

Red de sensores inalámbricos para las casas de cultivos protegidos “San José”

Lidice Romero Amondaray, Félix Manuel Piña Figueredo, María Margarita Goire Castilla

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se propone una red de sensores inalámbricos para medir en tiempo real temperatura, humedad relativa y radiación solar en las casas de cultivos protegidos “San José” de Santiago de Cuba. En estas instalaciones no se realizan estas mediciones por la falta de instrumentos. Para medir de forma automática estos parámetros se diseñó una red de 24 nodos sensores, ubicados en cada una de las casas de cultivo, y en la casa de posturas y una estación base ubicada en las oficinas de la administración del complejo, se decidió conectarlos formando una topología en *cluster-tree* y se escogieron los dispositivos de corto alcance de la plataforma *ēKo* de Crossbow. La topología *cluster-tree* asegura tolerancia a fallos, escalabilidad y eficiencia energética y los nodos *ēKo* aportan durabilidad porque las baterías son recargadas con paneles solares. Por último, se demostró en el simulador NS2 que la topología *cluster-tree* es la más adecuada para esta aplicación porque el modo de operación con balizas permite ahorrar energía de las baterías con una mejor razón de entrega de datos y latencia promedio. Este sistema de monitoreo y supervisión en tiempo real de las condiciones medioambientales en las casas de cultivo puede hacer que la producción agrícola sea más rentable y sostenible.

Palabras claves: Zigbee, Redes de Sensores Inalámbricos, Agricultura de Precisión, Monitoreo, TIC en la agricultura

In this paper, we propose a Wireless Sensors Networks for "San José" greenhouse in Santiago de Cuba to measure in real time temperature, relative humidity, and solar radiation. These measurements are not carried out in these installations due to the lack of instruments. In order to measure these variables, it was designed a network of 24 short-range ēKo sensors nodes distributed in the 24 greenhouses and 1 short range ēKo base station located in the administration office, connected in cluster-tree topology. This topology provides fault tolerance, scalability, and energy efficiency and the ēKo platform guarantees durability because the batteries are recharged with solar panels. Finally, a simulation in NS2 probed that cluster-tree topology is suitable for this application because beacon-enabled mode saves energy with a higher data delivery ratio and latency. Real-time monitoring of environmental condition will help to achieve greenhouse production of high quality and quantity

Key words: Zigbee, Wireless Sensor Networks, Precision Agriculture, Monitoring, TIC in agriculture

Wireless Sensor Network for "San José" greenhouse

1. -INTRODUCCIÓN

La agricultura a nivel mundial está influida por los nuevos paradigmas tecnológicos; por lo que es favorecida con los enormes avances en la Informática y las Comunicaciones. Con el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas hacia la agroindustria surge el concepto de agricultura de precisión, definida como el uso de un conjunto de tecnologías con el propósito de monitorear las condiciones físicas, químicas y climáticas del cultivo a fin de optimizar el uso de recursos en el proceso productivo y la calidad final de los productos, tanto de las cosechas como sus derivados.

La agricultura de precisión constituye una técnica innovadora que facilita la toma de decisiones en relación a las acciones que ameritan los cultivos para obtener mayores beneficios económicos y a la vez minimizar su impacto medioambiental. En este contexto, las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*) se presentan como una de las tecnologías con mayor auge para hacer realidad la agricultura de precisión, debido, entre otras razones, a la posibilidad de su despliegue en zonas sin infraestructura. En los últimos años, se asiste al desarrollo de numerosas aplicaciones de agricultura de

precisión basadas en esta tecnología como herramienta facilitadora. Los nodos sensores inalámbricos se alimentan normalmente con baterías o energía solar, lo que permite un fácil despliegue en el ámbito de una explotación agraria, tienen un bajo consumo, lo que permite una autonomía elevada (meses, incluso años), esto unido a su bajo costo y a las características de auto organización y autoconfiguración de la red, hacen que la tecnología sea especialmente idónea para el ámbito de aplicación agrícola. Es posible integrar varios tipos de sensores en un único nodo inalámbrico, por lo que, las condiciones del suelo y el cultivo, tales como temperatura, humedad, iluminación, entre otras pueden ser monitorizadas de forma remota y en tiempo real. Además, se puede afirmar que las redes de sensores inalámbricos proveen la flexibilidad necesaria para disminuir tiempos de instalación, recolección de datos y mantenimiento, y mayor resolución espacial y temporal en el muestreo de las variables de interés a lo alcanzable con métodos tradicionales, factores muy importantes para adaptarse a las condiciones específicas de los entornos agrícolas. Estas técnicas permiten la mejora del rendimiento y eficiencia de cultivos en explotaciones agrarias contribuyendo así al desarrollo de una agricultura sostenible [1-6].

Una de las principales áreas donde se aplica la agricultura de precisión es en las casas de cultivos protegidos. Estas instalaciones tienen como objetivo proteger a las plantas de la incidencia de la intensa radiación solar y de las fuertes lluvias propias de los países tropicales. En ellas se modifican total o parcialmente las condiciones ambientales, para que las plantas se desarrollen en un medio más favorable que el existente al aire libre [7,8].

El auge de las casas de cultivo en Cuba se inicia a partir de la transferencia de tecnologías de otros países, principalmente Israel y España. Sin embargo, teniendo en cuenta las características del clima, a los diseños originales se les incluyen modificaciones, buscando el llamado efecto sombrilla, de manera que puedan producirse hortalizas durante todo el año, y fundamentalmente en verano, en momentos en que resulta imposible lograrlo a cielo abierto [9].

El país lleva a cabo un intenso programa de desarrollo de cultivos protegidos, al que se destinan considerables recursos. Los objetivos primordiales son recuperar las capacidades existentes, y crear nuevas áreas, dotadas de la tecnología adecuada y que respondan a la demanda actual de alimentos [10].

La efectividad de los cultivos depende del conocimiento del estado de los cultivos y de la vigilancia sobre la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y otros parámetros que comprometen su rendimiento. En el complejo de casas de cultivos protegidos “San José”, de la ciudad de Santiago de Cuba, los trabajadores no realizan mediciones de los parámetros que afectan los cultivos por la falta de instrumentos. En este artículo se detalla el diseño de una WSN IEEE 802.15.4/Zigbee para las casas de cultivos protegidos “San José” en Santiago de Cuba que mide de forma automática la temperatura, humedad relativa y radiación solar.

2.- CASAS DE CULTIVOS PROTEGIDOS “SAN JOSÉ”

Las casas de cultivos protegidos “San José”, ubicadas en la provincia Santiago de Cuba, cuentan con un área total de 1.8 ha. Este complejo está conformado por 23 casas de cultivo y una casa de posturas. Como se ilustra en la Figura 1, las casas de cultivos tienen 45 m de largo y 10 m de ancho, para un área de 450 m², mientras que la casa de posturas tiene un ancho de 10 m y un largo de 15 m, para un área de 150 m². La estructura de las casas de cultivos tiene recubrimiento de nailon, mallas laterales antiafidos y apertura cenital para facilitar la ventilación. La instalación está formada por dos hileras de casas de cultivos, separadas una distancia de 40 m; la primera hilera está compuesta por 12 naves y la segunda por 11, más una casa de posturas. Las casas de cultivos están separadas a una distancia de 4 m, excepto las casas 4 y 5 y las 16 y 17, separadas a 10 m.

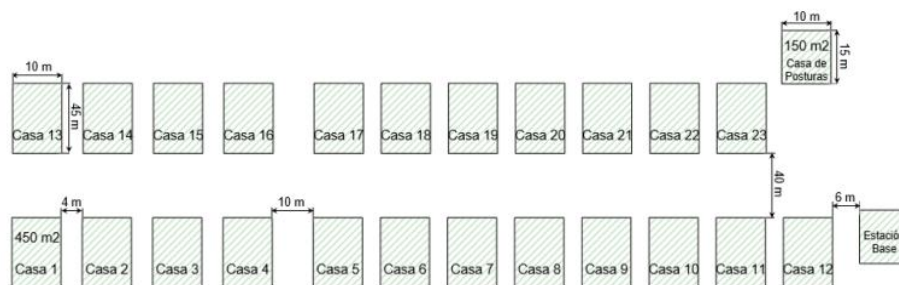


Figura 1

Vista de planta de las casas de cultivos protegidos de San José.

Entre las especies que se cosechan en “San José” están el tomate, pepino, pimiento, sandía, melón, col, lechuga, entre otros; y su destino principal es el turismo sustituyendo costosas importaciones. El desarrollo de estos cultivos está condicionado, principalmente, por tres factores: radiación solar, temperatura y humedad relativa. Estas variables deben mantenerse dentro de los rangos establecidos para asegurar el metabolismo de los vegetales [11].

La radiación solar se puede considerar el factor ambiental más importante en los cultivos protegidos pues influye en procesos relacionados con la fotosíntesis, los balances de agua y energía, y el crecimiento y desarrollo del cultivo. Para las plantas no es sólo una fuente de energía (efecto foto energético), sino que funciona también como un estímulo para los procesos de desarrollo y, en algunas regiones como en Cuba, como un factor de estrés (efecto foto destructivo). La fotosíntesis transforma la energía solar en energía química, conocida como radiación fotosintéticamente activa (RFA) que representa aproximadamente el 50 % de la radiación global incidente. Esencialmente, toda la luz visible es capaz de promover la fotosíntesis, pero las regiones de 400 a 500 y de 600 a 700 nm son las más eficaces [12].

La temperatura afecta directamente las funciones vitales como fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración, actividades enzimáticas, entre otros procesos metabólicos que intervienen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La temperatura óptima varía según las especies pero casi siempre está comprendida entre 10° y 20°C. Sin embargo, para realizar un mejor control de esta variable es sumamente importante conocer y regirse por las necesidades y limitaciones de la especie que se está cultivando [13].

En las casas de cultivo, la humedad relativa puede modificar el rendimiento final de los cultivos porque interviene en procesos como el amortiguamiento de los cambios de temperatura, el crecimiento de las plantas, la viabilidad del polen para obtener mayor porcentaje de fecundación y el desarrollo de enfermedades. Cuando es excesiva, las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse; además de los comunes problemas de mal cuaje. Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para vegetar en perfectas condiciones: al tomate, al pimiento y la berenjena les va mejor una humedad relativa entre el 50-60%, al melón entre el 60-70% y al pepino entre el 70-90% [13].

3.- DISEÑO DE LA WSN PARA LAS CASAS DE CULTIVOS PROTEGIDOS “SAN JOSÉ”

Las WSN son altamente dependientes de la aplicación, por lo que es necesario considerar cuidadosamente los requisitos específicos del diseño que se desea implementar ya que estos definen los parámetros a tener en cuenta y facilitan la elección de los dispositivos. La fiabilidad, la eficiencia energética y la cobertura de grandes extensiones de tierra son requisitos esenciales en el desarrollo de aplicaciones destinadas a la agricultura de precisión. Los dispositivos inalámbricos usados son autónomos y su fuente de alimentación es limitada; este factor, que es muy importante, está directamente relacionado con el tiempo de vida de la red. La forma y extensión del terreno bajo observación por una WSN requieren de una adecuada planificación, para el despliegue de los dispositivos de la red (topología de la red), y selección de las tecnologías de comunicaciones. Esto constituye un punto crítico en el diseño, puesto que una selección adecuada permite enviar la información de forma eficiente con independencia de la extensión de tierra que ocupan los cultivos. Como principio, la WSN debe mantenerse activa y sin supervisión aunque ocurran situaciones como el fallo de unos o varios nodos sensores, también debe ser sencilla la inclusión de nuevos nodos en la red.

En este trabajo se utiliza ZigBee, una tecnología inalámbrica de área personal de bajo costo, bajo consumo, fácil instalación y mantenimiento. Se basa en la norma IEEE 802.15.4, que implementa las capas físicas y de control de acceso al medio, mientras que las capas de red y de aplicación son establecidas por la Alianza ZigBee. Dentro de las características más importantes se puede destacar que alcanza tasas de transmisión de hasta 250 Kbps y tiene un rango de cobertura de entre 10 y 75 m. Utiliza las bandas ISM, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2.4 GHz en todo el mundo [14].

3.2.- TOPOLOGÍA DE LA RED

La topología de la WSN es un factor de diseño crítico que depende mucho de su despliegue en los cultivos a monitorizar. Como se observa en la Figura 2, en una red Zigbee la topología puede ser en estrella, en malla o en árbol (*cluster-tree*) [15].

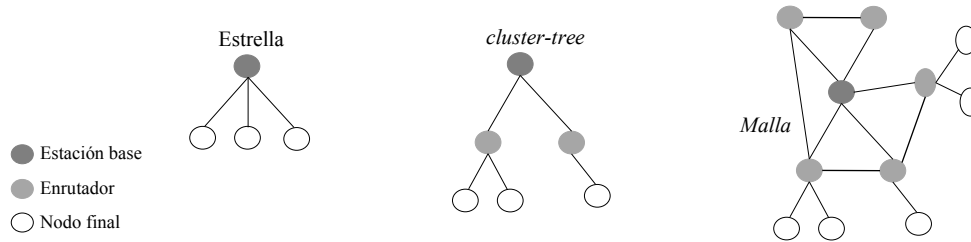


Figura 2

Topologías utilizadas en redes de sensores.

La topología en estrella (centralizada) consta de una estación base y varios nodos sensores. Ella es conocida como “sistema de un solo salto” porque los nodos sensores se comunican sólo con la estación base. En la misma se reduce la posibilidad de un fallo completo de la red, ya que la caída de un nodo afecta sólo al nodo en cuestión. Sin embargo, ese nodo que falla pierde la posibilidad de asociarse con otros para que la información llegue a su destino. La estación base, en dependencia de la cantidad de nodos y el tráfico, se convierte en un único punto de fallo para la red afectando la escalabilidad.

En una red en malla, las comunicaciones son descentralizadas. Es un sistema multi-saltos donde los nodos pueden comunicarse con otros para que los datos que se envían puedan llegar a su destino. Ante la caída de un nodo, o enlace entre dos nodos, se reconfigura automáticamente para encontrar una ruta alternativa hacia la estación base; igual pasa al añadir nuevos nodos a la red. Su problema es que los nodos enrutadores, además de tomar y enviar datos del entorno, realizan labores de enrutamiento, lo que se traduce en un mayor desgaste de las baterías. Mientras más densa (cantidad de nodos) sea la red, mayor es la fiabilidad, pero peor la eficiencia energética. Además, como los nodos más cercanos a la estación base manejan más tráfico, son más propensos a que su batería muera primero quedando incomunicada la red. Es una configuración que se recomienda para monitorizar grandes extensiones de tierra.

La topología *cluster-tree* combina los beneficios de las anteriores para dar una tolerancia a fallos intermedia, pero con mayor escalabilidad y eficiencia energética, es apropiada para aplicaciones de media escala que utilizan nodos alimentados con baterías. Esta topología organiza los nodos en grupos lógicos llamados clústeres, cada enrutador, incluyendo la estación base, forma un clúster por lo que son conocidos como cabeza de clúster. Los nodos finales asociados a un determinado cabeza de clúster pertenecen a su grupo, todas sus transmisiones son controladas por el cabeza de clúster. La estación base se identifica como la raíz del árbol y forma el clúster inicial. Con esta topología se puede extender el tiempo de vida de las baterías utilizando un mecanismo que establece períodos cíclicos en los que se enciende o apaga la radio de los nodos [16]. Contrario a la topología en malla, en una red basada en *cluster-tree* hay un solo camino de enrutamiento entre cualquier par de nodos. Por lo tanto, la comunicación es eficiente en tiempo, porque cada nodo sólo interactúa con su predefinido conjunto de nodos cercanos. Además, los nodos conocen su tiempo activo con anticipación, por lo tanto, cada nodo puede ahorrar su energía entrando al modo de baja potencia cuando no esté participando en el enrutamiento.

Las casas de cultivos protegidos “San José” ocupan un área relativamente pequeña, por lo que se considera la topología *cluster-tree* como la más adecuada para monitorizar de forma automática las variables medioambientales. En la Figura 3 se muestra el esquema de red propuesto para el complejo.

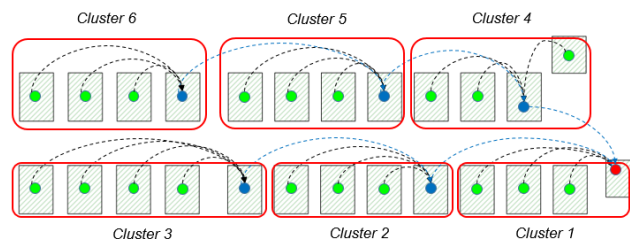


Figura 3

Topología de red propuesta para las casas de cultivos protegidos “San José”.

Para garantizar buenas condiciones de propagación se decide formar un clúster cada 50 o 60 m². Teniendo en cuenta la disposición física de las casas de cultivo, se conforman 6 clústeres: en color rojo se representa la estación base, en azul los

nodos sensores que a la vez harán de enrutadores y en verde los nodos finales. Esta red tendrá buena fiabilidad porque si falla la comunicación con un cabeza de clúster, los nodos finales de su grupo tendrán otro disponible a una distancia no mayor de 120 m. La topología escogida garantiza eficiencia en cuanto al consumo de energía y puede enfrentar la adición de nuevos nodos, a medida que vaya creciendo el complejo, sin afectar el funcionamiento de la red.

3.2.- SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

En el mercado existen varias plataformas comerciales para WSN que incluyen sensores de bajo costo con especificaciones que no son acordes a la instrumentación que se utiliza en la agricultura de precisión donde generalmente se miden parámetros medioambientales [17]. Las empresas Crossbow y Libelium brindan amplias posibilidades para monitorear estos parámetros, además de presentar buenas características en cuanto a robustez frente a las inclemencias del medio donde se despliegan.

Libelium centra su sistema en un nodo sensor, *Waspnote*, que permite la integración de varios sensores. Este nodo puede ser utilizado para monitorizar entornos diversos gracias a su variedad de placas integradoras de sensores entre las que resalta la de agricultura de precisión [18] que brinda la posibilidad de monitorizar hasta 14 parámetros. Con el sistema *Waspnote* se pueden abarcar extensiones de tierra de 7, 24 y hasta 40 km, con línea de vista entre dispositivos y condiciones ideales. Se fabrican modelos que utilizan Bluetooth, WiFi, ZigBee e incluso la red celular (3G/GPRS). En caso de fallas en la comunicación, los nodos pueden almacenar datos localmente gracias a que su diseño incluye la posibilidad de insertar memorias *microSD*.

Crossbow comercializa la plataforma *eKo* [19]. Un sistema inalámbrico de monitorización ambiental, para exteriores, destinado a aplicaciones de agricultura de precisión, microclima y estudios de conservación, investigación medioambiental y monitorización de cultivos. El kit *eKo* está compuesto por los nodos sensores y la estación base del sistema, que conectada con una pasarela (de la misma firma o una computadora) permite tanto el almacenamiento local de los datos monitorizados, como la posibilidad observarlos e interactuar con ellos a través de Internet. La estación base y los nodos sensores se comercializan en dos versiones que operan en la banda de frecuencia de 2.4 GHz: una versión de corto alcance que ofrece cobertura entre 152 y 457 m, en línea de vista, y una de largo alcance con cobertura entre 610 y 3218 m. Los nodos pueden ser utilizados como enrutadores (con o sin sensores) para lograr mayor cobertura y tolerancia a fallos.

El nodo *eKo* integra la placa procesador/radio y la antena IRIS de Crossbow a las que se añade un pequeño panel solar que recarga 3 baterías de tipo AA de NiMH. El panel solar alarga la vida de la batería de 3 meses a 5 años. El consumo de corriente promedio de esta placa es de 290.4 $\mu\text{A/hr}$, en función del tráfico y de las repeticiones; la radio consume 163.5 $\mu\text{A/hr}$ en comparación con los 55 $\mu\text{A/hr}$ de la placa de sensores [20].

Cada nodo *eKo* dispone de 4 conectores externos en su base que permiten conectar hasta 4 sensores *eKo* o de otro fabricante; el nodo identifica automáticamente los sensores al iniciar su operación. Crossbow fabrica 5 sensores: sensor de temperatura y humedad del suelo, un sensor que obtiene el contenido volumétrico de agua en el suelo, uno de humedad y temperatura ambiente, un sensor que permite predecir enfermedades y proteger el dosel vegetal y un sensor de radiación solar.

En “San José”, las distancias entre los nodos más alejados y la estación base es de alrededor de 200 m, no es necesario sobredimensionar el sistema con nodos de mayor alcance radio. Teniendo en cuenta esto y la durabilidad de las baterías recargadas con paneles solares, se decide usar 24 nodos sensores *eKo* eN2100 ubicados en cada una de las casas de cultivo y en la casa de posturas. Como las variables que se desean monitorear son la humedad relativa, la radiación solar y la temperatura, cada nodo se debe equipar con dos sensores: un sensor de radiación solar (eS1401) y uno de humedad y temperatura ambiente (eS1201). Los dos conectores restantes pueden ser utilizados en futuras expansiones de las funcionales del sistema; añadiendo sensores que midan las condiciones del suelo y actuadores se puede realizar de forma automática el control climático de las casas de cultivo dotando de inteligencia al sistema de riego e incluso a la fertilización. La estación base eB2110, ubicada en las oficinas administrativas, se conecta por USB a una computadora encargada de recolectar la información proveniente de los nodos finales.

La ubicación física de cada uno de los nodos se muestra en la Figura 4, la diferencia entre la nave 23 y el resto se debe a la cobertura radio entre esta y la estación base. Como la interferencia por obstáculos es aceptable en el interior de las casas de cultivo, ya que la interferencia de las plantas no es significativa, se deben situar los nodos a una altura mayor de 1.5 m sobre tierra para favorecer las condiciones de propagación.

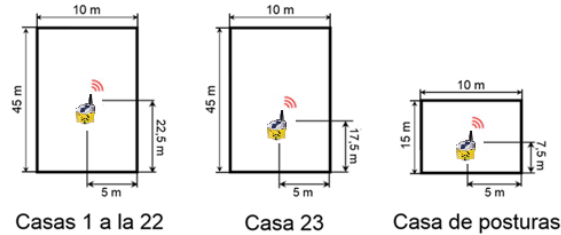


Figura 4

Ubicación de los nodos sensores dentro de las casas.

4.- SIMULACIÓN EN NETWORK SIMULATOR (NS2)

En el software NS2 [21] se verifica si la topología elegida para las casas de cultivos protegidos “San José” consume menos energía. Para la simulación de las topologías de red se crean dos escenarios: uno con una topología malla y otro en *cluster-tree*, se desestima la estrella por su baja fiabilidad.

En la Tabla 1 están la configuración empleada para los nodos.

Tabla 1
Configuración de los nodos

Parámetro	Valor
Modelo de radio propagación	Two Ray Ground
Capa MAC	802.15.4
Protocolo de enrutamiento	AODV
Potencia de transmisión	1 mW
Sensibilidad	-101 dBm
Consumo en transmisión	17 mA
Consumo en recepción	16 mA
Frecuencia de operación	2.4 GHz

El tipo de tráfico empleado es CBR (*Constant Bit Rate*), envía bits a una tasa constante sin variaciones de ningún tipo. Se asemeja a los datos que se van a recopilar en el diseño propuesto. Se analizan los siguientes parámetros:

- Cantidad de paquetes enviados, recibidos, desechados y reenviados en la red.
- Demora extremo a extremo (latencia). Cuanto tiempo tarda la información en llegar del origen al destino.
- Total de energía que consume la red.
- Razón de entrega de paquetes: relación entre la cantidad de paquetes recibidos y enviados.

4.1.- SIMULACIÓN DE LA TOPOLOGÍA MALLA

En la Figura 5 se muestra el resultado del archivo .nam para la topología malla. NS2 permite distinguir los dispositivos de la red: en azul se representan los 23 nodos sensores de las casas de cultivo y el de la casa de posturas, en rojo se representa la estación base. Entre corchete se indica, en el momento de la simulación, el siguiente salto para cada nodo. Por ejemplo: en la primera fila, el siguiente salto del nodo 0 es el nodo 3, el siguiente salto de los nodos 1 y 3 es el nodo 5, el nodo 2 tiene como siguiente salto al nodo 4 y este mismo nodo tiene como siguiente salto al nodo 8 y así sucesivamente hasta llegar al nodo 11 que tiene como siguiente salto al 24.

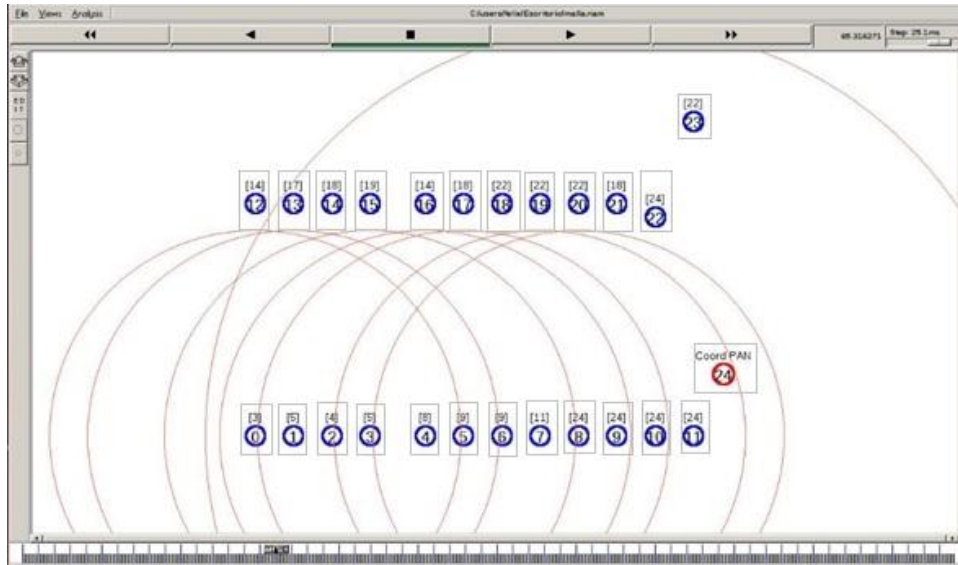


Figura 5
Topología malla.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la simulación. Destaca el alto consumo de energía que supone el funcionamiento de la red.

Tabla 2
Resultados de la topología malla

Parámetro	Valor
Total de paquetes enviados	3484
Total de paquetes recibidos	3113
Total de paquetes desechados	346
Total de paquetes reenviados	6184
Razón de entrega de paquetes (%)	89
Demora extremo a extremo promedio (ms)	0,0879483
Total de energía que consume la red (J)	18.529.903

La topología en malla provee buena escalabilidad y flexibilidad a la red, provee caminos redundantes incrementando la confiabilidad de transmisión de datos extremo a extremo. Sin embargo, ya que los caminos de enrutamiento no se pueden predecir, los nodos deben estar siempre activos (modo de operación con balizas deshabilitado), lo que conduce a un mayor consumo de batería. Aquí radica una de las desventajas de esta topología.

4.2.- SIMULACIÓN DE LA TOPOLOGÍA *CLUSTER-TREE*

En la Figura 6 se muestra el resultado del archivo .nam para la topología *cluster-tree*. En este caso se representan en verde los nodos finales, en azul los cabezas de clúster y en rojo la estación base. Nuevamente se indica entre corchete el siguiente salto para cada nodo que en esta topología es el cabeza de clúster. En la primera fila, para los nodos del 0 al 3 el siguiente salto es el nodo 4, los nodos del 4 al 7 tienen como siguiente salto al nodo 8 y los nodos del 8 al 11 al nodo 24. En la segunda fila, el siguiente salto de los nodos del 12 al 14 es el 15, para los nodos del 15 al 18 es el nodo 19, para los nodos 20, 21 y 23 el siguiente salto es el nodo 22 y para el nodo 22 el siguiente salto es el 24.

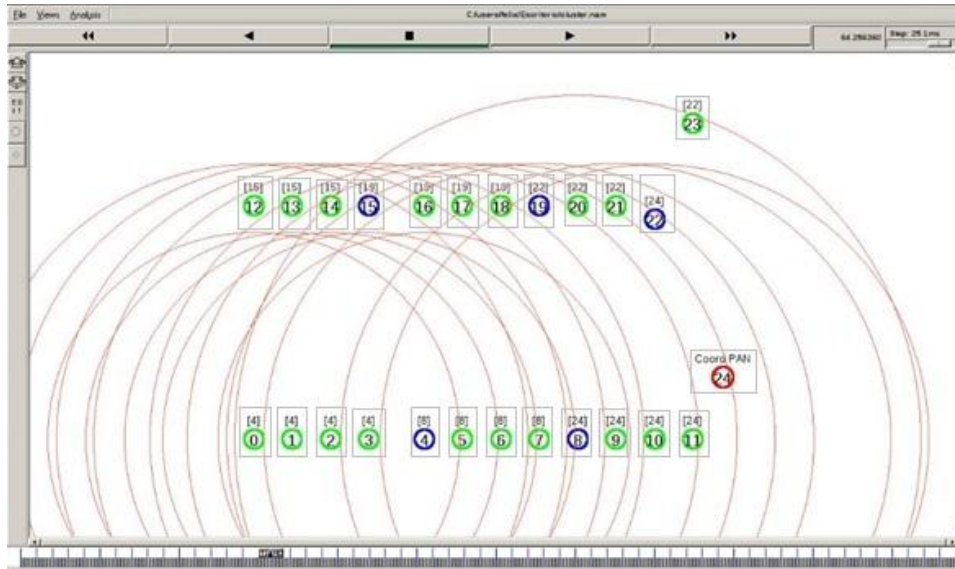


Figura 6
Topología *cluster-tree*.

Una red con topología *cluster-tree* puede utilizar el modo de operación con balizas (*beacon-enabled*) definido en la capa de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.15.4 [16,22]. En este modo, los cabezas de clúster difunden regularmente una baliza (*beacon*), trama piloto que informa el modo de operación y mantiene el sincronismo de la red. El intervalo entre balizas sucesivas determina una supertrama cuya estructura se define por la información contenida en el campo especificaciones de la trama baliza.

Como se observa en la Figura 7, la supertrama tiene una parte activa y una inactiva. Los cabezas de clúster y el resto de los dispositivos de la red sólo están en operación durante la parte activa, en la inactiva apagan sus radios para alargar la vida de las baterías.

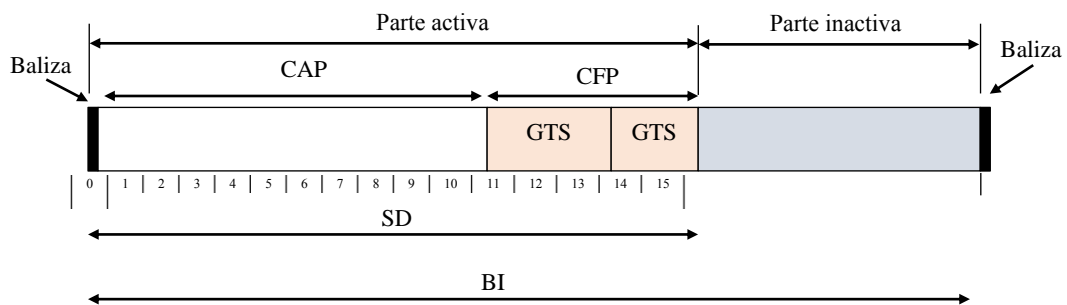


Figura 8
Estructura de la supertrama.

La parte activa de la supertrama se divide en intervalos de tiempo de igual duración y está compuesta por una baliza, un período de acceso por contención (CAP, *Contention Access Period*) y un período libre de contención (CFP, *Contention Free Period*). Cualquier nodo que quiera transmitir durante el período de contención debe competir con otros utilizando el mecanismo CSMA/CA ranurado [22]. En aras de garantizar cierta calidad de servicio se reservan intervalos de tiempo (GTS, *Guaranteed Time Slots*) para que determinados nodos puedan transmitir sin competir por el medio.

El intervalo entre balizas (BI, *Beacon Interval*) se calcula a partir del parámetro *Beacon Order* (BO), contenido en el campo especificaciones de la trama baliza, según la expresión:

$$BI = a * 2^{BO} \text{ para } 0 \leq BO \leq 14 \quad (1)$$

El siguiente inicio de una supertrama corresponde al envío de la próxima trama baliza y se producirá luego de BI símbolos. La duración de la parte activa de la supertrama (SD , *Superframe Duration*) se obtiene a partir del parámetro *Superframe Order* (SO), también contenido en el campo especificaciones de la trama baliza, mediante la siguiente expresión:

$$SD = a * 2^{SO} \text{ para } 0 \leq SO \leq BO \quad (2)$$

a es la duración de una supertrama base (*aBaseSuperframeDuration*). Este parámetro es una constante que representa el número de símbolos que forma una supertrama cuando SO es cero, o sea que $SD_{min} = a$. La duración de una supertrama base depende de la cantidad de intervalos de tiempo y la duración de un intervalo.

$$a = aBaseSlotDuration * aNumSuperframeSlots \quad (3)$$

En el estándar IEEE 802.15.2 se recomiendan 16 intervalos de tiempo. La duración de un intervalo depende de la cantidad de símbolos (el estándar recomienda 60) y la duración de un símbolo. En la capa física se define que, para una velocidad de transmisión de 250 Kbps, en la banda ISM de 2.4 GHz, la duración de un símbolo es 16 μ s [22]. Entonces, en 2.4 GHz, $a = 60 * 16 \mu s * 16 = 15.36$ ms.

Todos estos conceptos se pueden agrupar en el ciclo útil de radio (D , *duty cycle*) que determinan el porcentaje de tiempo que la radio del nodo está activa. Este mecanismo permite ahorrar energía al establecer períodos cíclicos en los que se enciende o apaga la radio de los nodos. D se expresa matemáticamente como:

$$D (\%) = SD/BI * 100 = 2^{(SO-BO)} * 100 \quad (4)$$

Las grandes ventajas del estándar IEEE 802.15.4 dependen del ajuste de los parámetros $BO:SO$. Por ejemplo, si $SO=BO$ la radio estará activa el 100% del tiempo y no se ahorra energía. Cuando los valores de BO son bajos se reduce el intervalo entre tramas balizas por lo que se consume más energía en un corto período de tiempo. Por otra parte, si SO es muy bajo, aunque supone buen ahorro de energía, las radios pasarán la mayor parte del tiempo apagadas aumentando la demora y afectando directamente el desempeño de la red. El valor $SO=BO=15$ está reservado e indica que el modo de operación con balizas está deshabilitado; en este modo no existe la estructura de supertrama.

En esta simulación se mantiene SO constante con un valor de tres y se varía BO . En esta red la demora extremo a extremo promedio no es un factor restrictivo, ya que la obtención de variables medioambientales no presenta limitaciones críticas. Los factores meteorológicos que se desean monitorear cambian lentamente en el tiempo, lo que permite el muestreo escaso (típicamente cada diez a quince minutos) reduciendo el consumo de energía del sistema.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la simulación. A medida que aumenta el parámetro BO disminuye el consumo de energía. Esta situación se debe a que los cabezas de clúster envían con menor frecuencia las tramas balizas, y por tanto se logra un ahorro energético.

Tabla 3
Resultados de la topología *cluster-tree*

Parámetro	Valor			
	3	4	5	6
Valor de BO	3	4	5	6
Ciclo útil de radio (%)	100	50	25	12.5
Razón de entrega de paquetes (%)	95	97	97	98
Total de energía que consume la red (J)	8,29	7,60	7,08	7,01
Demora extremo a extremo promedio (ms)	0,09	0,08	0,09	0,03

4.3.- RESULTADOS

En la Figura 8 se comparan los resultados obtenidos en las dos simulaciones. Se puede comprobar que, ajustando el ciclo útil de radio a una relación $BO:SO$ de 6:3 y, ante las mismas condiciones de tráfico, la cantidad de paquetes desechados por la topología *cluster-tree* es considerablemente menor que la malla, también es menor el consumo de energía, la cantidad de paquetes reenviados y la latencia promedio. La topología *cluster-tree* tiene además una razón de entrega de datos mayor que la malla, aun cuando los radios de los dispositivos de la red están apagadas el 87.5% del tiempo.

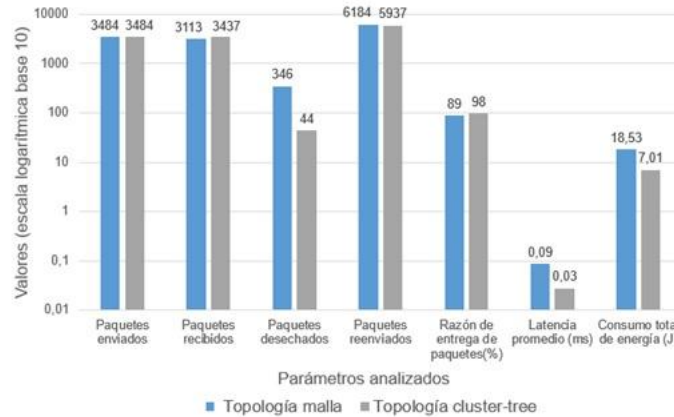


Figura 8

Comparación entre las topologías malla y *cluster-tree*.

En la herramienta Microsoft Excel se calculó el valor actual neto (VAN) para definir la factibilidad del proyecto. El valor actual neto (VAN) es el valor de la inversión en el momento cero, descontados todos sus ingresos y egresos a una determinada tasa. Se tuvieron en cuenta la inversión inicial de este proyecto, que se estimó en 14 890 CUC, y posibles gastos de mantenimiento de la red y las ganancias y gastos de “San José” hasta el 2014; considerando una tasa 7.5% establecida por la ONUDI (Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). Este estudio arrojó un VAN mayor que cero (52,320.73) lo que indica que este proyecto es viable. No obstante, el uso de plataformas de hardware libre para la construcción de nodos sensores puede reducir los costos de la inversión de este proyecto.

5.- CONCLUSIONES

El monitoreo de variables medioambientales en las casas de cultivos es de vital importancia para mantener el metabolismo de los cultivos. Con una WSN se pueden supervisar de forma automáticas estas variables y a la vez mantener un registro histórico de su comportamiento para estudios y decisiones futuras. Los sensores inalámbricos brindan además la flexibilidad y facilidades de instalación y mantenimiento.

En el trabajo se diseñó una WSN para las casas de cultivos protegidos “San José”. Se escogió la topología *cluster-tree* porque asegura una tolerancia a fallos razonable con mayor escalabilidad y eficiencia energética. Los nodos sensores eKo de corto alcance tienen buena durabilidad de las baterías porque pueden ser recargadas con paneles solares.

La simulación en NS2 demostró que fue acertada la elección de la topología *cluster-tree* porque ajustando adecuadamente el ciclo útil de radio, con los parámetros $BO:SO$ definidos en el modo de operación con balizas, se puede alargar el tiempo de vida de las baterías con mejores resultados en cuanto a razón de entrega de datos y latencia promedio.

A pesar de que el estudio de factibilidad del proyecto arrojó que es viable, para una propuesta de generalización se podría considerar el uso de plataformas de hardware libre para construir los nodos sensores y reducir los costos de la inversión que supone el uso de esta tecnología.

REFERENCIAS

1. Abbasi AZ, Islam N, Shaikh ZA, others. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*. 2014; 36(2): p. 263-270.
2. Patil S, Kokate AR, Kadam DD. Precision Agriculture: A Survey. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2016 August; 5(8).

3. Deepika G, Rajapirian P. Wireless sensor network in precision agriculture: A survey. In IEEE, editor. Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS); 2016. p. 1--4.
4. Meeradevi AK, Mundada MR. ZigBee Based Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture-The Survey. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM). 2015; 4(5).
5. Shankar P, Nagaraju B. A Survey on Wireless Sensor Network For Agriculture. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2017 July; 5(7).
6. Srbínovska, Gavrovski , Dimcev , Krkoleva A, Borozan. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. Journal of Cleaner Production. 2015; 88(Supplement C): p. 297 - 307.
7. Lamprinos I, Charalambides M. EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF ZIGBEE AS THE COMMUNICATION TECHNOLOGY OF A Wireless SENSOR NETWORK FOR GREENHOUSE MONITORING. International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems. 2015; 6.
8. Othman MF, Shazali K. Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. Procedia Engineering. ; 41: p. 1204--1210.
9. Manual para casas de cultivos protegidos. La Habana, Cuba: Ministerio de la Agricultura; Agosto, 1999.
10. Largo Medero, Medina Hernández, Fumero Pecosó. Sostenibilidad Económica de los cultivos Protegidos. REVISTA DIGITAL SOCIEDAD DE LA INFORMACION. 2012; (38).
11. Gómez, Rodríguez MG, Enrique, Miranda I, González. FACTORES LIMITANTES DE LOS RENDIMIENTOS Y CALIDAD DE LAS COSECHAS EN LA PRODUCCIÓN PROTEGIDA DE HORTALIZAS EN CUBA. Revista de Protección Vegetal. 2009 Agosto; 24(2): p. 117 - 122.
12. Almansa Espín EM. Sistema híbrido de iluminación para el desarrollo de plantas. Aplicación en invernaderos. . PhD Thesis. Universidad de Granada, 2011. Disponible en: <https://hera.ugr.es/tesisugr/20688039.pdf>
13. Sentís FC, Castillo FE. Agrometeorología. 2nd ed. Mundi-Prensa, editor. Madrid; España 2001
14. Keshtgari M, Deljoo A. A wireless sensor network solution for precision agriculture based on zigbee technology. Wireless Sensor Network. 2012; 4(1): p. 25.
15. Veerendra G, Nandini PK, Babu N, Puttamadappa C. Topology based performance analysis of IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks. International Journal of Computer Science and Network Security. 2010; 10: p. 175-181.
16. Marwa S, Al-Dubai, Romdhani I, Bani Yassein. Battery aware beacon enabled IEEE 802.15.4: An adaptive and cross-layer approach. In IEEE, editor. Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS); 2015. p. 1267–1272.
17. López Riquelme JA. Contribución a las Redes de Sensores Inalámbricos. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena; 2011. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2244/jalr.pdf?sequence=1>.
18. Waspnote datasheet. Libelium; 2016. Disponible en: http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspnote_datasheet.pdf
19. eKo Pro Series User's Manual Rev. E. Crossbow Technology Inc.; 2010. Disponible en: <http://manualzz.com/doc/6785209/eko-pro-series-user-s-manual-rev.-e--september-2010-pn--7430>
20. IRIS OEM Edition Hardware REFERENCE MANUAL. MEMSIC Inc.; 2010. Disponible en <http://www.memsic.com/userfiles/files/User-Manuals/iris-oem-edition-hardware-ref-manual-7430-0549-02.pdf>
21. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation). ; 2011. Disponible en https://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf
22. Eady F. Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers. Elsevier, editor. 2007

AUTORES

Lídice Romero Amondaray, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, Master en Sistemas de Telecomunicaciones, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, lidice@uo.edu.cu, sus investigaciones se centran en las redes inalámbricas.

Félix Manuel Piña Figueredo, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, ETECSA Holguín, Cuba, felix.pina@etecsa.cu.

María Margarita Goire Castilla, Lic. en Matemática, Master en Ciencias, Doctora en Ciencias, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, mgoire@uo.edu.cu, sus investigaciones se centran en las redes neuronales y la agricultura de precisión.