercano. Esta tarea, se ejecuta siguiendo los siguientes procedimientos:

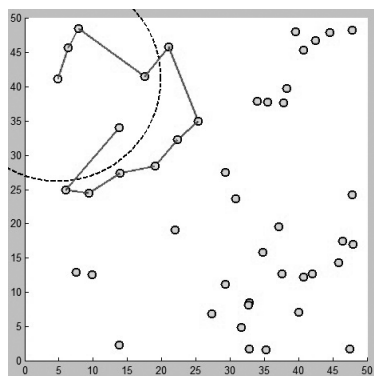
i.3.1) El nodo raíz envía a su máxima cobertura una señal preguntando qué nodos están dentro de su rango de cobertura que aún no se han conectados.

i.3.2) Aquellos nodos que escuchen esta señal harán el cálculo de distancia entre ellos y el raíz utilizando la potencia recibida, y le responderán enviándole la distancia calculada.

i.3.3) De acuerdo a las distancias recibidas, el nodo raíz decidirá conectarse con el nodo más cercano.

El nuevo nodo conectado con el raíz, será denominado nodo líder y éste realizará los pasos "i.3" tomando el lugar del nodo raíz

Así pues, se irán conectando cada uno de los nodos, hasta llegar el momento en el que el nodo líder al enviar una señal de petición a su máxima cobertura, no encontrará respuesta de ningún otro nodo no conectado. Este nodo es identificado por el algoritmo como "*nodo final*". En este instante culmina la etapa 1, donde por lo general un grupo de nodos quedan conectados y otro grupo permanece aún sin conexión. Ver *Figura 1*.



**Figura 1. Etapa 1 del algoritmo lineal (Fuente Autores)**

i.3.4) El nodo final envía un mensaje hacia atrás, informando que ya se completó la etapa 1. A su vez, los demás nodos lo van retransmitiendo, hasta llegar al nodo raíz. Esta información consta de una tabla compuesta por campos que describen e identifican cada nodo, tales como: número ID, número de secuencia, número aislado y número de anillo. Esta tabla se encuentra guardada en la base de datos de cada nodo.

El número ID, es un código serial único dado por el fabricante, usado para identificar al nodo dentro de la red.

El número de secuencia, es el asignado a cada nodo a medida que se va integrando a la red.

El número aislado, es el que indica a los nodos que no se conectaron, cuanto deben esperar para hacer su petición de conexión.

El número de anillo, es el asignado a todos los nodos para indicarles en qué iteración de la etapa 2, van a lograr conectarse a la red. Este número se asigna a los nodos no conectados a partir de cero en adelante. Aquellos nodos que alcanzaron conectarse en la etapa 1, tienen como número de anillo el cero.

Esta tabla al llegar al nodo raíz, tendrá las actualizaciones agregadas por todos los nodos conectados, por ende el nodo raíz tendrá la tabla más completa. Éste debe hacerla llegar a todos los demás nodos, para que estén enterados de la situación de la red, antes de comenzar la etapa 2.

i.3.5) Desde el nodo raíz hasta el nodo final, se va a transmitir un mensaje de máxima cobertura con la información contenida en la tabla de red actualizada. Lo que se busca en estas transmisiones, es que los nodos que se encuentran en el anillo 1, también reciban la tabla completa y realicen el cálculo del tiempo que deben esperar para realizar su petición de conexión, en base a los números de secuencia y al número aislado.

- Segunda etapa: Conexión de nodos aislados.

En esta segunda etapa se llevan a cabo un conjunto de conexiones de aquellos nodos que no se lograron conectar durante la etapa 1. A continuación se muestran estos procedimientos:

ii.1) Cada uno de los nodos ubicados en el anillo 1, se conectan a la red de la siguiente manera:

ii.1.1) El nodo no conectado dentro del anillo 1 con menor número aislado, envía a su máxima cobertura una señal de petición de conexión a los nodos conectados.

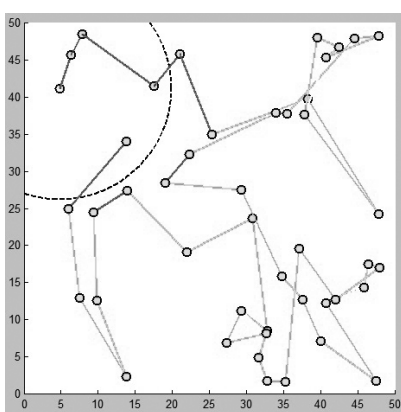
ii.1.2) Los conectados que escuchan esta petición, calculan la distancia y la envían como respuesta al nodo que hizo la petición.

ii.1.3) El nodo no conectado, tomando como criterio las distancias recibidas, establece dos enlaces de conexión. Uno, hacia el nodo conectado más cercano; y el otro, hacia el nodo anterior o posterior conectado al nodo más cercano, dependiendo de cuál de los dos se encuentre a menor distancia.

ii.1.4) Se elimina el enlace existente entre el nodo seleccionado más cercano y su anterior o posterior.

El conjunto de pasos "ii.1", se ejecutan una y otra vez de manera secuencial, y de este modo se van conectando todos los nodos del anillo 1, siguiendo el orden asignado por el número aislado de cada nodo. Una vez conectados todos los nodos del anillo 1, el nodo final procede a informar a toda la red y a los nodos no conectados del anillo 2, acerca de la culminación de la conexión total del anillo 1, por medio de los pasos "i.3.4 e i.3.5".

Este ciclo es realizado varias veces, hasta conectar todos los nodos ubicados en los anillos superiores, es decir, hasta que llegue el momento en el que se ejecute el paso "i.3.4", y no se consiga ningún nodo no conectado alcanzable por la red, como se muestra en la *Figura 2*.



**Figura 2. Conexión de todos los nodos de algoritmo lineal (Fuente Autores)**

Finalizando la etapa 2 del algoritmo, la información actualizada es transmitida desde el nodo raíz, hacia adelante, pasando por todos los nodos conectados hasta llegar al nodo final. Éste recibe la información y automáticamente entiende que debe comenzar la ejecución de la etapa 3 o etapa final de optimización, que a continuación se presenta.

- Tercera etapa: Optimización.

Como su nombre lo indica, esta última etapa se encarga de optimizar al máximo los enlaces de la red, con el propósito de reducir el tamaño de los enlaces, estableciendo la conexión más eficiente y de esta manera impulsar el ahorro energético. En esta etapa se eliminan los enlaces cruzados, ya que generan interferencia durante la transmisión de datos, porque se asume que trabajan a la misma frecuencia. Los pasos en esta etapa del algoritmo son los siguientes:

iii.1) Partiendo del nodo final, y recorriendo hacia atrás cada nodo conectado hasta llegar al nodo posterior del raíz, se evalúan sus enlaces actuales y su posible optimización. Dicha evaluación consta de las siguientes tareas:

iii.1.1) Se envía una señal de cobertura máxima, sólo tomando en cuenta las respuestas de los nodos ubicados hacia atrás del nodo que se está evaluando.

iii.1.2) Se reciben las respuestas con las distancias de los nodos conectados dentro del rango de cobertura.

iii.1.3) Si al evaluar, se observa que existe una nueva conexión posible (el consumo de energía promedio de los enlaces es menor a la consumida por los enlaces actuales), se realiza la optimización cambiando los enlaces. De lo contrario, si no existe optimización posible, se mantendrán operativos los enlaces actuales.

iii.2) Se envía un mensaje al nodo vecino anterior conectado, indicándole que es su turno de realizar la optimización.

Este ciclo completo de optimización, se lleva a cabo tantas veces como niveles de optimización especifique el usuario.

iii.3) Al completarse los ciclos de optimización de los enlaces, cada nodo, de acuerdo al enlace por donde desea transmitir, adapta el nivel de potencia de transmisión al mínimo necesario para que la señal sea recibida con claridad por su correspondiente nodo vecino. Esta adaptación se lleva a cabo a través de cálculos de potencia, donde se toman en cuenta una serie de variables, tales como: distancia, potencia de recepción, frecuencia de operación, ganancias de transmisión y recepción, y asumiendo la existencia de línea de vista entre los dispositivos. Gracias a esta adecuación de la potencia, no se estará transmitiendo a la cobertura máxima, consiguiendo así un ahorro importante en el consumo energético en cada nodo.

De este modo, se termina la etapa 3 del algoritmo, logrando establecer por completo la topología de red lineal.

#### b) Topología en árbol

El diseño de topología en árbol fue construido a través de dos etapas, detalladas a continuación.

- Primera etapa: Nodo raíz comienza establecimiento de enlaces.

En esta primera etapa el algoritmo realiza los siguientes pasos:

i.1) Generación aleatoria de los nodos en cuanto a su ubicación sobre un área especificada en  $m^2$ .

i.2) Escogencia del nodo raíz (nodo colector). Del mismo modo que en el desarrollo de la topología lineal, se seleccionó el nodo de menor coordenada en el eje de las abscisas.

Es importante hacer énfasis en dos herramientas de gran utilidad, que son empleadas en el algoritmo de árbol para lograr la conexión eficiente de todos los nodos. Éstas son dos tablas con funciones específicas, guardadas en la base de datos de cada nodo. Las mismas son denominadas: tabla de distancias y tabla de conexiones.

La tabla de distancias es una matriz cuadrada que contiene las distancias en metros, existente entre cada nodo y los demás nodos ubicados dentro de su radio de cobertura. Los nodos inalcanzables por un nodo específico serán identificados con el número cero en la tabla de distancias. Por su parte, la tabla de conexiones, es una matriz cuadrada contenida de variables *booleana-binarias*, donde se expresa con uno (1) aquellos pares de nodos donde exista un enlace de conexión, y con cero (0) los pares de nodo no conectados.

Tanto la tabla de distancias, como la tabla de conexiones, se van actualizando automáticamente a medida que se realizan nuevas conexiones en la red. Vale destacar, que siempre el nodo líder o último nodo alcanzado, tendrá las tablas que contienen la información más actualizada. Esto se debe, a que él conoce la información de toda la red, más la información de aquellos nodos no conectados que están en su cobertura y que aún no han sido integrados a la red.

i.3) Conexión del nodo raíz con el nodo más cercano. Para desarrollar esta tarea se procedió a ejecutar los siguientes pasos:

i.3.1) El nodo raíz transmite a su máxima cobertura una señal, preguntando cuáles nodos, que no están conectados, se encuentran dentro de su radio de cobertura.

i.3.2) Los nodos que escuchan esta señal calcularán la distancia entre ellos y el raíz utilizando la potencia recibida; para luego enviar las respuestas de dicha petición. En consecuencia, el nodo raíz va registrando en una tabla los valores de dichas distancias con cada nodo alcanzable.

i.3.3) Almacenando los valores de las distancias de los nodos dentro de su cobertura, el nodo raíz procede a elegir el más cercano para conectarse.

i.3.4) Una vez conectado, registra el enlace en la tabla de conexiones; y al mismo tiempo, el nodo raíz le envía la tabla de distancias y la tabla de conexiones al nodo enlazado.

El nuevo nodo conectado con el nodo raíz, será llamado nodo líder, y éste será el responsable de tomar las nuevas decisiones de conexión. Para ello, desarrollará el análisis descrito a continuación.

- Segunda etapa: Creación de conexiones en forma de árbol.

ii.1) El nodo líder envía a su máxima cobertura una señal preguntando cuáles nodos no conectados lo pueden escuchar.

ii.2) Los nodos que escuchan, calculan la distancia entre ellos y el nodo líder, con ello cada nodo le responde enviando su distancia.

ii.3) Teniendo los valores respectivos de las distancias, el nodo líder los almacena, identificando el nodo ubicado a menor distancia. Dicha distancia será denominada "Menor Distancia Alcanzable" (MDA).

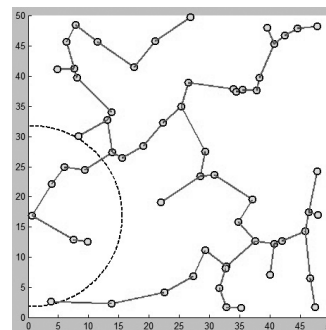
ii.4) Posteriormente, el nodo líder busca en su tabla de distancias el menor valor, sin tomar en cuenta el enlace de la MDA. Este valor de distancia será denominado "Menor Distancia Registrada (MDR)".

ii.5) Pueden darse dos posibles casos de conexión, tal como se muestra a continuación:

Caso #1: Si la distancia MDA es menor a MDR, el nodo líder establece conexión con el nodo no conectado más cercano, enviándole sus tablas de distancias y de conexiones actualizada.

Caso #2: Por el contrario, si el valor de MDR es menor al de MDA, el nodo líder evalúa la tabla de conexiones verificando que el nodo no se encuentra conectado, a fin de validar que no exista enlace. De este modo, el nodo líder enviará a través de la red, un paquete indicando el *número ID* del nodo que debe conectarse. Cuando esta información llega hasta el nodo correlativo al *número ID* buscado, éste establece el nuevo enlace hacia el nodo no conectado más cercano, y al igual que en el caso #1, se le envía la tabla de distancias y de conexiones actualizada,

ii.6) Una vez establecida la conexión, el nuevo nodo conectado a la red pasará a ser el nodo líder, ejecutando las funciones propias de dicho nodo y llevando a cabo los pasos del establecimiento de la conexión "ii" de manera sucesiva, hasta formar la topología completa con todos los nodos. Ver *Figura 3*.



**Figura 3. Conexión de todos los nodos en el algoritmo de árbol (Fuente Autores)**

ii.7) Una vez completada la topología en árbol, el último nodo conectado envía un paquete al nodo raíz, informando que ha culminado el establecimiento de la conexión en todos los nodos alcanzables.

ii.8) Como último paso, al igual que en la topología lineal, cada nodo adapta su potencia de transmisión, dependiendo del enlace por el cual desea enviar información. Aquellos nodos que queden en los extremos u hojas del árbol, y por consiguiente, sólo tienen un enlace para transmitir, realizarán la adaptación de potencia de manera permanente. Estos ajustes en el nivel de potencia de transmisión de cada nodo, tienen como propósito optimizar al máximo la red en materia de consumo energético, prolongando así el tiempo de vida de la misma.

#### c) Implementación del simulador de WSN

La realización de un simulador permite efectuar una evaluación preliminar del rendimiento general de cada algoritmo bajo las mismas condiciones.

Hay dos parámetros resaltantes, en función de los cuales serán probados tanto el algoritmo lineal, como el de árbol. Estos son: los pasos de energía promedio requerida por cada nodo y la cantidad de pasos de tiempo requeridos para la convergencia de la red. Ambos medidos desde el instante en el que el nodo raíz hace su primera petición, hasta que queda establecida completamente la red.

El simulador de WSN, ofrece al usuario una interfaz gráfica que le permite interactuar en la simulación. El usuario puede ingresar el valor de las principales variables necesarias para la generación de los algoritmos. Estas variables son: la cantidad de nodos con los que se desea formar la red; la dimensión del área donde van a estar distribuidos los nodos; el radio de cobertura máxima de cada nodo y el número de iteraciones de optimización que se quieren realizar. Este último campo sólo afecta al algoritmo lineal.

Existen dos botones identificados con los nombres "GENERAR" y "SALIR". Al ejecutar un clic en el botón de "SALIR", se cierra la interfaz gráfica. Por otra parte, al presionar el botón "GENERAR", se leen las variables insertadas por el usuario y se plasman los nodos en la misma ubicación para ambos algoritmos aleatoriamente. Luego de generar la totalidad de los nodos, se comienzan a crear los enlaces de acuerdo a los parámetros de cada algoritmo.

También, posee un histograma que permite conocer cuántos pasos de energía fueron requeridos por cada nodo para lograr establecer la topología de red. Adicionalmente, se muestra el valor de los pasos de potencia

promedio consumida por nodo, y el valor de la cantidad de pasos de tiempo de convergencia de la red.

## 6. RESULTADOS

En esta fase se realizaron una serie de pruebas de manera repetitiva, a fin de construir una base sólida apoyada en la estadística, sobre la cual se puedan evaluar y comparar la eficiencia de los algoritmos lineal y de árbol.

Para realizar dichas pruebas se definieron modelos matemáticos ideales que permiten representar los pasos totales de energía consumida y los pasos de tiempo de convergencia de la red.

### 1) Modelos matemáticos

La ecuación mostrada a continuación desglosa los parámetros de energía requerida para establecer un enlace lógico.

$$E_L = E_{Tx} + E_{Rx} + E_C + E_A$$

#### Eq 18. Energía requerida para establecer un enlace lógico.

Donde  $E_L$  es la energía consumida en un enlace lógico,  $E_{Tx}$  es la energía circuital consumida en el transmisor,  $E_{Rx}$  es la energía circuital consumida en el receptor y  $E_C$  es la energía computacional consumida.  $E_A$  es la energía consumida en el amplificador. Esta energía está asociada a la distancia entre el transmisor y el receptor, sin embargo para el establecimiento de la red esta distancia será equivalente al radio máximo de cobertura de los nodos.

La siguiente ecuación muestra la energía requerida para establecer un enlace físico. Este proceso consta de tres partes: la primera, el nodo líder envía una petición de conexión; la segunda, los nodos que escuchan responden enviando la distancia hasta el nodo líder; y por último, el nodo líder selecciona el nodo ubicado a la menor distancia para establecer la conexión.

$$E_F = 3 \times E_L + E_N$$

#### Eq 19. Energía requerida para establecer un enlace físico.

Donde  $E_F$  es la energía consumida en un enlace físico.

$E_N$ =Energía consumida por los otros nodos con los que no se estableció enlace.

Tomando como base las dos ecuaciones anteriores se definieron los modelos matemáticos para cada algoritmo.

a) Modelo matemático de algoritmo lineal

El modelo asociado a los pasos de energía total consumida por toda la red es el siguiente:

$$E_T = \sum_{i=1}^C E_F = E_F \times C$$

**Eq 20. Pasos de energía total consumidas en la red en topología lineal.**

Donde  $E_T$  son los pasos totales de energía consumida por la red y  $C$  es la cantidad total de enlaces físicos establecidos.

Para realizar el cálculo de  $C$  se debe conocer la cantidad de enlaces físicos originados en cada una de las etapas del algoritmo.

$$C_1 = Q - 1$$

**Eq 21. Cantidad de enlaces físicos en la etapa 1.**

$$C_2 = (n - Q) \times 3$$

**Eq 22. Cantidad de enlaces físicos en la etapa 2.**

$$C_3 = \sum_{i=1}^T (M + 4N)$$

**Eq 23. Cantidad de enlaces físicos en la etapa 3.**

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

**Eq 24. Cantidad de enlaces totales del algoritmo lineal.**

Donde  $C_1$  es la cantidad de enlaces físicos establecidos en la etapa 1 del algoritmo, es decir, la suma de todos los enlaces físicos desde el establecimiento de la primera conexión por el nodo raíz hasta la última conexión que realice el nodo líder porque no encuentra más nodos en su cobertura.  $C_2$  es la cantidad de enlaces físicos establecidos en la etapa 2 del algoritmo, es decir, la suma de enlaces de los nodos que no pudieron conectarse en la etapa 1 (conexión de nodos aislados).  $C_3$  es la cantidad de enlaces físicos establecidos en la etapa 3 del algoritmo, es decir, la suma de todos los enlaces ejecutados para la optimización.  $Q$  es el número de nodos conectados en la etapa 1.  $n$  es el número total de nodos.  $M$  es el número de enlaces no cambiados en la optimización.  $N$  es el número de enlaces cambiados en la optimización y  $T$  es el nivel de optimización.

El modelo asociado a los pasos de tiempo de convergencia de la red es el siguiente:

$$T_T = \sum_{i=1}^{3C} T_C = T_C \times 3C$$

**Eq 25. Pasos de tiempo de convergencia de la red en algoritmo lineal.**

Donde  $T_T$  son los pasos totales de convergencia de la red.  $T_C$  son los pasos de tiempo requeridos para establecer un enlace físico. Por último, El coeficiente 3 de la variable  $C$  representan los tres pasos de tiempo requeridos para establecer un enlace físico.

Modelo matemático de algoritmo de árbol

El modelo correspondiente a los pasos de energía total consumida por toda la red es el siguiente:

$$E_T = \sum_{i=1}^C (E_F + E_L \times S)$$

**Eq 26. Pasos de energía total consumida en topología de árbol.**

Donde  $S$  es el número de saltos desde el nodo líder hasta el nodo que va a establecer conexión a través del caso #2.

En este modelo, el valor de  $C$  viene dado por la siguiente ecuación:

$$C = n - 1$$

**Eq 27. Cantidad de enlaces físicos en topología de árbol.**

El modelo correspondiente a los pasos de tiempo de convergencia de la red es el siguiente:

$$T_T = \sum_{i=1}^C (T_C + T_L \times S)$$

**Eq 28. Pasos de tiempo de convergencia de la red en topología de árbol.**

Donde  $T_L$  es el paso de tiempo consumido durante el establecimiento de un enlace lógico.

## 6.2 Cantidad de niveles de optimización de algoritmo lineal

Las primeras pruebas se realizaron en función de buscar la mínima cantidad de niveles de optimización en el algoritmo lineal, que aseguren una alta probabilidad de que la topología de red sea establecida, sin la aparición de enlaces cruzados. Es preciso recordar que en la medida que se ejecutes más iteraciones de optimización, cada nodo consume más energía y se suman más pasos de tiempo, que retardan la convergencia de la red.

En función de estas ideas, es necesario hallar el número de iteraciones más óptimo. Para hallar dicho número se realizó lo siguiente:

Se simuló 90 veces el algoritmo lineal, variando las condiciones de simulación, para observar cuál era el

número máximo de iteraciones que necesitaban las diversas redes para eliminar por completo la existencia de enlaces cruzados. El número máximo conseguido fue 7.

Una vez conocido este valor, y dejando una guarda de 3 niveles, se procedió a simular muchas veces el algoritmo lineal con 10 niveles de optimización, a fin de desarrollar el siguiente estudio estadístico:

Se tomaron para el estudio, 90 simulaciones de 70 nodos cada una, y como se dijo anteriormente, en cada simulación se utilizaron 10 iteraciones de optimización. Este grupo de grupo de 90 simulaciones, fue subdividido en tres subgrupos de 30 simulaciones cada uno. Esta subdivisión se realizó para poder trabajar con lo que se denominó como “pasos de cobertura”.

Los pasos de cobertura representan la relación existente entre la dimensión del área donde son distribuidos los nodos y el radio de cobertura máxima de los nodos. Pensando en esto, fueron escogidos tres pasos de cobertura diferentes a fin de comprobar si esta relación tenía algún tipo de influencia sobre el valor del mejor nivel de optimización. Los pasos de cobertura escogidos para estudiar cada subgrupo de simulación teniendo como área de  $60 m^2$  fueron:  $1/4$  con una cobertura de  $15 m$ ,  $1/2$  con una cobertura de  $30 m$  y  $1/1$  con una cobertura de  $60 m$ .

Posteriormente, se colocó una variable vectorial de dimensión 10 dentro de la etapa 3 del algoritmo lineal, que permitió medir la cantidad de pasos de energía consumidos en cada optimización. Este proceso se realizó con el fin de obtener cuál es el nivel de optimización apropiado en cada simulación aleatoria. Este nivel puede ser identificado con facilidad, observando los valores arrojados en el arreglo vectorial, una vez compilado el algoritmo ya que cada campo del arreglo representa la potencia consumida en esa iteración de optimización. Entonces, el número de iteración o campo donde comience una a repetirse el valor de energía consumida, es el nivel de optimización más eficiente.

Una vez culminadas las pruebas antes mencionadas se pudo concluir que los pasos de cobertura no influyen en la selección del mejor nivel de optimización, y además, que el nivel número 4 es el más recomendable, ya que representa el punto de equilibrio entre una topología optimizada y el ahorro energético. Es por ello que en las próximas pruebas, donde se comparan los resultados de los algoritmos lineal y de árbol, se utiliza el valor 4 en los niveles de optimización del algoritmo lineal.

### 6.3 Comparación de los algoritmos lineal y de árbol, en cuanto al consumo de pasos de energía requeridos por nodo para el establecimiento de la red.

En esta parte de la investigación, lo que se buscó fue conocer mediante la ejecución de muchas simulaciones, un valor promedio que sea aproximado a la cantidad de pasos de energía requerida por cada nodo de la red, para completar el establecimiento topológico.

Se decidió trabajar con tres pasos de cobertura diferentes, a fin de saber como influían estos en la cantidad de energía demandada por los nodos. En cada paso de cobertura se realizaron 50 simulaciones, es decir, se hicieron un total de 150 simulaciones. En cada una de ellas se seleccionó la cantidad de 70 nodos, un área de  $60 m^2$ , 4 niveles de optimización en el algoritmo lineal y la cobertura máxima de cada nodo, la cual depende del paso de cobertura donde se esté simulando.

Los pasos de cobertura, al igual que en el punto anterior, son  $1/4$ ,  $1/2$ , y  $1/1$ , adoptando así, una máxima cobertura de  $15$ ,  $30$  y  $60 m$  respectivamente.

De cada simulación, se extrajeron los pasos de energía consumidos por cada nodo en ambos algoritmos. Se calculó el promedio de pasos de energía consumida, pero por la condición aleatoria de la ubicación de cada nodo, no se puede tomar como base una sola simulación. Es esta la razón por la cual se realizaron 50 simulaciones en cada paso de cobertura y de éstas se hizo un promedio global de la energía consumida por cada nodo de la red. Este promedio global se graficó, a fin de mostrar con claridad los resultados, que reflejan la diferencia existente en el consumo energético de ambos algoritmos. A continuación, se describe el resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de  $1/4$ .

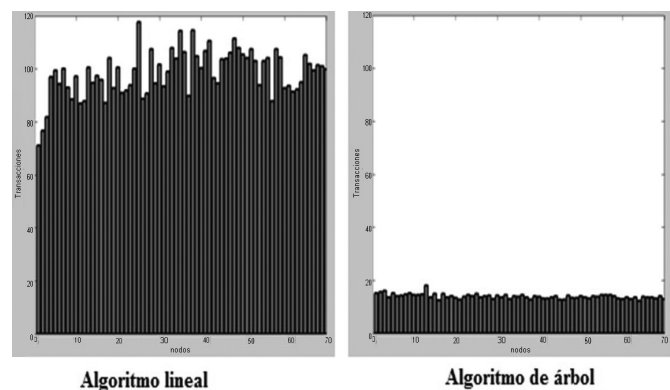
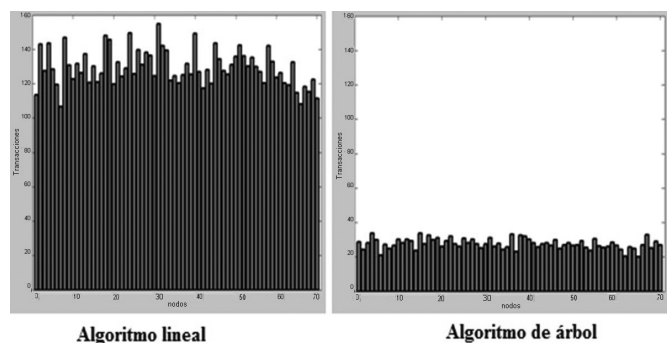


Figura 4. Resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de  $1/4$  (Fuente Autores)

El promedio global de todos los nodos en algoritmo lineal fue de 98 pasos de energía, valor mayor al promedio global en el algoritmo de árbol, donde se obtuvieron sólo 14 pasos.

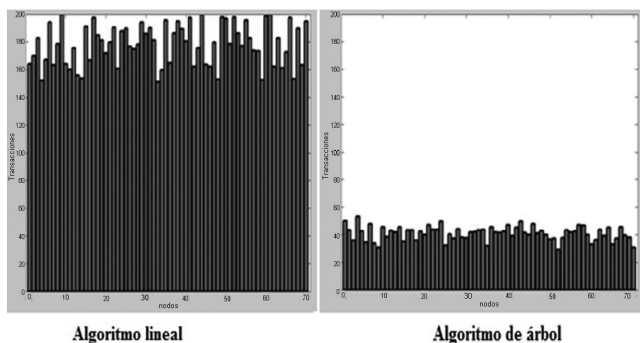
En la próxima figura, se describe el resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de 1/2.



**Figura 5. Resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de 1/2 (Fuente Autores)**

En este caso, el promedio global de todos los nodos en algoritmo lineal fue de 129 pasos de energía, mientras que en el de árbol se obtuvo un promedio global de 28 pasos.

En la *Figura 6* se describe el resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de 1/1.



**Figura 6. Resultado de la energía promedio consumida en el paso de cobertura de 1/1 (Fuente Autores)**

En este último caso, el promedio global de todos los nodos en algoritmo lineal fue de 183 pasos de energía. A su vez, en el algoritmo de árbol se obtuvo un promedio global de 42 pasos de energía.

A continuación se presenta una tabla con los resultados del promedio de los pasos de energía de todos los nodos en cada paso de cobertura.

**Tabla 1. Comparación de algoritmos con respecto al consumo energético promedio por cada nodo (Fuente Autores)**

Paso de Cobertura	Algoritmo Lineal	Algoritmo de Árbol
1/4	98	14
1/2	129	28
1/1	183	42

Es claro notar, que los resultados conseguidos, apuntan directamente a que el consumo promedio de un nodo en el algoritmo de árbol, es mucho menor que en el algoritmo lineal, independientemente del paso de potencia que se adopte. Se aprecia además, que a medida que se aumenta el paso de cobertura, aumenta el consumo de los nodos en ambos algoritmos, lo cual es lógico, ya que a mayor cobertura, las peticiones de conexión y optimización serán escuchadas por más número de nodos y estos responderán dichas peticiones.

**6.4 Comparación de los algoritmos lineal y de árbol, en cuanto al consumo de pasos de energía requeridos por toda la red para lograr el establecimiento topológico.**

En esta última prueba, se realizó un estudio general de la red para comparar, en los tres pasos de cobertura evaluados anteriormente, los pasos de potencia consumida por toda la red, y los pasos de tiempo de convergencia de la misma, para cada algoritmo.

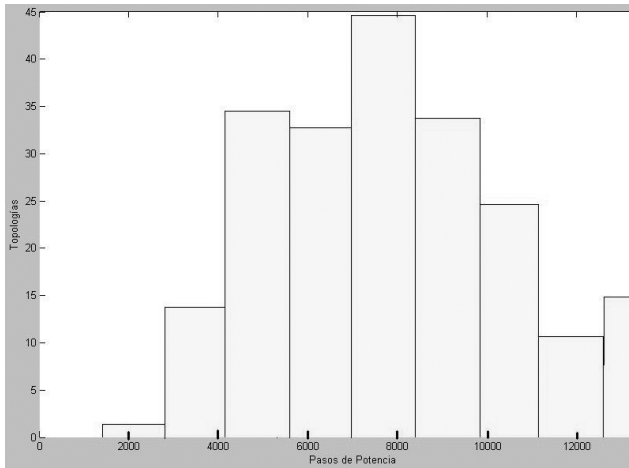
En dicho estudio, se ejecutaron 200 simulaciones para cada paso de cobertura, se evaluó el rendimiento y estabilidad de los algoritmos, mediante la creación de gráficas de distribución de frecuencias. Para ello, se tomó el mayor de los valores hallados, referente a los pasos de potencia consumidos por toda la red, y a los pasos de tiempo de convergencia topológica. Luego, los rangos de valores entre cero y el valor máximo de los pasos energía y tiempo (redondeado a un valor próximo divisible entre 10), fueron divididos en 10 intervalos, y se contabilizó con qué frecuencia las 200 simulaciones coincidían en los distintos intervalos.

Las simulaciones, al igual que en las pruebas anteriores, se llevaron a cabo con una cantidad de 70 nodos, un área de 60 m<sup>2</sup>, y 4 niveles de optimización para el algoritmo lineal.



a) Resultados obtenidos para el paso de cobertura de 1/4:

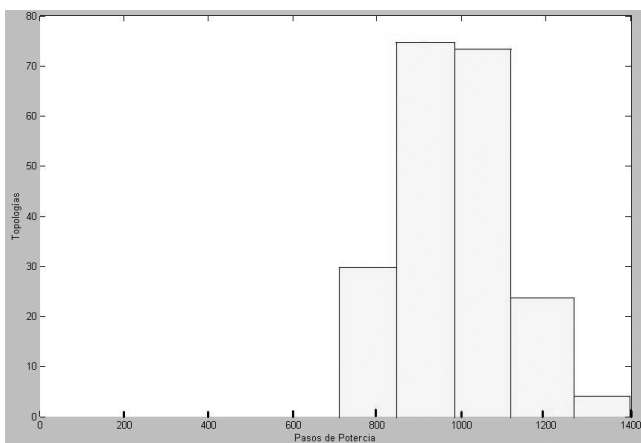
En la topología lineal, el mayor valor de potencia consumida fue de 13680 pasos, y la distribución de frecuencias de las 200 topologías se muestra en la siguiente figura:



**Figura 7. Distribución de frecuencia de energía consumida para el paso de cobertura de 1/4 en algoritmo lineal (Fuente Autores)**

Como se observa, el intervalo de potencia con la mayor frecuencia topológica, es el comprendido entre 7000 y 8400 pasos de energía; y alrededor de éste, se van disminuyendo progresivamente los valores de distribución.

En la topología de árbol, se obtuvo un valor máximo de consumo energético de 1346 pasos, y la distribución de frecuencias resultante fue la que se presenta a continuación:



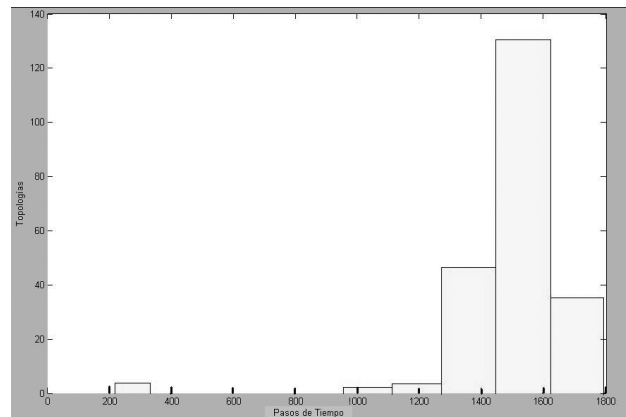
**Figura 8. Distribución de frecuencia de energía consumida para el paso de cobertura de 1/4 de algoritmo de árbol (Fuente Autores)**

Se puede apreciar, que existen dos intervalos consecutivos que presentan las mayores frecuencias, estos son los comprendidos entre 840 y 980, y entre 980 y 1120 pasos de energía.

En base a estas gráficas, se realizó una comparación del consumo energético y la estabilidad entre los dos algoritmos en el paso de cobertura presente (1/4), obteniendo que el algoritmo de árbol consume mucho menos potencia que el algoritmo lineal, durante el establecimiento de la red.

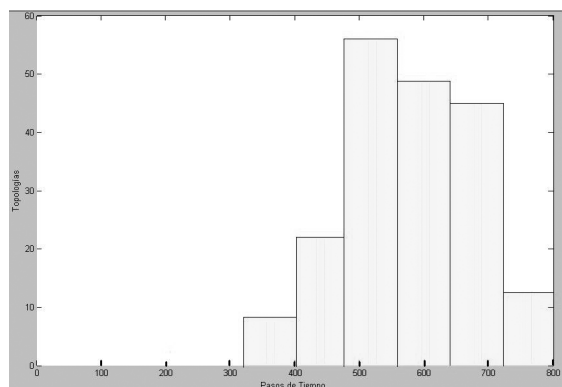
La estabilidad de los algoritmos se estudió, tomando en cuenta la diferencias de los niveles de potencia consumida en las distintas simulaciones. También puede estudiarse la estabilidad, en función de los pasos de tiempo de convergencia de la red. Gráficamente, mientras la distribución de los pasos de energía estén repartidos en más intervalos, la estabilidad será menor, y viceversa. Se pudo ver que en la red lineal, los pasos de potencia están distribuidos en 9 intervalos, mientras que en la red en árbol, la distribución se hizo en 4 intervalos, por tanto la red en árbol presenta mayor estabilidad sobre la red lineal. Luego, se realizó la comparación de los algoritmos tomando como criterio los pasos de tiempo de convergencia de la red.

El algoritmo lineal, dio como resultado el siguiente gráfico.



**Figura 9. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo de convergencia para el paso de cobertura de 1/4 en algoritmo lineal (Fuente Autores)**

Aquí se observa que la mayoría de las simulaciones, se ubicaron en los últimos tres intervalos de tiempo, en el espacio comprendido entre 1260 y 1800 pasos. En la siguiente figura se muestra la gráfica resultante en el algoritmo de árbol.



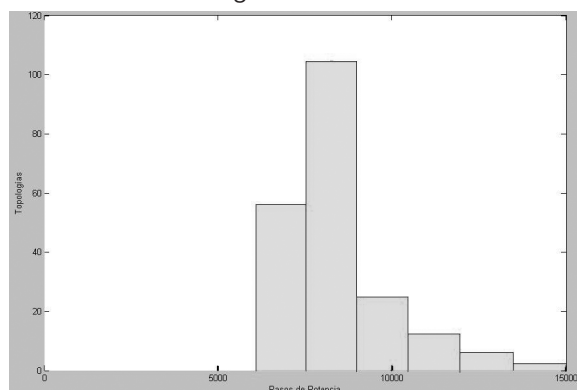
**Figura 10. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo de convergencia para el paso de cobertura de 1/4 en algoritmo de árbol (Fuente Autores)**

Se observó en esta última figura, que la mayor cantidad de simulaciones convergen en los intervalos ubicados entre 480 y 720 pasos de tiempo.

Los resultados de esta prueba evidencian que el algoritmo de árbol converge mucho más rápido que el algoritmo lineal.

Resultados obtenidos para el paso de cobertura de 1/2:

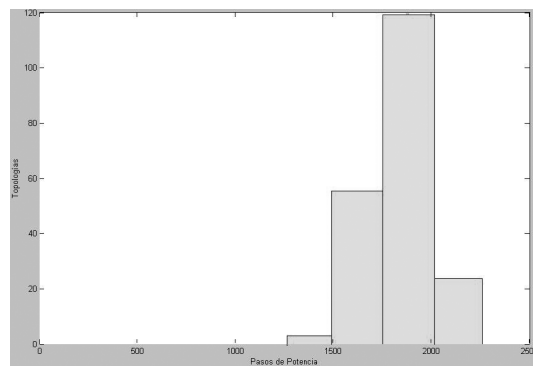
Se realizaron exactamente las mismas pruebas que en el paso de cobertura anterior, pero ahora con el nuevo paso 1/2. La distribución de energía del algoritmo lineal es la mostrada en la *Figura 11*.



**Figura 11. Distribución de frecuencia de pasos de energía consumida para el paso de cobertura de 1/2 de algoritmo lineal (Fuente Autores)**

La mayor concentración de pasos de energía, fue obtenida en los intervalos con los valores correspondientes entre 6000 y 7500, y entre 7500 y 9000 pasos de energía.

La distribución de energía del algoritmo de árbol resultó tal como se muestra más abajo, en la *Figura 12*.

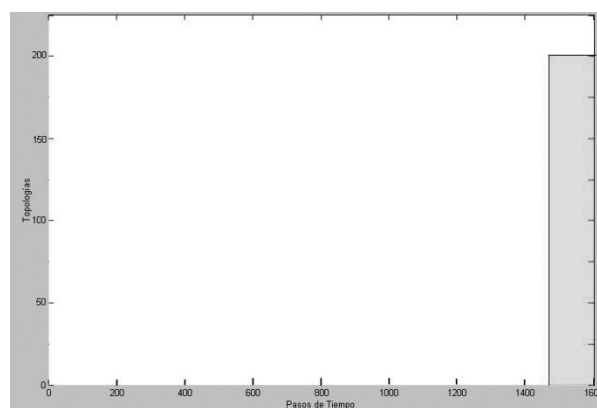


**Figura 12. Distribución de frecuencia de pasos de energía consumida para el paso de cobertura de 1/2 de algoritmo de árbol (Fuente Autores)**

Se observa que la mayor concentración de la energía, de las diversas simulaciones, se encuentra en el intervalo ubicado entre 1750 y 2000 pasos de energía.

En este resultado se puede apreciar que el algoritmo de árbol requiere menos pasos de energía que el lineal, para establecer la red. Con respecto a la estabilidad en los pasos de energía, se puede percibir que existe una igualdad en los resultados para ambos algoritmos, ya que tanto la red lineal como la de árbol, distribuyeron sus pasos de energía requerida por las 200 simulaciones, en 2 intervalos principalmente.

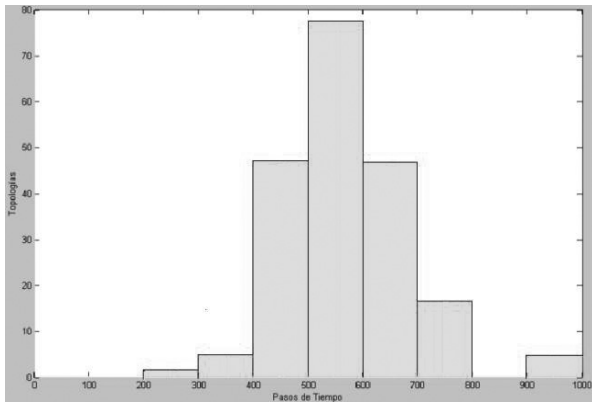
Posteriormente, se buscó la distribución de los pasos de tiempo de convergencia en cada una de las topologías, a fin de evaluar en esta área, el comportamiento de las redes lineal y de árbol. La distribución que se obtuvo con el algoritmo lineal es mostrada en la *Figura 13*.



**Figura 13. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo para el paso de cobertura de 1/2 de algoritmo de lineal. (Fuente Autores)**

Es notorio que toda la distribución de tiempo se concentró en último intervalo de tiempo, comprendido entre 1620 y 1800 pasos.

La *Figura 14* muestra la distribución de tiempos resultante en el algoritmo de árbol.



**Figura 14. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo para el paso de cobertura de 1/2 de algoritmo de árbol. (Fuente Autores)**

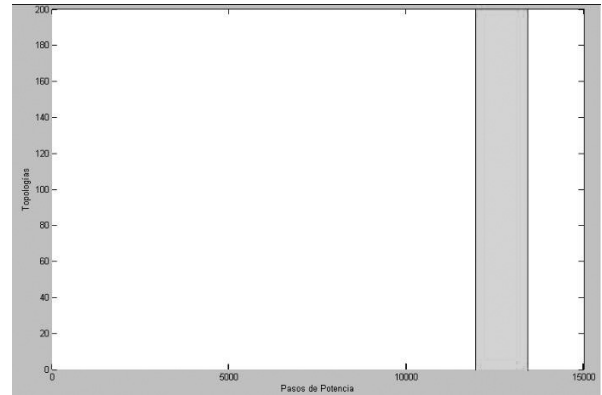
En dicho algoritmo, se puede apreciar, que la gran mayoría de los tiempos de convergencia arrojados en cada simulación, se reúnen en tres intervalos encontrados entre 400 y 700 pasos de tiempo.

Estos resultados expresan, que en el presente paso de cobertura, la red de árbol converge más rápido que la red lineal. No obstante, se observa que la topología lineal es más estable que la de árbol, en cuanto a los tiempos de convergencia.

Resultados obtenidos para el paso de cobertura de 1/1:

Al igual que en los dos pasos de cobertura anteriormente estudiados, se realizaron evaluaciones que muestran la eficiencia y rendimiento de los algoritmos lineal y de árbol. Así mismo, se llevaron a cabo 200 simulaciones en iguales condiciones que los precedentes pasos de cobertura.

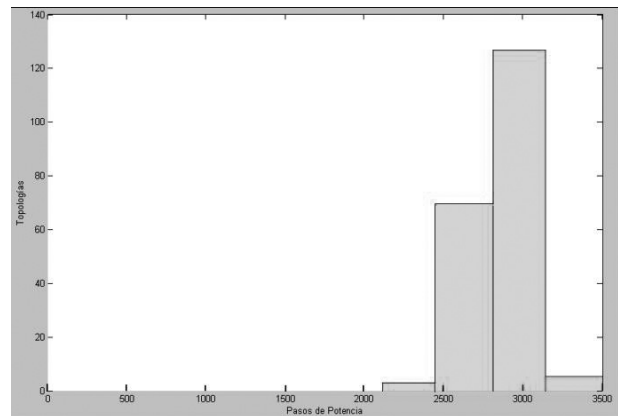
En la gráfica de la *Figura 15*, se describe la distribución de los pasos de energía de las diversas simulaciones evaluadas en el algoritmo lineal.



**Figura 15 Distribución de frecuencia de pasos de energía consumida para el paso de cobertura de 1/1 de algoritmo lineal (Fuente Autores)**

Es preciso destacar del gráfico anterior, la estabilidad que presenta el algoritmo lineal en el paso de cobertura actual; donde la energía consumida en las topologías simuladas, se concentran en su totalidad en un mismo intervalo de valores que oscilan entre 12000 y 13500 pasos de energía.

A continuación, se detalla la distribución de energía del algoritmo de árbol, mediante la *Figura 16*.

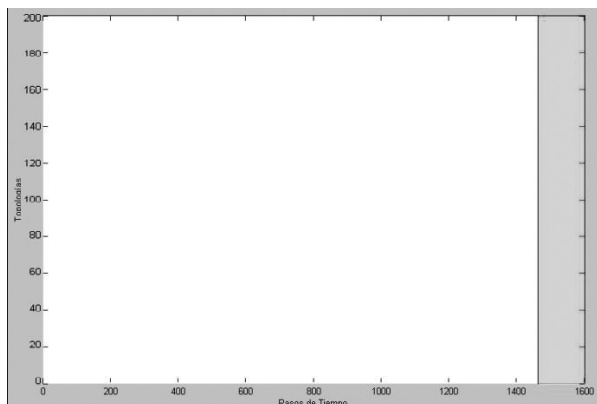


**Figura 16. Distribución de frecuencia de pasos de energía consumida para el paso de cobertura de 1/1 de algoritmo de árbol (Fuente Autores)**

En la gráfica anterior, se evidencia que los intervalos de energía más frecuentes en las diversas simulaciones, son los ubicados de forma consecutiva entre 2450 y 3150 pasos de energía. En consecuencia, el algoritmo de árbol se considera estable en cuanto a los pasos de energía.

Comparando ambos algoritmos, se observa que el consumo energético en el lineal es mucho mayor. También se destaca que a pesar de la buena estabilidad del algoritmo de árbol, no supera la estabilidad del algoritmo lineal.

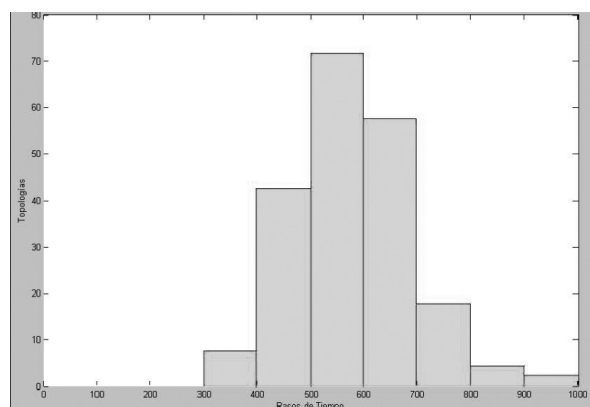
Finalmente, luego de realizar 200 simulaciones, se analizaron los pasos de tiempo necesarios para que la red converja en ambos algoritmos. Ver *Figura 16*, para topología lineal.



**Figura 17. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo para el paso de cobertura de 1/1 de algoritmo lineal. (Fuente Autores)**

Se observa que la distribución de los pasos de tiempo en el algoritmo lineal se dio en un mismo intervalo ubicado entre 1440 y 1600 pasos, lo cual indica la estabilidad del algoritmo en el paso de cobertura estudiado.

La distribución de tiempo de la topología de árbol generó la siguiente gráfica de la *Figura 18*.



**Figura 18. Distribución de frecuencia de pasos de tiempo para el paso de cobertura de 1/1 de algoritmo de árbol. (Fuente Autores)**

En esta última gráfica se puede apreciar que los pasos de tiempo son distribuidos alrededor del intervalo situado entre los 500 y los 600 pasos. De este modo, se puede afirmar que el tiempo de convergencia del algoritmo de árbol es notoriamente menor con respecto al algoritmo lineal. Pero por otra parte, la estabilidad de los pasos de tiempo es mejor en el algoritmo lineal para este paso de cobertura.

Resumiendo y comparando los algoritmos mediante el rango de pasos de energía más frecuentes en cada paso de cobertura y mediante el rango de pasos de tiempo de convergencia más frecuentes en cada paso de cobertura se obtuvieron:

**Tabla 2. Rango de pasos de energía más frecuentes en cada paso de cobertura (Fuente Autores)**

Paso de Cobertura	Algoritmo Lineal	Algoritmo de Árbol
1/4	7000-8400	840-1120
1/2	6000-9000	1750-2000
1/1	12000-13500	2450-3150

**Tabla 3. Rango de pasos de tiempo de convergencia más frecuentes en cada paso de cobertura (Fuente Autores)**

Paso de Cobertura	Algoritmo Lineal	Algoritmo de Árbol
1/4	1260-1800	480-720
1/2	1620-1800	400-700
1/1	1440-1600	500-600

Haciendo un esbozo de todos los resultados obtenidos en los tres pasos de cobertura, se puede afirmar que el rendimiento del algoritmo de árbol es más eficiente que el algoritmo lineal, ya que independientemente del paso de cobertura utilizado, arrojó mejores resultados en cuanto al consumo energético y los tiempos de convergencia de la red.

De igual modo, se observó que a medida que se iba incrementando el paso de cobertura, los dos algoritmos iban mejorando su estabilidad.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para llevar a cabo el diseño y construcción de un sistema de comunicaciones en una red inalámbrica de sensores, se deben tomar en cuenta una serie de parámetros (potencia de transmisión y de recepción, la

sensibilidad de recepción de los dispositivos, la ganancia de transmisión y de recepción de las antenas, las pérdidas de potencia de la señal dadas por atenuación en el espacio libre, y por efecto del medio ambiente en caso de climas lluviosos) que influyen, de un modo determinante, en el establecimiento de la conexión entre los nodos sensores inalámbricos distribuidos. Así mismo, la distancia de separación entre los dispositivos, es un elemento importante que afecta las decisiones durante el establecimiento de la conexión, que definirán la estructura topológica de la red.

En la evaluación de la eficiencia de algoritmos de comunicación para redes de sensores inalámbricos intervienen dos factores que describen el rendimiento de la red, éstos son: pasos de energía consumida y pasos de tiempo de convergencia de la red. De este modo se estudió el desempeño de los algoritmos lineal y de árbol diseñados.

El algoritmo de árbol es más eficiente que el lineal, ya que presenta la ventaja de no necesitar un proceso de optimización, que es indispensable en el algoritmo lineal.

El nivel de optimización más recomendable en el algoritmo lineal es el cuatro, ya que independientemente del paso de cobertura seleccionado representa un balance entre una topología optimizada y el ahorro energético.

Otro punto de estudio de los algoritmos es la estabilidad en cuanto a energía y a tiempo; la cual mejora a medida que se incrementa el paso de cobertura.

Se recomienda realizar en estudios futuros, la comparación de la eficiencia energética y computacional de algoritmos ya existentes, que han sido implementados satisfactoriamente en redes inalámbricas de sensores, con los algoritmos diseñados en la presente investigación.

A pesar de que el algoritmo lineal presenta un consumo energético y un tiempo de convergencia mayor al de árbol hasta el momento de establecerse la red completamente, se presume que éste en procesos posteriores de enrutamiento y transmisión de la data recopilada por los sensores, consume menos pasos de potencia que el algoritmo de árbol. Esta hipótesis parte del hecho de que en la topología lineal, cada nodo sólo debe atender una cantidad máxima de dos enlaces, y por ende el consumo energético será más uniforme que en las topologías de árbol, donde no tienen límite de conexiones por nodo, pudiendo un nodo tener hasta 3, 4 o más enlaces de conexión. Lógicamente, el tiempo de vida de estos nodos será más reducido que el de otro que atiendan a lo sumo 2 enlaces.

Esta investigación se encargó de la creación y evaluación de los algoritmos, sólo hasta que se establece la topología de red, sin embargo, sería interesante que con otras investigaciones futuras, se pueda evaluar y comparar el rendimiento de estos algoritmos en los procesos de la red posteriores al establecimiento topológico.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Aakvaag, N. y Frey, J.(2006). Redes de sensores inalámbricos: Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. Revista ABB, 39-42.
- [2] Lugo, J. (2004). *Design of an Energy Efficient Communication Protocol for Distributed Beamforming in Wireless Sensor Networks*. Tesi di Laurea, III Facoltà di Ingegneria Politecnico di Torino, Italia.
- [3] Karl, Holger, and Willig. Andreas, (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. (Illustrated). Publicado por John Wiley and Sons.

## 8. OTRAS REFERENCIAS

- Universidad Politécnica de Valencia, España, Departamento de Ingeniería Electrónica. (2004). *Red de sensores inalámbricos para monitorización de terrenos mediante tecnología IEEE 802.15.4*. Recuperado el 2 de diciembre de 2008. Web: [http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos\\_gandia\\_2005/articulos/SC4/563.pdf](http://w3.iec.csic.es/URSI/articulos_gandia_2005/articulos/SC4/563.pdf)
- Cook and S.K. Das, John Wiley. (2004). *Wireless Sensor Networks. F. L. LEWIS. Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*. Ed. D.J., New York. Recuperado el 22 de noviembre de 2008. Web: <http://arri.uta.edu/acs/networks/WirelessSensorNetChap04.pdf>
- E. H. Callaway, (2003). *Wireless Sensor Networks, Architectures and Protocols*. Florida: AUERBACH.
- Gralla, P. (2006). *Redes Inalámbricas, Sistema de Comunicación Inalámbrica*. Madrid: Anaya Multimedia.
- K.S.J Pister, J.M.K., B.E, Boser. (1999). *Smart Dust: Wireless Networks of Millimeter-Scale*

*Sensor Nodes*. Electronics Research Laboratory Research Summary.

- Arias, F. (1999). Proyecto de la Investigación guía para su elaboración. Caracas: Epistiane.
- Ermák, Vladimír, and Rybach, L., (2008). *Terrestrial Heat Flow in Europe: Proceedings of the 2008 IFIP Conference on Wireless Sensor and Actor Networks*. (Illustrated). Ottawa, Canada: Springer.
- Dam, T. y Langendoen, K. (2008). *An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks (T-MAC)*. Recuperado el 5 de diciembre de 2008. Web: [http://people.ee.duke.edu/~romit/courses/s08/material/T-MAC\\_An-nieZhong.pdf](http://people.ee.duke.edu/~romit/courses/s08/material/T-MAC_An-nieZhong.pdf)
- Diez, B., y Acevedo, J. (2008). *Estudios de Mecanismos de Seguridad en Redes Inalámbricas de Sensores Instaladas en la Superficie de Pozos Petroleros*. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Telecomunicaciones, Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela.
- Especificaciones de la International Telecommunication Union (UIT). <http://itu.int>
- Estándar de comunicación Zig Bee por la Zig Bee Alliance. <http://www.zigbee.org>
- Estándares del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://www.ieee.org>