



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“AHORRO EN EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LAS  
REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS CON EL  
PROTOCOLO S-MAC”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

**ING. MIGUEL ANGEL CERVANTES MUNIVE**



TUTOR:  
**DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS**  
2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. VÍCTOR RANGEL LICEA

Secretario: Dr. ESAU VICENTE VIVAS

Vocal: Dr. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS

1er. Suplente: Dra. FATIMA MOUMTADI

2do. Suplente: Dr. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA MEXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS

---

FIRMA

## *AGRADECIMIENTOS*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios en esta gran institución y haberme formado como ingeniero y como investigador.*

*A mi asesor, el Dr. Javier Gómez Castellanos por su dirección y apoyo para la realización de esta tesis.*

*A la Dirección General de Estudios de Posgrado, al Instituto Tecnológico de Teléfonos de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado por medio de sus programas de becas.*

*A mi padre Jorge Cervantes Escobarte y mi madre María de los Angeles Munive Caltenco por todas sus palabras de aliento para poder terminar esta etapa de mi vida.*

*A mis hermanos, Norma, Jorge y Yazmín Cervantes Munive por su apoyo incondicional, en especial a mi hermana Norma que colaboro con la redacción de este trabajo de investigación.*



---

---

## INDICE

### CAPITULO I “INTRODUCCION”

1.1.- Objetivo.....	6
1.2.- Contribuciones.....	6

### CAPITULO II “CSMA (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora)”

2.1.- CSMA 1- persistente (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora 1-persistente).	9
2.2.- CSMA no persistente (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora no persistente).....	10
2.3.- CSMA persistente-p (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora persistente-p).	11
2.4.- CSMA/CD (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora con Detección de Colisión).....	11
2.5.- CSMA/CA (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora con Prevención de Colisión).....	12
2.6.- Conclusiones del capítulo II.....	18

### CAPITULO III “CAPA MAC Y EL PROTOCOLO S-MAC EN LAS WSN”

3.1.- CAPA MAC (Medium Access Control).....	20
3.1.1.- Descripción del protocolo S-MAC (Sensor -Medium Access Control)....	21
3.1.1.1.- Parámetros que afectan el desempeño de S-MAC.....	24
3.1.2.- PROTOCOLO T-MAC (Timeout-Medium Access Control).....	25
3.1.3.- B-MAC (Berkeley Medium Access Control) .....	26
3.2.- Conclusiones del capítulo III.....	28

### CAPITULO IV “DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO S-MAC”

4.1.- Simulador NS-2 (Network Simulator -2).....	30
4.1.1.- Estructura de un nodo móvil en NS-2.....	30
4.1.2.- Análisis de la creación de un escenario en NS-2.....	32
4.2.- Experimentos.....	35
4.2.1.- Experimento 1.....	36
4.2.2.- Experimento 2.....	38
4.2.3.- Experimento 3.....	40



---

---

4.2.4.- Experimento 4.....	43
4.3.- Conclusiones del capítulo IV.....	46

**CAPITULO V**  
**“CONCLUSIONES FINALES”**

5.1.- Conclusiones.....	47
-------------------------	----

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>48</b>
-------------------------	-----------



---

---

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

Hoy en día muchas investigaciones están siendo dedicadas al estudio de las redes inalámbricas debido a sus múltiples ventajas en distintas aplicaciones. Algunas de las ventajas que destacan son la fácil movilidad de los dispositivos y la instalación de los mismos, así como evitar altos costos en la instalación de cableado. Pero por otra parte esta tecnología sufre de algunas desventajas importantes como lo son la baja velocidad de transmisión y la seguridad de transmisión (se requieren utilizar codificaciones especiales).

Una de las tecnologías que está teniendo una gran aceptación en todo el mundo, son las redes inalámbricas de sensores (WSN), por sus múltiples aplicaciones en distintos campos, como lo es en la industria, en detección ambiental o en la milicia. Las WSN se encuentran dentro del estándar IEEE 802.15.4. Las WSN son redes de corto alcance pues su rango de operación es menor a los 70 metros, son redes inalámbricas de área personal (WPAN). Estas redes pueden operar en tres bandas ISM: 2.4 GHz, 868-928 MHz y 433-434 MHz. La velocidad máxima de transmisión en las WSN es de 250 kbps.

Aunque la tecnología relacionada con las redes de sensores inalámbricas está empezando a estudiarse con profundidad por distintos investigadores en todo el mundo, los científicos ya utilizan este tipo de redes para encontrar y controlar microclimas y plagas en plantaciones, para estudiar los hábitos de aves y para controlar sistemas de ventilación y calefacción. En la Universidad de California en Los Angeles, investigadores utilizan las redes de sensores inalámbricas para recibir información detallada sobre el efecto de los movimientos sísmicos en los edificios. Es de esperarse que si los avances tecnológicos en este campo siguen con la misma intensidad como ha ocurrido en los últimos años, las redes de sensores inalámbricas revolucionarán la capacidad de interacción de los seres humanos con el medio ambiente.

La evolución de redes de sensores tiene su origen, como en la mayoría de la tecnología, en iniciativas militares. Por esa razón no se tiene registro de la primera red de sensores inalámbrica. Pero se ha considerado como una de las iniciadoras el *Sound Surveillance System (SOSUS)*, una red de boyas sumergidas e instaladas en los Estados Unidos durante la Guerra Fría para detectar submarinos usando sensores de sonido. La investigación en redes de sensores a principios de 1980 comenzó con el proyecto *Distributed Sensor Networks (DSN)* de la agencia militar de investigación avanzada de Estados Unidos *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*.

Algunas de las más importantes aplicaciones de las redes de sensores son mencionadas a continuación:

- Seguridad: En algunos lugares es necesario tener una alta seguridad por los distintos riesgos que se pueden correr. Por ejemplo, los actos terroristas se tienen que prevenir en centrales nucleares, aeropuertos, áreas militares, y edificios importantes.



En estos casos es muy recomendable el uso de la red de sensores ya que se pueden detectar situaciones que con una cámara no sería posible.

- **Detección Ambiental:** Las redes de sensores ayudan a solucionar el problema del control ambiental en áreas de bosque o de los océanos, por su capacidad de detección de múltiples variables como la humedad, la temperatura, fuego, actividad sísmica entre otras.
- **Industria:** Dentro de fábricas pueden ayudar en el sector de calidad de los distintos productos, por ejemplo hay sectores en donde se requiere cierta temperatura y una red de sensores se podría monitorear en todo momento esta situación
- **Vialidad:** Las redes de sensores pueden ayudar a las cámaras de tráfico, ya que pueden informar de la situación del tráfico en lugares donde las cámaras no tienen acceso y también pueden informar a conductores de la situación, en caso de tráfico intenso o accidentes, para que se puedan tener las medidas adecuadas por los conductores.
- **Medicina:** Es otro campo bastante prometedor. Con la reducción de tamaño que están sufriendo los nodos sensores, la calidad de vida de pacientes que tengan que tener controlada sus constantes vitales (pulsaciones, presión, nivel de azúcar en sangre, etc.), podrá mejorar substancialmente.
- **Monitoreo de glaciales:** Ahora con el complicado problema del calentamiento global las WSN son de gran utilidad en el monitoreo de ambientes glaciales para estudiar el clima del planeta y la actividad dentro del glacial.
- **Aplicaciones Militares.-** Con el uso de las WSN es posible monitorear áreas de acceso restringido.

Los nodos de las redes de sensores inalámbricas (WSN) son dispositivos autónomos de reducido tamaño, capaces de intercambiar información del entorno que les rodea. Los dispositivos utilizados para formar una WSN están constituidos principalmente por un microprocesador, una fuente de energía (batería), un radio transmisor y receptor, y por un elemento (sensor) que es capaz de recibir información del exterior como lo son: la humedad, luz, temperatura, etc

Entre las compañías que diseñan y fabrican los distintos dispositivos que se requieren para formar una WSN se encuentra la compañía estadounidense MOTEIV y algunos de sus productos son las plataformas Tmote Sky y Tmote Invent. También se encuentra la empresa Suiza SHOCKFISH que desarrollo y fabrico la plataforma TinyNode. Aunque las dos empresas mencionadas con anterioridad han desarrollado importantes dispositivos para la formación de una WSN, la empresa estadounidense Crossbow ha desarrollado una mayor cantidad de dispositivos, algunos de sus productos son las plataformas Mica, Mica2, Micaz, Mica2dot, telos y telos b. En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran las plataformas Mica2 y Mica2dot.





Fig.1.1. Mica2.

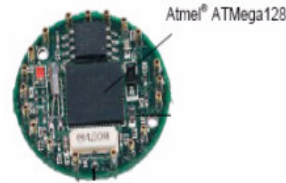


Fig.1.2. Mica2dot.

Aunque las WSN están teniendo una gran aceptación en diversas áreas, y con ellas se han resuelto distintos problemas, los investigadores han encontrado interferencias comunes en redes inalámbricas como son: las terminales ocultas y expuestas, la reducción del rango de transmisión debido a muros, y los distintos problemas sufridos por la nieve y la lluvia que afectan considerablemente el desempeño de los nodos. Pero además de estos aspectos mencionados, las WSN tienen una limitación en particular que es el consumo de energía. El dispositivo que suministra de energía a los nodos de una WSN, son las baterías. Es recomendable que las baterías sean de un tamaño reducido, que no rebasen el tamaño del nodo para que éste siga manteniendo un tamaño que facilite su colocación en lugares reducidos.

Las baterías en las WSN tienen vida útil reducida, por ejemplo si se activa un nodo y se sacrifica el rango de transmisión configurando la potencia de transmisión a 1mwatt, la vida útil del sensor puede llegar a ser un poco mayor a las 550 horas de forma continua, siendo esta vida útil muy baja.

El consumo de energía, es el mayor problema que presentan las WSN, debido a que la reducción en el consumo de ésta, lleva a los nodos a disminuir su rango de transmisión y por consecuencia en determinado tiempo, se llega a perder la comunicación entre ellos. Debido a esta situación, las WSN están siendo estudiadas con cautela y gran parte de los investigadores en esta área están dedicando muchas de sus investigaciones a resolver dicho problema.

Uno de los investigadores más importantes que destaca en el estudio del consumo de energía en las WSN es el Dr. Wei Ye, quien actualmente es profesor en la Universidad del Sur de California en E.U.A. En su artículo "*An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*"[1], se hace mención del protocolo llamado S-MAC (*Sensor - Medium Access Control*), el cual utiliza ciclos de escuchar y dormir en los nodos que conforman una WSN. Con estos ciclos de escuchar y dormir se ha demostrado que la energía consumida en una WSN es reducida considerablemente, por lo que muchos investigadores han optado por investigar nuevos protocolos que utilicen un mecanismo similar.



## 1.1.- Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo primordial describir el protocolo S-MAC (*Sensor -Medium Access Control*), protocolo que ayuda a solucionar el problema del consumo de energía en las WSN. Aunque en la actualidad éste no es el mejor protocolo para resolver dicho problema, fue seleccionado debido a que la mayoría de los nuevos protocolos que han dado mejores resultados en este ámbito están basados en el protocolo S-MAC. Por lo cual, para cualquier investigador que desee mejorar el consumo de energía en las WSN es de suma importancia entender el funcionamiento de S-MAC. Los protocolos T-MAC (*Timeout-Medium Access Control*) [2] y B-MAC (*Berkeley Medium Access Control*) [3] son dos protocolos basados en los principios del funcionamiento de S-MAC, y algunos investigadores han demostrado que hoy en día ofrecen una mejora considerable para solucionar el consumo de energía en las WSN.

Entre los objetivos secundarios del presente trabajo se contempla motivar a otros estudiantes a interesarse en el área de sensores, puesto que ellos tienen uso en distintos ámbitos de nuestra sociedad y por ello, están siendo utilizadas en los países más desarrollados de todo el mundo.

## 1.2.- Contribuciones

La contribución principal de esta investigación consiste en ahorrar energía en los nodos de las redes inalámbricas de sensores (WSN) mediante el uso del protocolo S-MAC, con el apoyo del simulador NS-2 (*Network Simulator-2*) se mostrarán los resultados obtenidos.

El trabajo está dividido de la siguiente forma. El segundo capítulo está dedicado al estudio del acceso al canal o medio de las diversas estaciones que forman una red, con el protocolo CSMA. Principalmente se hace referencia al protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*) por ser el protocolo utilizado por las WSN.

En todas las redes inalámbricas y cableadas e incluso en las que se utilizan en la vida cotidiana de una persona, es importante seguir una serie de pasos para lograr una comunicación correcta. Por ejemplo en una junta de profesores, si dos o más de los profesores que integran la junta hablan al mismo tiempo, no podrán tener una comunicación adecuada. Para resolver el problema de la comunicación entre los profesores, algún profesor decide que la forma en que se va a otorgar la palabra será al primer profesor que levante la mano, siempre y cuando nadie esté hablando. En caso de que alguien esté hablando el profesor que ha levantado la mano tendrá que esperar un tiempo hasta que el profesor que está teniendo la comunicación verbal termine de hacerlo. De este modo cuando dos o más profesores hablan al mismo tiempo, se tendrá una comunicación ineficiente o nula; en las redes inalámbricas y cableadas sucede algo similar. Las redes inalámbricas y cableadas utilizan diversos protocolos para llevar a cabo transmisiones exitosas. En las redes de sensores inalámbricas los nodos utilizan el protocolo CSMA/CA para acceder al canal o medio, cuando se intenta hacer una transmisión.



---

---

El tercer capítulo esta enfocado al estudio de la capa física y la capa MAC de las redes de sensores inalámbricas (WSN), así como a la descripción del protocolo S-MAC, el cual ayuda a solucionar el problema del consumo de energía en las WSN. También se mencionarán y se describirán brevemente otros dos protocolos que se han derivado del protocolo S-MAC: Los protocolos T-MAC y B-MAC.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con el protocolo S-MAC con el apoyo del simulador NS-2 (*Network Simulator-2*). Mediante algunos dibujos se muestran los escenarios que fueron utilizados para los distintos experimentos, y con la ayuda de gráficas se muestran los resultados obtenidos.

Finalmente en el quinto capítulo se dan las conclusiones de la tesis.



## CAPITULO II

### CSMA (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora)

En las redes cableadas e inalámbricas es muy importante determinar quien puede hacer uso del canal cuando varios nodos quieren transmitir al mismo tiempo. La capa MAC (Control de Acceso al Medio) es una subcapa de la capa de enlace del sistema de referencia OSI, y como su nombre lo indica, es la encargada de controlar el acceso al medio, así como de gestionar y mantener comunicación entre distintos nodos. Esto es de suma importancia debido a que el hecho de no tener una coordinación adecuada en la transmisión de datos ocasiona colisiones. Un ejemplo que puede ayudar a entender claramente el objetivo de la capa MAC podría ser cuando en un salón se esta impartiendo clase, el profesor esta explicando “ocupando el único canal” entonces un alumno levanta la mano para preguntar, en ese momento el profesor le da la palabra guardando silencio “desocupando el canal” y el alumno pregunta “ocupa el canal”. De no haber levantado la mano habría hablado al mismo tiempo que el profesor y no se habría establecido la comunicación, ocasionando con ello una “colisión”. De esto trata precisamente la capa MAC, de llevar un control para acceder al medio y así evitar colisiones apoyándose en algunos protocolos.

En la actualidad, se han propuesto varios protocolos para solucionar el problema de acceso múltiple, entre ellos destacan los siguientes: Aloha puro, Aloha ranurado y CSMA. El Aloha puro y el Aloha ranurado son solo protocolos de detección de portadora, en cambio el protocolo CSMA no solo lleva a cabo detección de portadora sino que además realiza casos con detección de colisiones y con prevención de las mismas.

En el presente capítulo solo se describirá el protocolo CSMA, haciendo hincapié en el protocolo CSMA/CA (Acceso Múltiple Sensible a la Portadora con Prevención de Colisión), por su importancia en las WSN. De manera general se puede decir que el funcionamiento del protocolo CSMA/CA es de la siguiente manera:

Dentro de una WSN, cuando una estación o nodo desea transmitir datos a otro, el nodo transmisor debe estar seguro de que ningún otro nodo este utilizando el canal o medio para evitar colisiones. Si el nodo transmisor detecta que el medio se encuentra libre, se inicia un espaciado entre tramas (IFS) y si este sigue libre al finalizar el IFS, se inicia la transmisión. De lo contrario, si el medio se encontraba ocupado antes de hacer la transmisión, el nodo transmisor acciona un tiempo de espera aleatorio llamado *backoff* para volver a intentar la transmisión posteriormente.

A pesar de que el protocolo CSMA/CA reduce considerablemente las colisiones, no es suficiente para solucionar el problema de los nodos ocultos. Por ello, el protocolo CSMA/CA incluye dos mecanismos de envío de paquetes: RTS (*Request to Send*) y CTS (*Clear to Send*), los cuales ayudan a resolver dicho problema. La forma en que funcionan los mecanismos RTS y CTS se muestra en la figura 2.1.

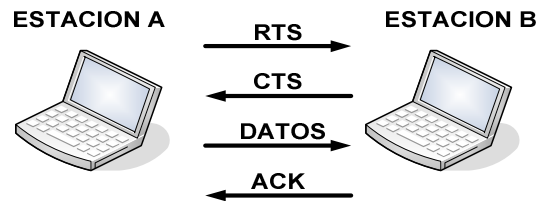


Fig.2.1. Mecanismo RTS-CTS.

En la figura 2.1 se muestran dos estaciones A y B. La estación A quiere transmitir datos a la estación B. Antes de transmitir datos la estación A envía un paquete RTS para saber si el canal esta siendo ocupado, el paquete RTS es recibido por la estación B. Al no encontrarse ocupado con otra transmisión, la estación B envía un paquete CTS a la estación A para notificar que esta libre y que puede recibir datos. De esta manera, la estación A recibe el paquete CTS e inicia la transmisión hacia la estación B. Cuando la estación B termina de recibir los datos, envía un paquete a la estación A en el que confirma que ha recibido dichos datos. El paquete de confirmación se llama ACK (*Acknowledgement*).

El protocolo CSMA es dividido en los siguientes:

- Protocolos con detección de portadora:
  - CSMA 1- persistente. Utilizado en algunas redes cableadas.
  - CSMA no persistente. Utilizado en algunas redes cableadas.
  - CSMA p-persistente. Utilizado en algunas redes cableadas.
- Protocolo con detección de portadora y detección de colisiones:
  - CSMA/CD. Utilizado en algunas redes cableadas (Ethernet).
- Protocolo con detección de portadora y anulación de colisiones:
  - CSMA/CA. Utilizado en redes inalámbricas (WiFi).

A continuación se explicará el funcionamiento de los protocolos de CSMA, haciendo hincapié en el protocolo CSMA/CA por ser el usado en los nodos de las redes de sensores inalámbricas (WSN).

## 2.1.- CSMA 1- persistente (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora 1-persistente)

Cuando una estación A quiere transmitir datos a una estación B, primero escucha el canal y verifica si hay otra estación transmitiendo. Si el canal está siendo ocupado por otra estación, casi de forma inmediata la estación A intenta nuevamente ocupar el canal, pero sino está disponible, desiste sus intentos de acceder a éste hasta que se encuentre libre. Esta espera que hace una estación cuando encuentra el canal ocupado la hace de forma persistente con probabilidad de 1, reduciendo así los retardos de transmisión. Por otra parte si la estación detecta un canal desocupado, transmite los datos. En caso de que ocurra una

colisión la estación esperará un tiempo aleatorio y después volverá a intentar transmitir. En la figura 2.2 se muestra como la estación A logra transmitir datos a la estación B.

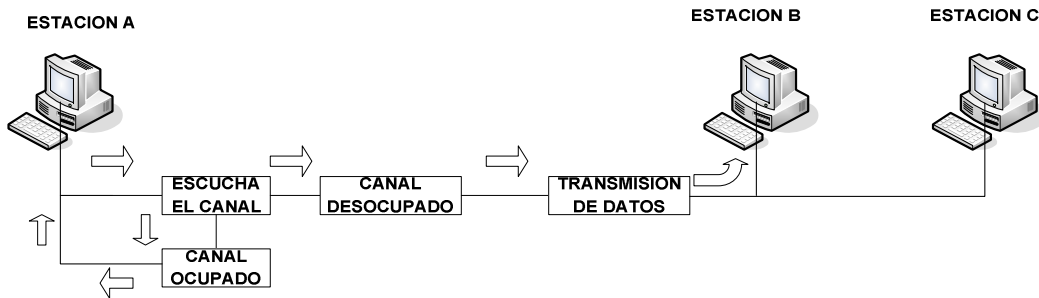


Fig. 2.2. La estación A envía datos a la estación B usando el protocolo CSMA 1-persistente.

El problema con este protocolo es que cuando la estación A inicia la transmisión de datos a la estación B, sin que ésta haya recibido los datos de la estación A, la estación C en forma simultanea se encuentra lista para enviar y detectar el canal, lo que conlleva a que no sea capaz de detectar que la estación A esta transmitiendo a la estación B, comenzando a enviar datos a la estación B. De esta manera ocurre una colisión.

## 2.2.- CSMA no persistente (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora no persistente)

En este protocolo al igual que el protocolo CSMA 1-persistente, cuando una estación quiere hacer una transmisión primero se asegura de que no exista otra transmisión en el canal. Si la estación no detecta ninguna transmisión comienza a transmitir. Pero si el canal esta siendo ocupado por otra estación, la estación que desea transmitir esperará un tiempo aleatorio (lo que ocasiona mayor retardo en la transmisión) y al término de la espera, intentará nuevamente ocupar el canal. Esto último diferencia al protocolo CSMA no persistente del CSMA 1-persistente en el cual en todo momento se intenta transmitir de forma casi inmediata. En la figura 2.3 se muestra la forma en que funciona el protocolo CSMA no persistente.

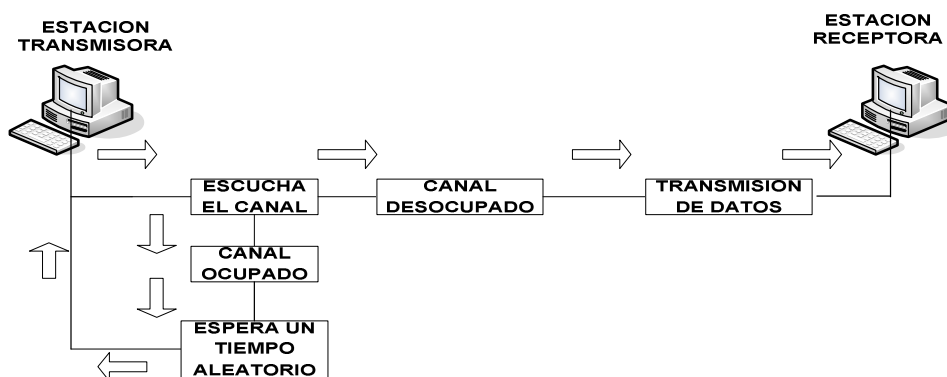


Fig. 2.3. La estación A envía datos a la estación B usando el protocolo CSMA no persistente.

### 2.3.- CSMA persistente-p (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora persistente-p)

En el protocolo CSMA persistente-p cuando una estación quiere transmitir datos primero escucha el canal, si el canal esta ocupado espera un tiempo aleatorio para volver a retransmitir. Si el canal esta desocupado se selecciona un número aleatorio “Q” entre 0 y 1 (0.1, 0.2, 0.3.....), si el número seleccionado es menor que una probabilidad “P” ( $Q < P$ ) el dato es transmitido. Sin embargo, cuando el número seleccionado es mayor que la probabilidad “P” ( $Q > P$ ), se mantiene en espera un tiempo aleatorio y comienza nuevamente el procedimiento inicial. En la figura 2.4 se puede observar el funcionamiento del protocolo CSMA persistente -p.

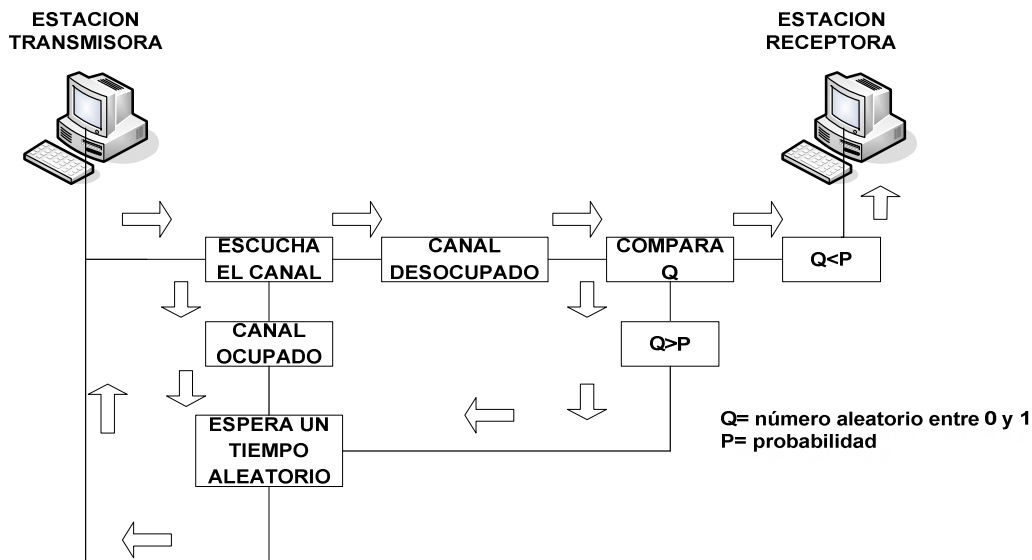


Fig. 2.4. La estación A envía datos a la estación B usando el protocolo CSMA persistente-p.

### 2.4.- CSMA/CD (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora con Detección de Colisión)

En el protocolo CSMA/CD cuando una estación quiere transmitir datos a otra, primero revisa el canal, si el canal o medio se encuentra ocupado por otra transmisión se espera un tiempo aleatorio denominado *backoff* (el cual se explicará con mayor detenimiento cuando se describa el protocolo CSMA/CA). Después de terminar la espera de un tiempo aleatorio, la estación transmisora intentará nuevamente transmitir; en caso de que la estación transmisora detecte que el canal esta libre, se inicia la transmisión de la trama a enviar. Si durante la transmisión de la trama se detecta una colisión, entonces las estaciones que sufren la colisión suspenden el envío de la trama y envían un aviso de congestión, llamado aviso *jamming*. Después de haber enviado el aviso *jamming*, la estación transmisora espera un tiempo aleatorio (*backoff*) y al termino de éste se inicia de nueva cuenta todo el proceso de transmisión. En la figura 2.5 se puede observar la forma en que trabaja el protocolo CSMA/CD.

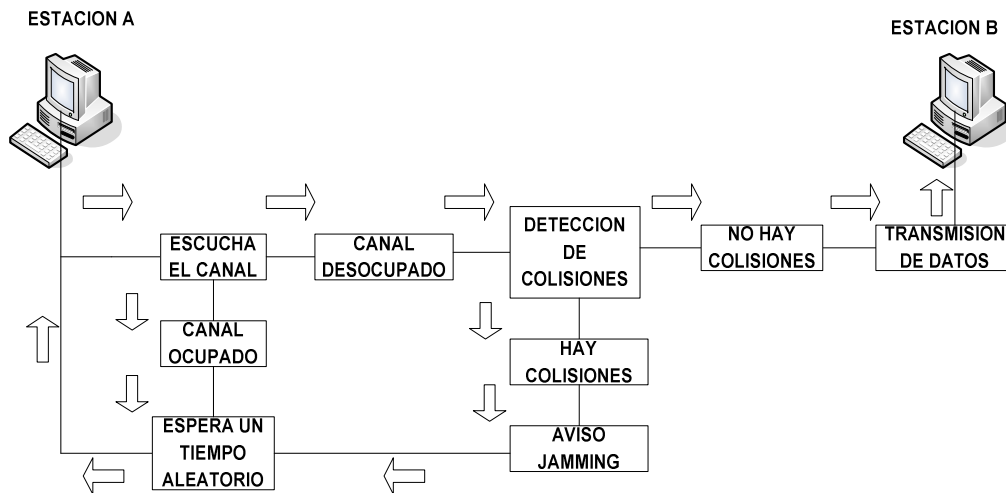


Fig. 2.5. La estación A envía datos a la estación B usando el protocolo CSMA/CD.

## 2.5.- CSMA/CA (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora con Prevención de Colisión)

En las redes inalámbricas no es posible usar el protocolo CSMA/CD como es utilizado por *Ethernet* debido a que no es posible detectar la colisión cuando esta ocurre. Por esta razón y con la finalidad de dar solución a esta problemática se propone el protocolo CSMA/CA, en el cual se utiliza la detección del canal físico y del canal virtual. A continuación se describe la forma de operación del protocolo CSMA/CA:



Fig. 2.6. Dos estaciones inalámbricas.

### Detección del canal físico

- I. La estación A quiere transmitir a la estación B.
- II. La estación A verifica el medio para determinar el estado del mismo, el medio se puede encontrar en estado libre o en estado ocupado.





- III. En caso de que el medio se encuentre libre de cualquier trama, la estación A ejecuta un espacio entre tramas llamado IFS.
- IV. Si durante el transcurso del intervalo IFS el medio es ocupado por otra estación, entonces la estación A debe esperar hasta el final de la transmisión en curso para poder hacer lo mismo.
- V. Cuando la estación A ha determinado una ocupación del medio, ésta ejecuta el **algoritmo exponencial backoff**, el cual consiste en lo siguiente:

Durante el inicio de la transmisión de una estación, primero se escucha el canal para comprobar que no este siendo ocupado y evitar colisiones, sin embargo, no es suficiente para lograr dicho objetivo, por eso, cuando más de una estación transmite en forma simultánea provocando una colisión. La estación que detecta la colisión envía un mensaje de *jamming* y lo notifica a las demás estaciones. Enseguida se detienen las transmisiones y se acciona el algoritmo denominado *Truncated binary exponential backoff*, este algoritmo básicamente consiste en esperar un intervalo de tiempo aleatorio llamado *backoff* o también llamado ventana de contienda (CW), esto evita que las estaciones intenten transmitir al mismo tiempo.

*Funcionamiento del algoritmo Truncated binary exponential backoff:*

- a) Primero se estima un tiempo de espera:  $Backoff\ Time = \text{Número Aleatorio} \times Slot\ Time$ .

Donde:

El *Slot Time* es una ranura discreta cuya longitud es igual al tiempo de propagación de ida y vuelta en una transmisión.

El número aleatorio es un número entero mayor o igual a cero y menor que  $2^n$ .

$n$  es el número de intentos de retransmisión para las primeras 10 veces ó  $n = 10$  para los intentos número 11 . . . 16.

Por ejemplo si el tiempo que tardan en propagarse 512 bits es de  $51.2\mu s$ , en la segunda retransmisión el tiempo de espera será uno de los tres siguientes tiempos:  $51.2\mu s$ ,  $102.4\mu s$  ó  $153.6\mu s$  ( $51.2\mu s \times 3 = 153.6\mu s$ ). En la tabla 2.1 se muestran los intervalos que son asignados a cada número de intentos de retransmisión.

Número de intentos de retransmisión	Intervalo
0	0
1	0-1
2	0-3
3	0-7
4	0-15
5	0-31
6	0-63
7	0-127
8	0-255
9	0-511
10	0-1023
11	0-1023
12	0-1023
13	0-1023
14	0-1023
15	0-1023
16	Notifica error

Tabla 2.1. Intervalos que corresponden a cada intento de retransmisión en el algoritmo exponential backoff.

- b) Después de 16 intentos fallidos el algoritmo notifica un error a las capas superiores.

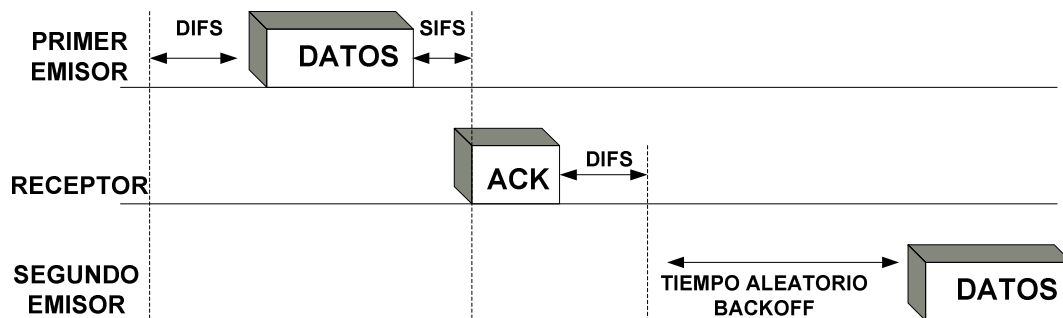


Fig.2.7. Aparición del algoritmo exponencial backoff en CSMA/CA.

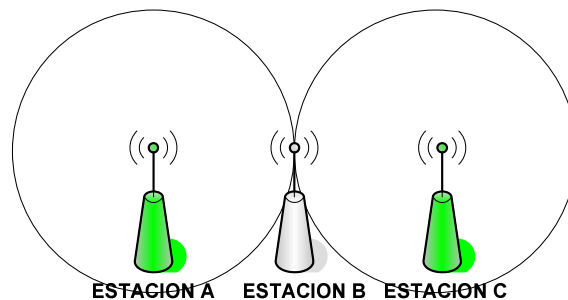
- VI. Durante la aplicación de la espera del algoritmo *exponencial Backoff*, la estación A continúa escuchando el medio, si se detecta que el medio está libre durante un tiempo IFS (espaciado entre tramas), esta espera va avanzando temporalmente hasta que la estación A consume todas las ranuras (slot) temporales asignadas. Pero si el medio

permanece ocupado durante un tiempo igual o superior a IFS el algoritmo *exponencial Backoff* queda suspendido hasta que el medio quede libre. Es decir el algoritmo *exponencial Backoff* no dejará de funcionar hasta que el medio este libre. Como consecuencia de cada retransmisión, provocará que el valor de CW (ventana de contienda), que se encontrará entre  $CW_{min}$  y  $CW_{máx}$  se duplique hasta llegar al valor máximo.

Aún con todas estas medidas el protocolo CSMA/CA presenta algunos problemas importantes que se intentan resolver como son los nodos ocultos y expuestos.

### *Problema de los nodos ocultos*

Este problema se debe a que en un tiempo determinado un nodo percibe que el canal esta libre y transmite, pero en realidad esta siendo ocupado por otro nodo que no escucha la transmisión. Esto se puede entender mejor con la figura 2.8.



**Fig.2.8. Nodos Ocultos.**

En la figura 2.8 el nodo A transmite al nodo B y dado que el rango de transmisión de C no puede detectar la transmisión del nodo A también transmite al nodo B creando una interferencia en el canal y causando una colisión en los datos transmitidos.

### *Problema de los nodos expuestos*

Este otro problema consiste en que un nodo detecta que el canal esta siendo ocupado por otro nodo, pero en realidad el canal esta libre para transmitir. Para ejemplificar de manera clara esta situación obsérvese la figura 2.9.

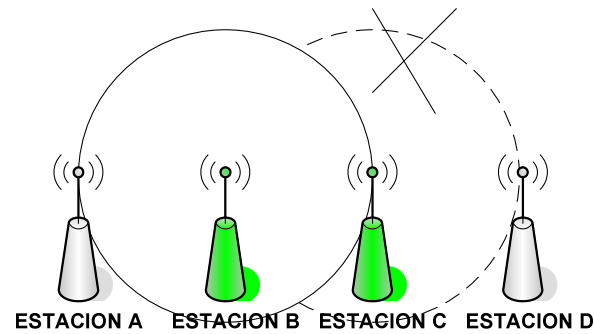


Fig.2.9. Nodos Expuestos.

En la figura 2.9 el nodo B transmite al nodo A mientras el nodo C intenta transmitir al nodo D pero decide no hacerlo debido a que detecta que el canal esta siendo ocupado ya que escucha la transmisión que esta haciendo el nodo B al nodo A.

Para solucionar el problema de nodos ocultos se ha propuesto la operación de CSMA/CA basada en MACA (*MultiAccess Collision Avoidance*) en la que se utiliza la detección virtual. Desafortunadamente, el problema de nodos expuestos no ha podido resolverse en ninguna investigación realizada hasta el momento.

### Detección del canal virtual

I. En la figura 2.10 la estación A desea enviar datos a la estación B.



Fig. 2.10. Tres estaciones inalámbricas.

- II. La estación A envía una trama RTS (*Request To Send*) a la estación B, en la que le solicita permiso para enviarle una trama. El tamaño de una trama RTS es de 20 bytes.
- III. La estación B recibe la solicitud (RTS), si acepta el permiso regresa una trama CTS (*Clear To Send*) a la estación A. El tamaño de una trama CTS es de 14 bytes.
- IV. Pero no solo la estación A escucha el CTS de la estación B, también es escuchado por la estación C, la cual al enterarse del CTS supone que hay una transmisión y desiste de transmitir para evitar colisiones.

- V. La estación C estima cuanto tiempo tardaran en comunicarse las estaciones A y B incluyendo el ACK (*Acknowledgement*) final por lo que ejecuta un tipo de canal virtual ocupado, que es indicado por NAV (*Network Allocation Vector*). El tamaño de una trama ACK es de 14 bytes.
- VI. Cuando la estación A recibe el CTS de la estación B, envía su trama de datos y acciona su temporizador ACK.
- VII. Si la estación B recibe correctamente la trama de datos, ésta envía una trama ACK a la estación A y termina así con la comunicación correcta entre dos nodos.

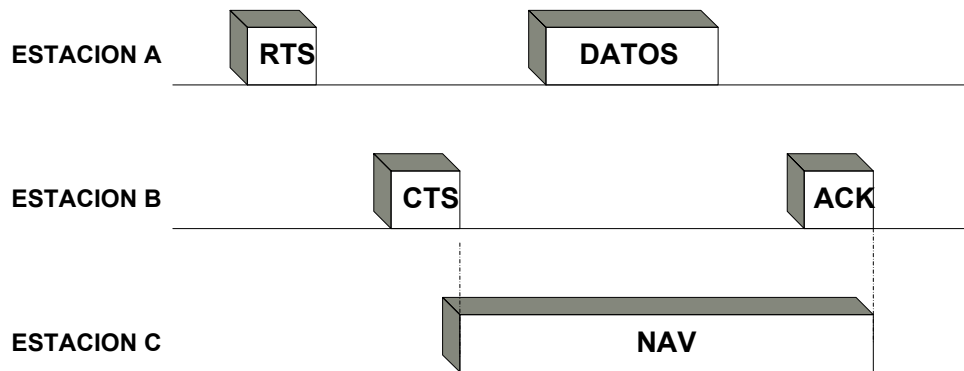


Fig.2.11. Intercambio de paquetes RTS y CTS entre estaciones en CSMA/CA.

Las tramas RTS y CTS contienen la información de la longitud del paquete de datos transmitido. Esta información la pueden leer las estaciones que escuchan el canal, de manera que se actualiza un NAV, que contiene la información del periodo de tiempo durante el cual el canal estará ocupado.



## 2.6.- Conclusiones del capítulo II

Aunque el objetivo primordial del presente trabajo es describir un protocolo que permita reducir el consumo de energía en las WSN (el protocolo S-MAC), es importante también dar a conocer el protocolo que permite el acceso al uso del canal de las distintas estaciones o nodos en las WSN: el protocolo CSMA.

En las redes, no solo existe una estación que desea transmitir a otra, sino que en muchas ocasiones dos o más estaciones desean hacer transmisiones al mismo tiempo, este factor aumenta si la red esta constituida por una gran cantidad de estaciones. El control de acceso al medio es muy importante en la transmisión de datos en las diversas redes existentes, debido a que el hecho de no tener un control adecuado en la transmisión de datos puede conllevar a una mala transmisión de los mismos entre las estaciones involucradas, e inclusive puede llevar a diversas colisiones. En este capítulo se hizo mención de algunos protocolos que se han derivado del protocolo CSMA, y que han sido utilizados para solucionar el problema del acceso múltiple en canales *Half-duplex* de diversas estaciones en una red. Se describió de forma breve los protocolos: CSMA-1 persistente, CSMA no persistente y CSMA persistente -p. Estos 3 tres protocolos en su tiempo ofrecieron una alternativa para solucionar el problema de acceso múltiple en redes cableadas, sin embargo, las estaciones seguían teniendo durante la transmisión colisiones que no podían ser detectadas por otras dándose por hecho que la transmisión, se había completado exitosamente. Entonces surgió el protocolo CSMA/CD, el cual asegura que una estación dentro de una red cableada podrá transmitir sus datos a otra sin encontrarse con problemas de ocupación del canal. Es así que, para lograr una comunicación adecuada entre estaciones el protocolo CSMA/CD utiliza la detección del canal y la detección de colisiones.

No obstante, aunque el protocolo CSMA/CD da una solución satisfactoria en las redes *Ethernet* no es eficiente para redes inalámbricas, debido a que cuando existe una transmisión entre dos estaciones, éste no contempla estaciones ocultas que puedan llevar a colisiones. En redes cableadas no existe este problema porque se puede informar a toda la red que se esta teniendo una comunicación entre dos estaciones. Por ello, para solucionar las colisiones provocadas por estaciones ocultas, la mayoría de las redes inalámbricas incluyendo las redes inalámbricas de sensores, adoptaron el protocolo CSMA/CA; y con ayuda del mecanismo RTS y CTS, se ha resuelto satisfactoriamente el problema de las estaciones ocultas.



## CAPITULO III

### CAPA MAC Y EL PROTOCOLO S-MAC EN LAS WSN

En la actualidad las redes inalámbricas de sensores (WSN) son de gran utilidad, pero a pesar de esto han surgido algunas dificultades con estas redes. El principal problema, por lo que gran parte del trabajo y de este capítulo, estará enfocado a la energía que se consume en las WSN. Desafortunadamente las redes de sensores inalámbricos presentan este problema debido a que son dispositivos bastante pequeños que tienen que estar alerta en todo momento; en muchas ocasiones son colocados en el medio ambiente y la única forma de suministrarse de energía es a través de baterías. Por consecuencia, las baterías tienen una vida útil muy baja debido a su reducido almacenaje de energía. Algunos protocolos propuestos por investigadores de todo el mundo, incluyen desde la instalación de pequeños paneles solares en los sensores, hasta la idea de dormir y escuchar en tiempos determinados. Esto último ha sido estudiado con precaución, ya que, el hacer dormir y despertar a los sensores puede ayudar a solucionar el problema del ahorro en el consumo de energía, pero también puede conllevar a un retardo en la transmisión de datos entre nodos.

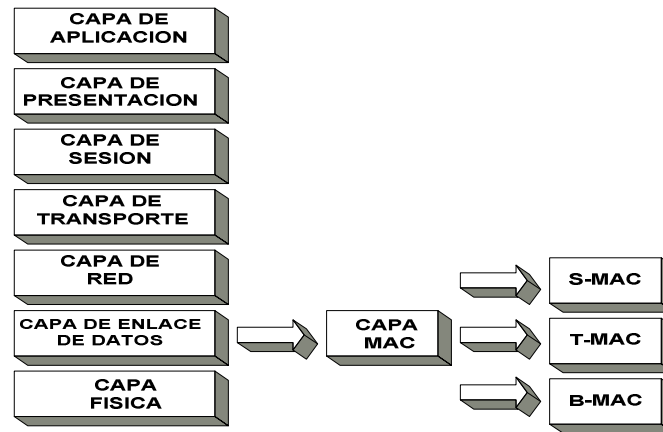
El problema del consumo de energía es muy importante en las WSN debido a que cuando va disminuyendo la carga de una batería se llega a perder la comunicación entre nodos. Algunos investigadores han optado por estudiar y proponer distintos protocolos a nivel de la capa MAC en el modelo de referencia OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos). Uno de los más aceptados es el protocolo S-MAC (*Sensor -Medium Access Control*) propuesto por el Dr. Wei Ye [1], en el que se usan ciclos de escuchar y dormir, utilizando paquetes de sincronización llamados SYNC para poder lograr que los nodos escuchen y duerman en un mismo horario. Con el protocolo S-MAC se demostró que se podía lograr un ahorro considerable en el consumo de energía.

Después de la propuesta del Dr. Wei Ye, han surgido algunos otros protocolos con funcionamiento similar, por ejemplo el protocolo T-MAC (*Timeout-Medium Access Control*), desarrollado y propuesto por el Dr. Tijs Van Dam [2], en el que se utilizan ciclos de escuchar y dormir pero se agregan periodos adaptivos de dormir. Esto significa que cuando un nodo está en estado de escuchar y no percibe nada en el medio no espera a que termine algún tiempo predeterminado de escucha, como en S-MAC, sino que inmediatamente regresa a su estado de dormir ahorrando una mayor energía.

Otro protocolo interesante que ha tenido aceptación por los investigadores es el B-MAC (*Berkeley Medium Access Control*) propuesto por el Dr. Joseph Polastre [3], el protocolo B-MAC al igual que S-MAC y T-MAC funciona con el mecanismo de escuchar y dormir, con la diferencia en que no se requieren paquetes SYNC para lograr sincronizar los horarios de escuchar y dormir. Cuando en el protocolo B-MAC un nodo se encuentra en estado de escuchar y desea transmitir datos, se envía un preámbulo para evaluar el canal, si se detecta que un nodo vecino se encuentra en estado de escuchar se inicia la transmisión de datos. El protocolo B-MAC es considerado un protocolo sencillo, que ha sido aceptado por

muchos investigadores, ya que ofrece una buena solución al problema de consumo de energía en WSN.

Para comprender mejor la ubicación de estos protocolos, ver la figura 3.1, donde se muestra la capa del modelo de referencia OSI que rige a los protocolos S-MAC, T-MAC y B-MAC.



**Fig.3.1.** Diagrama de bloques donde se muestra la ubicación de los protocolos S-MAC, T-MAC y B-MAC dentro del modelo de referencia OSI.

### 3.1.- CAPA MAC (Medium Access Control)

La capa MAC es una subcapa de la capa de enlace de datos en el modelo de referencia OSI y como su nombre lo indica es la encargada de controlar el acceso al medio, con el objetivo de mantener siempre una coordinación adecuada en la comunicación entre estaciones. Para lograr esta coordinación entre estaciones las WSN utilizan el método DCF (*Distributed Coordination Function*). El método DCF no requiere algún tipo de control central en la coordinación entre nodos. Trabaja como una red *Ad Hoc* en donde cada nodo funciona como encaminador o router y cada nodo se ve involucrado tanto en el descubrimiento como en el mantenimiento de rutas. Para controlar el acceso al medio entre estaciones el método DCF utiliza el protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) descrito en el capítulo I. Aunque CSMA/CA es un protocolo eficaz en cuanto al control de acceso entre nodos, en las WSN existe otro problema que es el consumo de energía. Para solucionar dicha situación muchos investigadores han optado por utilizar distintos protocolos, entre los que destacan por su eficacia los protocolos S-MAC (*Sensor-Medium Access Control*), T-MAC (*Timeout-Medium Access Control*) y B-MAC (*Berkeley-Medium Access Control*).



### 3.1.1.- Descripción del protocolo S-MAC (Sensor -Medium Access Control)

EL objetivo principal de S-MAC es la administración de energía en los sensores inalámbricos. El funcionamiento consiste en poner en tiempos determinados a algunos sensores en estado de escuchar y a otros en estado de dormir. Para poder entender mejor el funcionamiento del protocolo se han agregado distintos dibujos.

A continuación se explicará la forma en que se lleva a cabo la comunicación entre los sensores.

En la figura 3.2 se puede observar de forma sencilla el funcionamiento del protocolo S-MAC, en donde se encuentran alternados dos estados durante la comunicación: el estado dormir y el estado de escuchar.

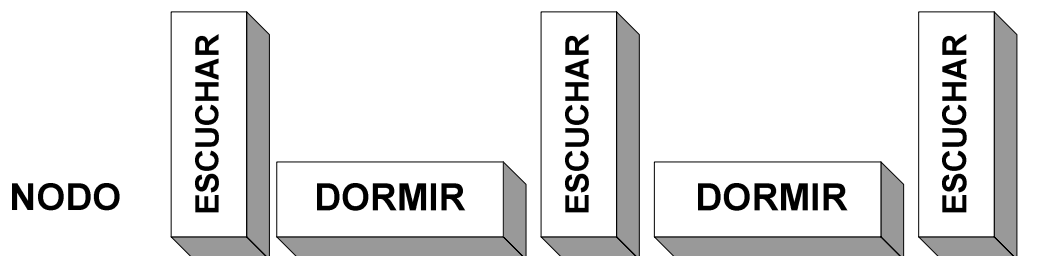


Fig.3.2. Modo en que trabaja S-MAC en un nodo.

Para lograr una comunicación eficiente entre los nodos con S-MAC, es necesario que éstos conozcan los tiempos de los estados de escuchar y dormir de los nodos vecinos para adoptar un mismo horario en el que los nodos escuchen y duerman al mismo tiempo. Para esta comunicación en S-MAC se requiere una sincronización entre nodos. En S-MAC los nodos intercambian mensajes o paquetes de sincronización llamados SYNC con los nodos vecinos. En estos paquetes se envía la información de la dirección de origen de cada nodo y los tiempos en que se encontraran en los estados de escuchar y dormir. Cada nodo contiene una tabla de registros en donde se almacenan los horarios de los estados de escuchar y dormir de los nodos vecinos.

Sin embargo aún cuando toda la red ha sido sincronizada, al transcurrir el tiempo los relojes de los nodos tienden a perder la sincronización por lo que es necesario actualizar de manera periódica la tabla de registros de cada nodo, esto se logra volviendo a enviar paquetes SYNC. En la figura 3.3 se muestra la estructura de un paquete SYNC.



Fig.3.3. Estructura del paquete SYNC.



ID del nodo.- En un paquete SYNC se lleva la información del ID del nodo que lo transmitió.

Número de Secuencia.- Es utilizado para prevenir el uso de viejos horarios.

ID del remitente.- Lleva la ID del actual remitente del paquete SYNC en uso.

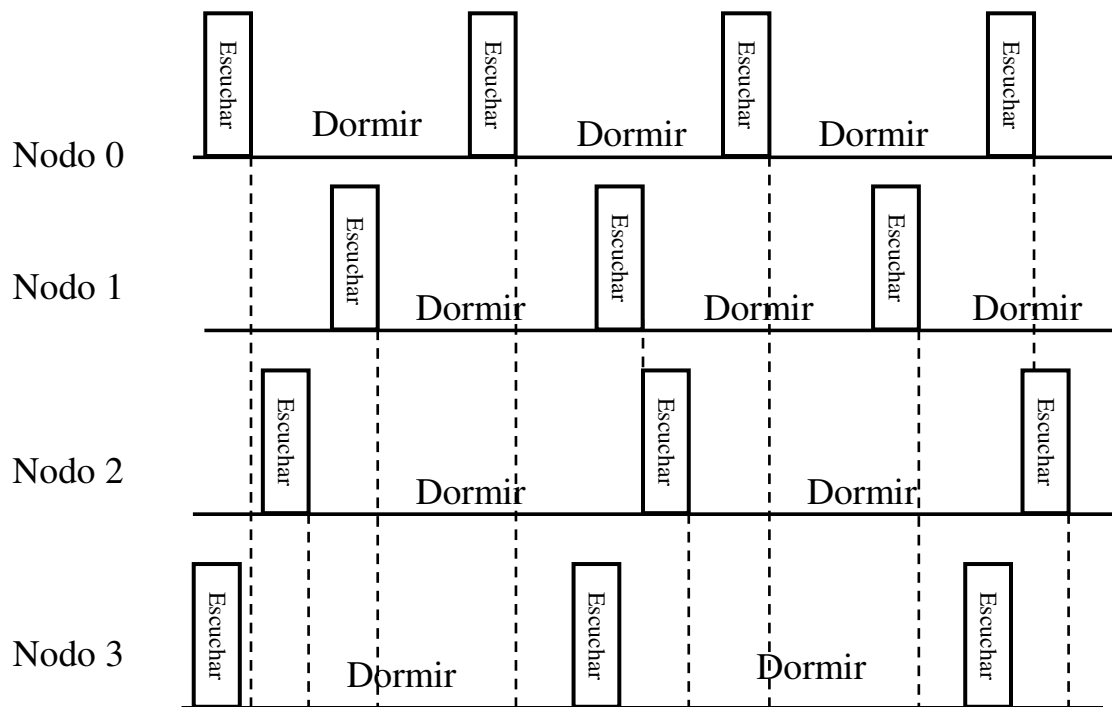
Tiempo de dormir.- Indica los horarios de dormir.

El tamaño de un paquete SYNC es de 28 bytes.

La forma en que se lleva a cabo el intercambio de horarios entre cada nodo es la siguiente:

1. Cuando un nodo esta en estado de escuchar permanece alerta por cierto tiempo, si no escucha algún horario (paquete SYNC) de un nodo vecino selecciona de forma aleatoria un horario y lo transmite a sus vecinos.
2. Si el nodo ha recibido un horario de un nodo vecino antes de crear su propio horario, éste adopta ese mismo horario y en el siguiente estado de escucha anuncia el horario que ha adoptado a los demás vecinos.
3. Sin embargo si el nodo ha seleccionado ya un horario y después recibe el horario de un nodo vecino que es distinto que el de él se presentan dos opciones:
  - a) Si el nodo ya esta siguiendo un horario con otros vecinos puede adoptar otro nuevo horario y así contar con un doble horario, sin embargo esto provoca un menor tiempo de dormir.
  - b) Por otra parte, si el nodo había seleccionado su horario pero no había estado siguiendo un horario común con otros vecinos, al recibir el horario de un vecino borra su horario y adopta ese horario.

Durante los primeros segundos de la activación del protocolo S-MAC los nodos se comportan de forma similar a la figura 3.4.



**Fig.3.4. Esquema donde se muestra como se comportan los nodos antes de la sincronización.**

En este esquema se puede observar 4 nodos en su etapa anterior a la sincronización. Los nodos tienen horarios distintos y no pueden tener una comunicación entre ellos debido a que no tienen un mismo horario, lo que hace que algunos nodos permanezcan en estado de dormir cuando se les ha enviado un paquete.

Después de algunos segundos, dependiendo del ciclo de trabajo que se esté utilizando, los nodos comienzan a sincronizarse, la figura 3.5 muestra como quedan sincronizados los nodos.

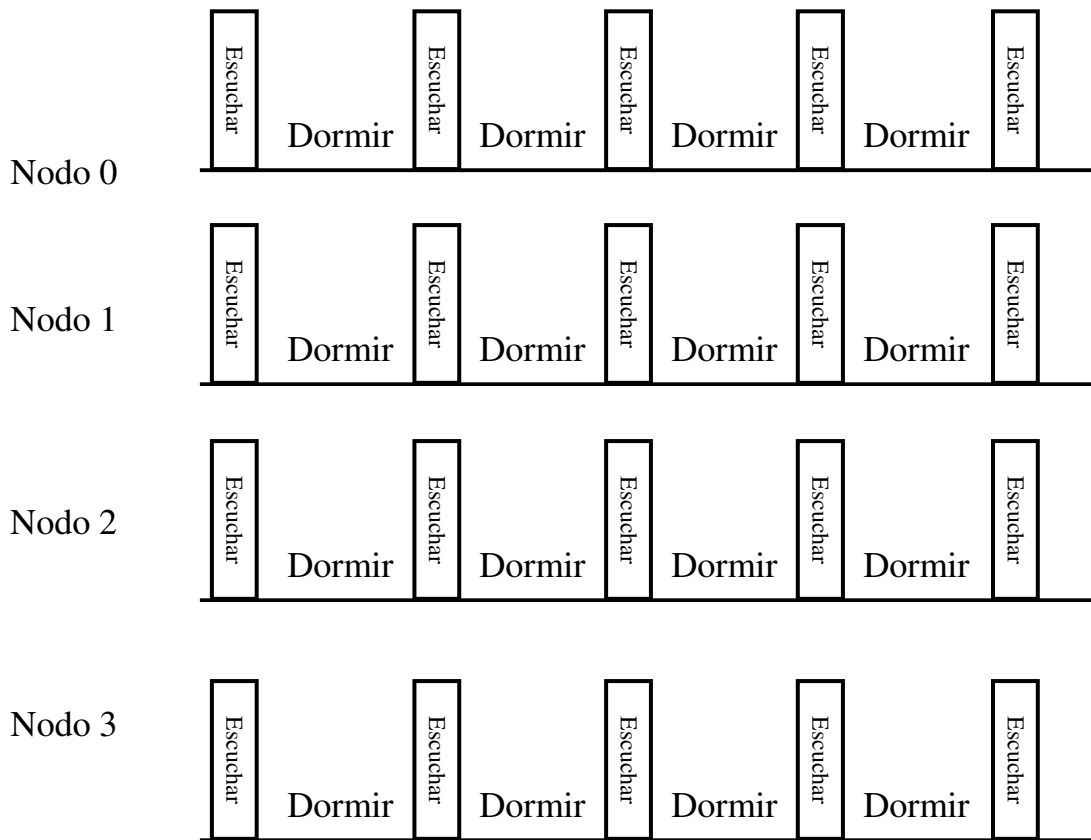


Fig.3.5. Esquema donde se muestran los nodos ya sincronizados

En este esquema se observa a los nodos después de haber intercambiado paquetes de sincronización (SYNC) y de haber logrado una sincronización correcta en todos ellos.

Los tiempos de los ciclos escuchar y dormir son configurados por el usuario y la forma más viable de modificarlos es variando el ciclo de trabajo (*duty cycle*). Esto es muy importante, ya que el programar un ciclo de trabajo adecuado puede mejorar el desempeño de los sensores. El ciclo de trabajo esta dado en porcentaje y la ecuación que lo define es la siguiente:

$$\text{Ciclo de trabajo}(\%) = \frac{\text{Periodo Activo}}{\text{Periodo Activo} + \text{Periodo Dormir}} \times 100$$

### 3.1.1.1.- Parámetros que afectan el desempeño de S-MAC :

Los principales parámetros que pueden afectar a S-MAC en su desempeño son:



- La potencia de transmisión de cada nodo. Esta puede ser configurada por el usuario respetando la potencia máxima que soporta el radio transmisor de cada sensor.
- La frecuencia de transmisión. Debe ser la misma en todos los nodos.
- El ciclo de trabajo. Es importante que sea el mismo en toda la red de sensores o en una ruta preestablecida, porque de no ser así aumenta la probabilidad de obtener colisiones.
- Las baterías. Deben de estar en buen estado; dependiendo del tipo de batería es el tiempo de vida de la transmisión de los sensores.

### 3.1.2.- PROTOCOLO T-MAC (Timeout-Medium Access Control)

T-MAC es una evolución de S-MAC, de hecho algunos investigadores lo consideran S-MAC con algunas modificaciones.

T-MAC propone la misma idea de S-MAC que es contar con estados de escuchar y dormir. A diferencia de S-MAC el protocolo T-MAC propone estados adaptivos en los estados de dormir, esto significa que cuando un nodo no detecte actividad en su estado de escuchar, inmediatamente cambiará su estado de escuchar al estado de dormir. Obteniendo con ello, un mayor ahorro en el consumo de energía en la WSN.

En T-MAC pueden ocurrir diversos eventos durante el estado de escuchar, los cuales deben ser atendidos antes de que este estado cambie al estado de dormir, para así evitar un aumento en las retransmisiones y por tanto, un aumento del tráfico en la red.

Lo que hace diferente a T-MAC de S-MAC es el tiempo por el cual los nodos permanecen en estado de dormir, ya que en T-MAC el tiempo de dormir es mayor debido a que los nodos permanecen en estado de dormir después de que no perciben o mandan mensajes. Para comprender mejor la diferencia entre estos dos protocolos véase la figura 3.6.

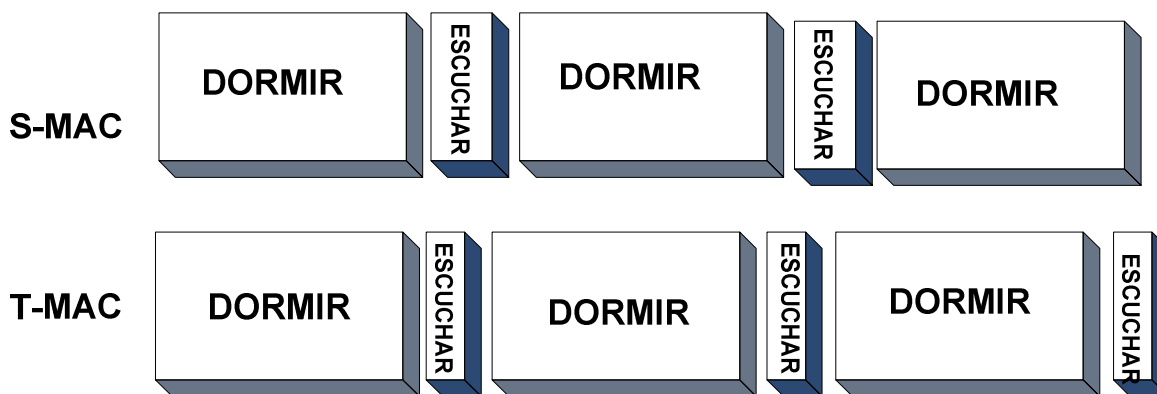


Fig.3.6. Diferencia de S-MAC y T-MAC.



### 3.1.3.- B-MAC (Berkeley Medium Access Control)

B-MAC es un protocolo de acceso al medio con sensado de portadora en redes inalámbricas de sensores, para reducir el consumo de energía. Este protocolo utiliza un muestreo de preámbulo adaptivo para minimizar el ciclo de trabajo y reducir los estados de escucha ociosos.

B-MAC utiliza la evaluación del canal CCA (*Clear Channel Assessment*), confirmación de paquetes (ACK) y escucha de baja potencia LPL (*Low Power Listening*) para la comunicación entre nodos. En este protocolo no se requiere el uso de CSMA/CA para evitar colisiones de terminal oculta. B-MAC es capaz de determinar si el canal se encuentra desocupado por medio de la evaluación del canal CCA.

Este protocolo emplea un software de control automático de ganancia para estimar el nivel de ruido. La fuerza de la señal se muestrea cuando el canal se considera libre (inmediatamente después de una transmisión). Las muestras son almacenadas en una cola FIFO. Una vez que se establece el nivel de ruido estimado, la solicitud de transmisión de un paquete inicia el monitoreo de la fuerza de la señal recibida desde el radio. B-MAC busca muestras fuera de rango en la señal recibida en forma tal que la energía del canal esté significativamente por debajo del nivel de ruido. Si existen muestras fuera de rango durante el muestreo, B-MAC considera que el canal está libre ya que ningún paquete válido estaría por debajo del nivel de ruido.

B-MAC no utiliza sincronización entre nodos por lo que no se requieren paquetes SYNC, aunque de igual forma que S-MAC, utiliza ciclos de escuchar y dormir, para el ahorro de energía. B-MAC propone que cada nodo despierte periódicamente para comprobar la actividad en el canal. En caso de detección de actividad permanece a la escucha y en caso negativo vuelve a dormir, a dicho período se le ha denominado tiempo de escucha. El tiempo entre periodos escucha, se fija mediante el denominado intervalo de revisión. Para asegurar que todos los paquetes sean recibidos, los paquetes se envían con un preámbulo cuya longitud de transmisión es superior al intervalo de revisión.

En la figura 3.7 podemos entender con mayor facilidad el protocolo B-MAC. En ella se muestra al nodo A que intenta transmitir datos, en su estado de escuchar. Antes de mandar los datos envía un preámbulo para evaluar el canal, este preámbulo es mayor al tiempo que hay entre dos estados de escucha con la intención de asegurar que el preámbulo sea escuchado por otro nodo de la red. Al ser escuchado por el nodo B, el nodo B regresa un paquete de confirmación ACK al nodo A. Entonces finalmente el nodo A manda la trama de datos al nodo B. Al finalizar la transmisión, los dos nodos regresan a su estado de dormir, ya que al igual que T-MAC, utiliza modo adaptivo.

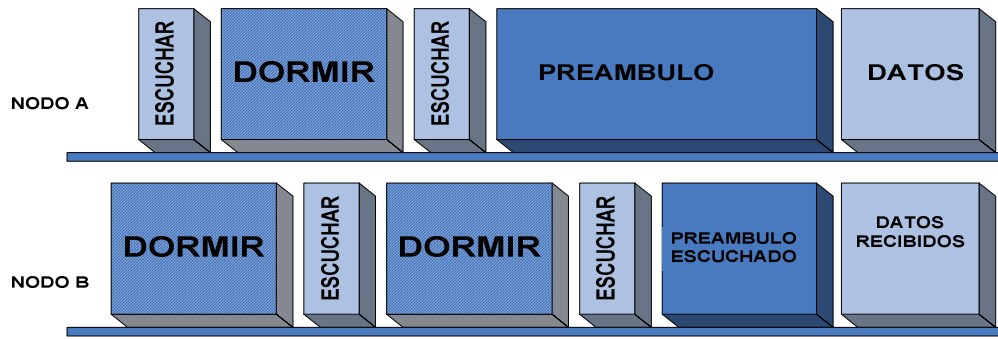


Fig.3.7. Funcionamiento B-MAC.



### 3.2.- Conclusiones del capítulo III

Las redes de sensores inalámbricas (WSN) ayudan a resolver muchos problemas que surgen en el medio ambiente. Por eso, es de suma importancia continuar con el estudio de mecanismos y protocolos que ayuden al mejoramiento de las WSN. Las investigaciones hechas hoy en día han resultado muy satisfactorias ya que han mejorado el desempeño de las WSN demostrando tanto sus diversas aplicaciones como sus beneficios.

En la actualidad los sensores inalámbricos son de un tamaño muy reducido. Algunos sensores tienen el tamaño muy similar a una moneda de 10 pesos; es de esperarse que en algunos años los sensores inalámbricos lleguen a ser de un tamaño microscópico, con costos más reducidos y con mayores aplicaciones.

S-MAC es un protocolo de acceso al medio que ha sido diseñado para las redes de sensores inalámbricas. El objetivo primordial de este protocolo es el ahorro en el consumo de energía en las WSN. S-MAC logra que los sensores tengan tiempos reducidos de trabajo mediante ciclos escuchar y dormir. Los ciclos de dormir aumentan la latencia, pero con ciclos de trabajo cortos se ayuda a que ésta no sea tan grande.

El protocolo T-MAC es una derivación de S-MAC solo que cambia su ciclo de escucha, haciéndolo escucha adaptivo; esto significa que cuando un sensor no detecta actividad en el medio regresa a dormir, por lo que no requiere completar un tiempo de escucha preestablecido, reduciendo así el consumo de energía.

El protocolo B-MAC es un protocolo que al igual que S-MAC y T-MAC usa ciclos de escuchar y dormir, sin embargo a diferencia de ellos, no requiere una sincronización entre todos los nodos de la red, por lo que no usa paquetes SYNC, dando un ahorro adicional al consumo de energía en la red. Cuando un nodo quiere transmitir datos primero envía un preámbulo para evaluar el canal. Este preámbulo debe ser mayor al tiempo que hay entre dos estados de escucha, con la finalidad de asegurar que se va a encontrar en algún instante con el estado de escucha de algún nodo vecino, después de lo cual transmite los datos. El protocolo B-MAC es considerado por algunos investigadores como un protocolo sencillo pero que ha sido muy eficiente para la disminución en el consumo de energía.





---

---

## CAPITULO IV

### DESEMPEÑO DEL PROTOCOLO S-MAC

El objetivo del actual capítulo es dar a conocer los experimentos que fueron realizados, con el protocolo S-MAC, mostrando los resultados obtenidos. Antes de esto se presentará el ejemplo de un script de un nodo inalámbrico en el simulador NS-2 (*Network Simulator-2*) ya que es este simulador fue seleccionado para llevar a cabo los experimentos de este trabajo.

En el presente trabajo se hicieron cuatro experimentos diferentes con la ayuda del simulador NS-2. El primer experimento estuvo constituido por 10 nodos con una topología lineal, el segundo experimento se realizó con 4 nodos, el tercer experimento estuvo formado por 9 nodos, y finalmente el último estuvo constituido por 16 nodos. Se seleccionaron estos cuatro distintos escenarios con la intención de observar el comportamiento de la WSN con el uso del protocolo S-MAC en diferentes circunstancias.

Durante la simulación se consideraron principalmente los siguientes parámetros:

- Energía.
- Ciclo de Trabajo.
- Tiempo de sincronización en la red.
- Retardos.

**Energía.-** Durante las simulaciones, se presentarán los resultados referentes al consumo de energía en forma de porcentajes, con la finalidad de hacer notar de forma clara el ahorro que ofrece el protocolo S-MAC.

**Ciclo de Trabajo.-** Otro parámetro importante es el ciclo de trabajo debido a que permite cambiar los ciclos escuchar y dormir, variando los estados de dormir de nuestra simulación y manteniendo constante el estado de escuchar en los nodos. Esto es de vital importancia, ya que un ciclo de trabajo puede cambiar considerablemente el consumo de energía en los nodos de una WSN. Un ciclo de trabajo de 80% consume mayor energía que un ciclo de trabajo de 10%. Para dar más claridad, el ciclo de trabajo significa en porcentaje cuanto va a permanecer el nodo en estado de escuchar durante la simulación y cuanto tiempo va a permanecer en estado de dormir. Por ejemplo en un ciclo de trabajo de 10% significa que en el 90% el sensor se encuentra en estado de dormir y en el 10% en estado de escuchar.

**Tiempo de sincronización en la red.-** El tiempo de sincronización es el tiempo que tardan los nodos en intercambiar sus horarios, usando paquetes SYNC. Asimismo, es el hecho de adoptar un mismo horario en toda la WSN o en una ruta preestablecida, para lograr una sincronización conjunta e iniciar los ciclos de escuchar y dormir adecuados. El



tiempo de sincronización varía de acuerdo al ciclo de trabajo, por ejemplo, en una WSN donde se utiliza un ciclo de trabajo del 10%, será más tardado hacer que todos los nodos intercambien horarios y adopten un mismo horario para toda la red, a diferencia del tiempo que se consume en un ciclo de trabajo de 80%. Esto debido a que en un ciclo de trabajo del 10% los nodos permanecen la mayor parte del tiempo en estado de dormir, por eso cuando se inicia el intercambio de horarios para adoptar un horario en toda la red, los nodos tienen que esperar a que un nodo vecino se encuentre en estado de escuchar para poder intercambiar información de horarios. En cambio, cuando se utiliza un ciclo de trabajo del 80%, como los nodos permanecen la mayor parte del tiempo en estado de escuchar el intercambio de horarios para adoptar un horario en toda la red se lleva a cabo en forma más rápida. De esta manera, el esperar que un nodo vecino se encuentre en estado de escuchar será menos ocioso que un ciclo de trabajo del 10%.

**Retardo.-** Después de que los nodos de una WSN han adoptado un mismo horario en toda la red, se calculo el tiempo en que tarda un paquete en llegar a un nodo destino desde su envío.

#### 4.1.- Simulador NS-2 (Network Simulator -2)

Hoy en día existen diversos programas para la simulación de redes entre los más destacados se encuentran *Opnet*, *Network Simulator*, *Glomosim*, *Omnnet ++* etc. Para la obtención de los resultados de esta investigación se uso el simulador *Network Simulator versión 2* (NS-2), debido a que no requiere licencia de uso: es un programa libre. Hoy en día es el más utilizado en todo el mundo para la simulación de redes. Por ello, se ve beneficiado con actualizaciones continuas que los investigadores buscan para su mejoramiento.

NS-2 esta escrito en C++ , las especificaciones de escenario para una simulación se escribe en lenguaje Otcl, la cual es una versión extendida de tcl (un lenguaje orientado a objetos de tipo intérprete), esto significa que las instrucciones del código se van traduciendo una por una conforme se va ejecutando. NS-2 proporciona una visualización durante la simulación, esto se logra con una herramienta llamada NAM. También podemos obtener los resultados de todos los eventos que han ocurrido durante la simulación, estos son mostrados en archivos de texto con extensión tr.

Las distintas versiones de librerías para poder usar NS-2 las encontramos de forma libre en la pagina <http://www.isi.edu/nsnam/dist/>

##### 4.1.1.- Estructura de un nodo móvil en NS-2

Para entender mejor el funcionamiento básico de un nodo móvil en el simulador NS-2, se describirán brevemente las etapas y capas que lo conforman.

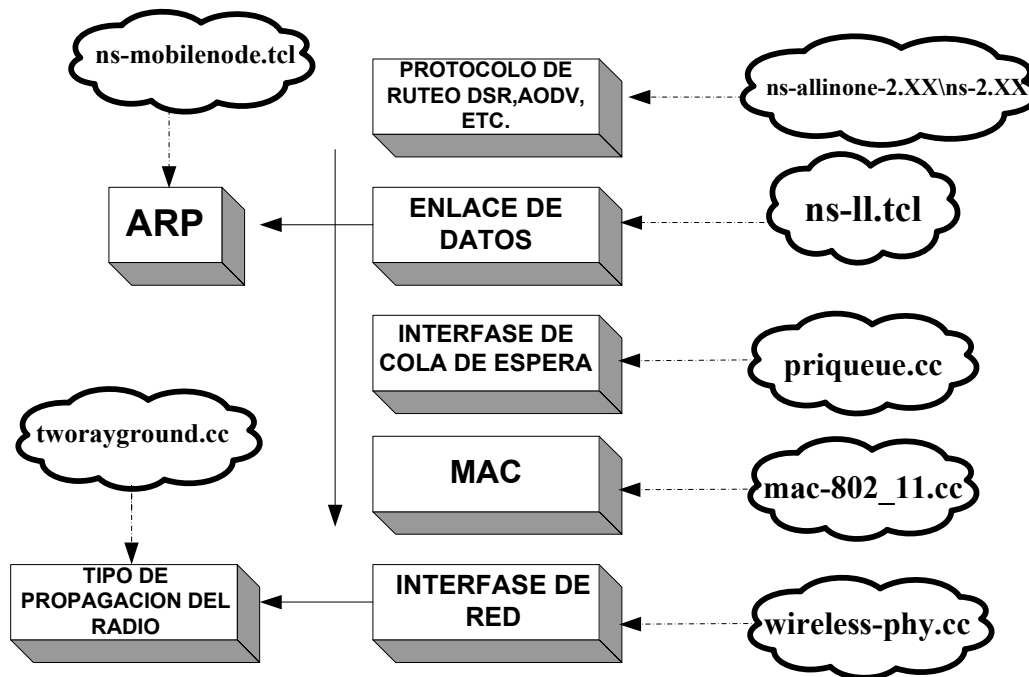


Fig. 4.1. Diagrama a bloques de la estructura de un nodo móvil en NS-2. Entre nubes se muestra la ubicación en NS-2 de los distintos bloques.

**Capa de enlace de datos.-** En esta capa se crean las simulaciones de detección de errores y fragmentación de paquetes. También en esta capa se introduce la dirección MAC (*Medium Access Control*) del nodo destino en el paquete MAC enviado. Con la ayuda de un ARP (*Address Resolution Protocol*) se convierten las direcciones IP (*Internet Protocol*) a direcciones MAC. Todos los paquetes que llegan a la capa de enlace de datos han sido enviados por un protocolo de ruteo, según la configuración del usuario, algunos protocolos son: DSR, TORA y AODV. Después la capa de enlace de datos, pasa los paquetes a una cola de espera, para enviar los paquetes a la capa MAC.

**Interfase de cola de espera.-** En esta capa se simulan los paquetes definiendo su prioridad, dejando al inicio de la cola en espera los paquetes de mayor prioridad y dejando al final los paquetes de menor prioridad.

**Capa MAC.-** En la capa MAC se simula todo lo referente al protocolo CSMA/CA, la detección física y la detección virtual en donde se incluye la simulación del mecanismo RTS-CTS.

**Interfaz de red.-** En la capa de interfaz de red se simulan las interfaces de hardware que son utilizadas por los nodos móviles para acceder al canal.



**Antena.-** Aquí se simula el tipo de antena que se va a utilizar, en el caso de nodos móviles se utiliza una antena omnidireccional.

**Tipo de propagación del radio.-** En esta etapa se define el tipo de propagación del radio, normalmente es utilizado el modelo de dos rayos. El modelo de dos rayos, considera dos caminos de propagación, siendo uno de ellos directo con el nodo receptor y el otro un reflejo en tierra antes de llegar al nodo receptor. Este modelo (al igual que el de espacio libre) predice la potencia recibida en función de la distancia. Por lo tanto, o se pierden todos los paquetes o se reciben todos. Si los nodos están suficientemente cerca, no habrá pérdidas. La potencia recibida en función de la distancia usando el modelo de dos rayos esta definida por la siguiente ecuación:

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{(h_T h_R)^2}{d^4}$$

donde:

$P_R$  es la potencia recibida.

$P_T$  es la potencia de transmisión.

$G_T$  es la ganancia de la antena transmisora.

$G_R$  es la ganancia de la antena receptora.

$h_T$  es la altura del transmisor.

$h_R$  es la altura del receptor.

$d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor.

#### 4.1.2.- Análisis de la creación de un escenario en NS-2

Para poder entender como se crea un escenario en NS-2 se analizará un ejemplo. El escenario contempla dos nodos móviles inalámbricos que podrán estar con o sin movimiento en un área con dimensión 600m x 600m.

Para comenzar con el escenario, primero se tienen que definir algunos parámetros como lo es el tipo antena, el tipo de propagación, el número de nodos, el tipo de protocolo de enrutamiento etc.

```
#=====
# Define options
#
=====
set val(chan) Channel/WirelessChannel ; # Define el tipo del canal
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ; # Define el tipo de la propagación del radio
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ; # Define el tipo de antena
set val(ll) LL ; # Define el tipo de la capa de enlace
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ; # Define el tipo de cola
set val(ifqlen) 50 ; # Define el máximo de paquetes en ifq
```



```

set val(netif) Phy/WirelessPhy ;      # Define el tipo de interfase de la red
set val(mac) Mac/802_11 ;            # Define el tipo de MAC
set val(rp) DSDV ;                   # Define el protocolo de ruteo
set val(nn) 2 ;                       # Define el número de nodos

```

- Después se tiene que crear el objeto del simulador con el siguiente comando:

```
Set ns [new simulator]
```

- Si se desea obtener de forma gráfica la simulación se debe realizar la siguiente instrucción:

```
set nf [open out.nam w]
$ns namtrace-all $nf
```

- Se define el archivo en donde se guardarán las trazas con el siguiente comando:

```
Set tracefd [open simple.tr w]
$ns trace-all $tracefd
```

- Se crea el objeto de la topología.

```
set topo [new Topography]
```

- Se determina cuales van a ser las dimensiones del área de la simulación.

```
$topo load_flatgrid 600 600
```

- Se crea el objeto GOD. En el objeto GOD (*General Operations Director*) se almacena el número total de nodos móviles y el número de saltos necesarios para llegar de un nodo a otro.

```
create-god $val(nn)
```

- A continuación se da una configuración de los nodos que estarán asociados a los parámetros que se definieron al inicio.

```

$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-propType $val(prop) \
-phyType $val(netif) \
-topoInstance $topo \
-channelType $val(chan) \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace OFF \

```



*-movementTrace OFF\*

- Se crean los nodos definiendo si aparecerán en una posición aleatoria o definida por el usuario.

```
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
set node_($i) [$ns_node ]
$node_($i) random-motion 0 ;# aparición aleatoria de los nodos
}
```

- Como se deshabilitó la opción en que los nodos aparecieran de forma aleatoria, se tiene que definir una posición inicial, esto se hará por medio de coordenadas en tres dimensiones.

```
$node_(0) set X_ 5.0
$node_(0) set Y_ 2.0
$node_(0) set Z_ 0.0
$node_(1) set X_ 390.0
$node_(1) set Y_ 385.0
$node_(1) set Z_ 0.0
```

- Si se desea que los nodos se muevan después de un tiempo determinado, se puede dar la siguiente instrucción:

```
$ns_at 50.0 "$node_(1) setdest 25.0 20.0 15.0"
$ns_at 10.0 "$node_(0) setdest 20.0 18.0 1.0"
```

Con la anterior instrucción el nodo 1 hará un movimiento a los 50 segundos a la coordenada  $x=25$   $y=15$  con una velocidad de 15m/s, y el nodo 0 empezará con un movimiento a los 10 segundos a la coordenada  $x=20$   $y=18$  con una velocidad de 1 m/s.

- Después se crea el tráfico entre los dos nodos. El tráfico que se seleccionó es CBR, ya que este tipo de tráfico garantiza la velocidad máxima a través de un canal de velocidad fija. También existe el tráfico VBR donde se garantiza una velocidad media, y el UBR que no garantiza ninguna velocidad, ni garantiza calidad de servicio. En cuanto a los protocolos de transporte se encuentran los protocolos TCP y UDP. El protocolo TCP hace confirmaciones con el nodo receptor y esto tiene como consecuencia un mayor consumo de energía; en cambio el protocolo UDP no hace confirmaciones y consume menos energía en comparación al protocolo TCP. Además con TCP no podemos manipular la tasa de transmisión que se intenta transmitir en cada sensor.

```
$set udp_(0) [new Agent/UDP] # Se crea un agente UDP.
$ns_attach-agent $node_(0) $udp_(0) # Se asocia el agente UDP al nodo 0.
$set null_(0) [new Agent/Null] # Se crea un nodo Null.
$ns_attach-agent $node_(1) $null_(0) # Se asocia el agente null al nodo 1.
$set cbr_(0) [new Application/Traffic/CBR] # Se crea un tráfico de tipo CBR.
$cbr_(0) set packetSize_ 50 # Se define el tamaño del paquete en bytes.
```



```

$nbr_(0) set interval_ 200           # Se define el intervalo de tiempo en
                                     segundos en que se enviara los paquetes.

$nbr_(0) set maxpkts_ 10000          # Se define el numero máximo de paquetes
                                     que se enviaran durante el tráfico CBR.

$nbr_(0) attach-agent $udp_(0)      # Se asocia al agente UDP el tráfico CBR
$ns_ connect $udp_(0) $null_(0)     # Se hace la conexión de los agente UDP y Null
$ns_ at 100.0 "$nbr_(0) start"      # Se define el inicio del tráfico CBR

```

- Finalmente se debe definir el final de la simulación y resetear los nodos móviles.

```

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
  $ns_ at 150.0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at 150.0001 "stop"
$ns_ at 150.0002 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
  global ns_ tracefd
  close $tracefd
}

```

Con la anterior instrucción la simulación finalizará a los 150 segundos.

## 4.2.- Experimentos

En el presente trabajo se hicieron simulaciones con distintas topologías que fueron analizadas para la obtención de los resultados.

Para llegar a los resultados obtenidos durante los experimentos, en cada topología se hicieron múltiples pruebas con el envío de paquetes de 10 bytes en distintos tiempos (cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos). En todas las pruebas se utilizó tráfico CBR por ser el que garantiza una velocidad controlada. También en todas ellas se implementaron protocolos UDP, ya que en el protocolo S-MAC es conveniente no tener confirmaciones de entrega de paquetes (como lo hace el protocolo TCP) debido a que esto causa mayor consumo de energía en las WSN. Por otra parte, el nodo transmisor de un paquete puede cambiar del estado de escuchar al estado de dormir, cuando el nodo receptor manda la confirmación al nodo transmisor que ha recibido correctamente un paquete.

También en las simulaciones se consideró un protocolo de ruteo DSR (*Dynamic Source Routing*). El protocolo DSR decide la ruta a utilizar, luego de analizar las rutas posibles. La ruta seleccionada se incluye dentro del encabezado del paquete de datos y los nodos intermedios solamente deben reenviar el paquete al nodo siguiente, esto limita el número máximo de saltos a realizar pero disminuye el procesamiento requerido en los nodos intermedios. DSR posee un mecanismo opcional que permite obtener información de

enrutamiento observando el tráfico de datos, y también permite a los nodos conocer mejor la topología actual de la red, así como descubrir caminos más cortos que los utilizados en ese instante sin generar tráfico adicional de enrutamiento. El protocolo DSR fue seleccionado en las simulaciones de este estudio debido a las ventajas mencionadas, también fue elegido por ser el protocolo de ruteo más utilizado en la actualidad en las WSN.

#### 4.2.1.- Experimento 1

La primera simulación que se realizó fue con una topología lineal formada por 10 nodos, donde la distancia considerada entre cada nodo fue de 50 metros, por ser un rango de transmisión que se puede alcanzar en las WSN. En este experimento la transmisión de datos inicia en el nodo 0 y finaliza en el nodo 9, se enviaron paquetes de 10 bytes en distintos tiempos (cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos) con tráfico CBR utilizando protocolos de transporte UDP y con DSR como protocolo de ruteo. De esta manera, los datos que se enviaron del nodo 0 fueron transmitidos al nodo más cercano, en este caso el único nodo que escucha la transmisión del nodo 0 es el nodo 1. El nodo 1 retransmite el paquete proveniente del nodo 0, y los nodos 2 y 0 lo escuchan, pero el nodo 0 ya no lo retransmite porque detecta que es el paquete que acaba de enviar. Esto lo identifica porque en cada transmisión de paquetes se guarda la secuencia que se ha llevado durante la transmisión. Después de que el nodo 2 recibe el paquete lo vuelve a retransmitir de forma similar al nodo 1, y es el nodo 3 quien recibe el paquete. La transmisión termina cuando se llega al nodo 9.

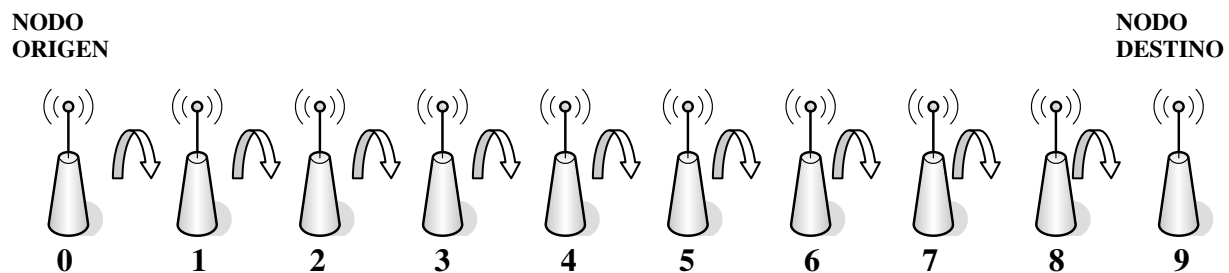
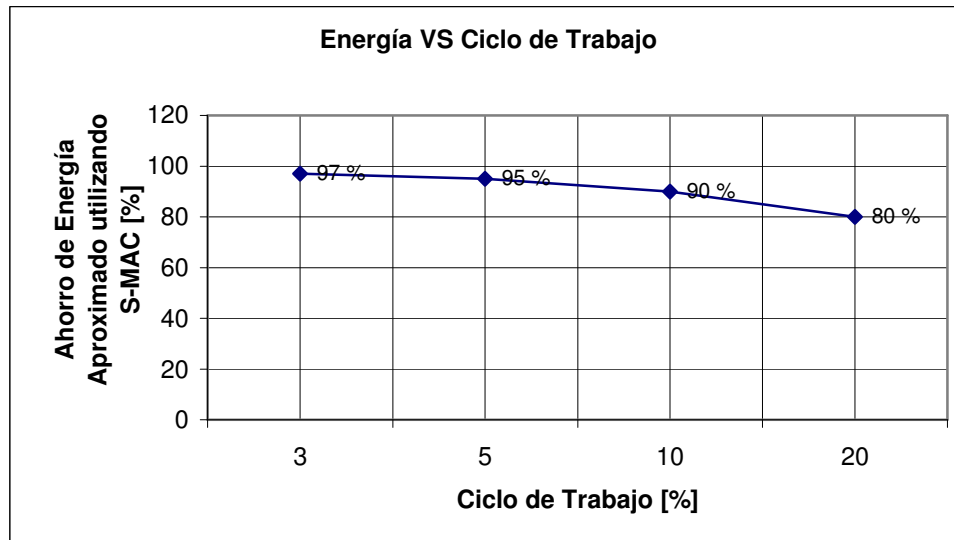


Fig.4.2. Topología lineal de 10 nodos (Primer experimento).

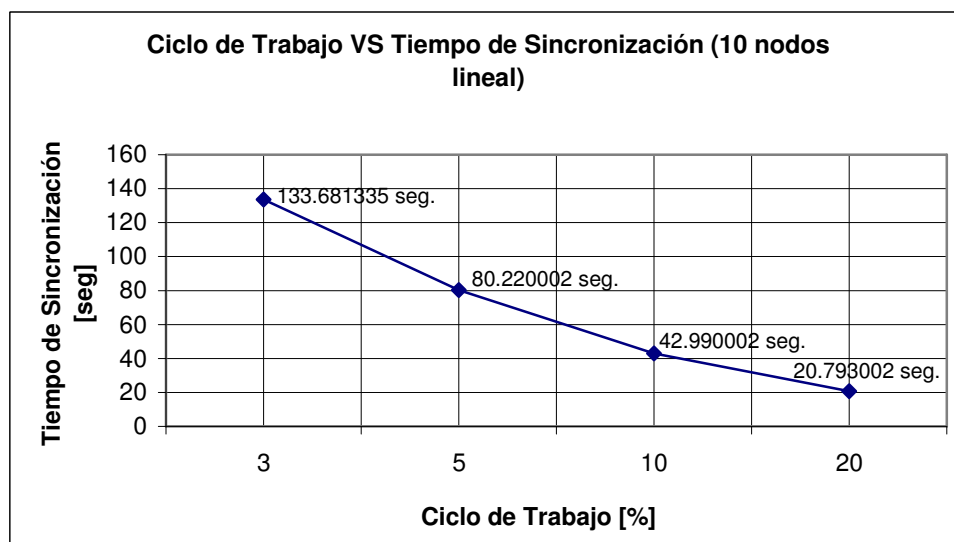
En la gráfica 4.1 se puede observar como varía el consumo de energía en la WSN con distintos ciclos de trabajo. Se observa que se ahorra mayor energía cuando se utiliza un ciclo de trabajo reducido. Esto es, debido a que con menor ciclo de trabajo los nodos duermen más tiempo consumiendo menor energía, y por el contrario, con un mayor ciclo de trabajo los nodos duermen menos por lo que se consume mayor energía.





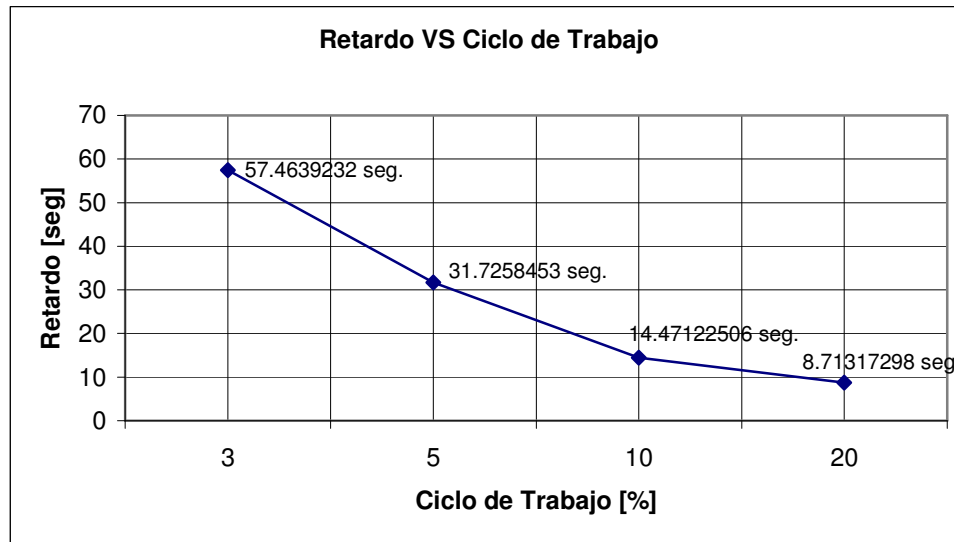
Gráfica 4.1. Resultados Topología Lineal 10 nodos Energía VS Ciclo de Trabajo.

En la gráfica 4.2 se puede observar como varía el tiempo en que tardan los nodos de la WSN en intercambiar horarios y adoptar uno solo para usarlo en toda la red, dejando ver que entre menor sea el ciclo de trabajo mayor es el tiempo en que los nodos tardan en sincronizarse.



Gráfica 4.2. Resultados Topología Lineal 10 nodos Ciclo de Trabajo VS Tiempo de Sincronización.

Después de que los nodos fueron sincronizados adoptando un mismo horario en toda la WSN, el tiempo en que tarda un paquete en llegar al nodo destino (nodo 9) desde su envío (nodo 0) con distintos ciclos de trabajo se muestra en la gráfica 4.3. Se observa como el tiempo que tarda en llegar el paquete se incrementa cuando disminuye el ciclo de trabajo.



Gráfica 4.3. Resultados Topología Lineal 10 nodos Retardo VS Ciclo de Trabajo.

#### 4.2.2.- Experimento 2

En el experimento 2 se hizo la simulación de forma similar al experimento 1, se usó una distancia entre cada nodo de 50 metros, y se mandaron paquetes de 10 bytes cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos con tráfico CBR utilizando protocolos de transporte UDP con el protocolo de ruteo DSR. En esta topología el nodo origen o el nodo que inicia la transmisión de datos es el nodo 0 y el nodo destino es el nodo 3. La diferencia con el experimento 1 es la topología. La topología estuvo formada por cuatro nodos y fue parecida a la mostrada en la figura 4.3.

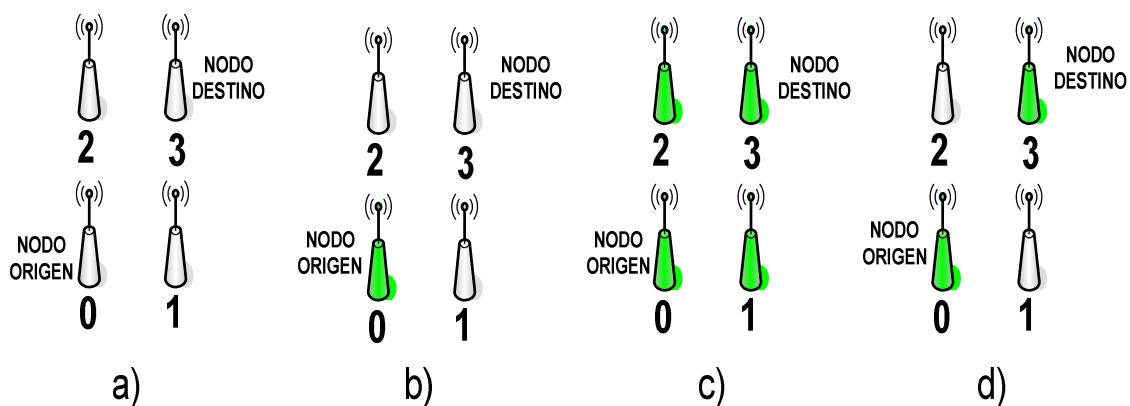
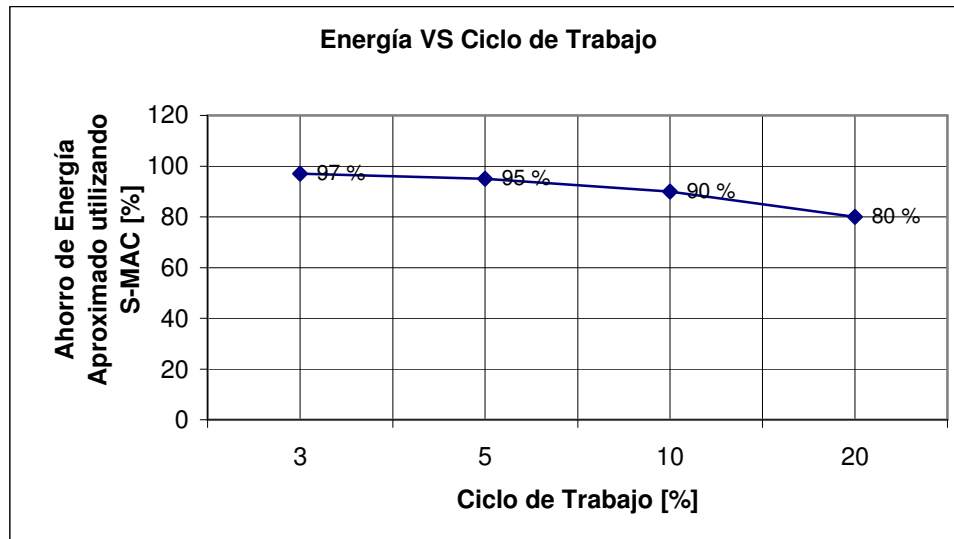


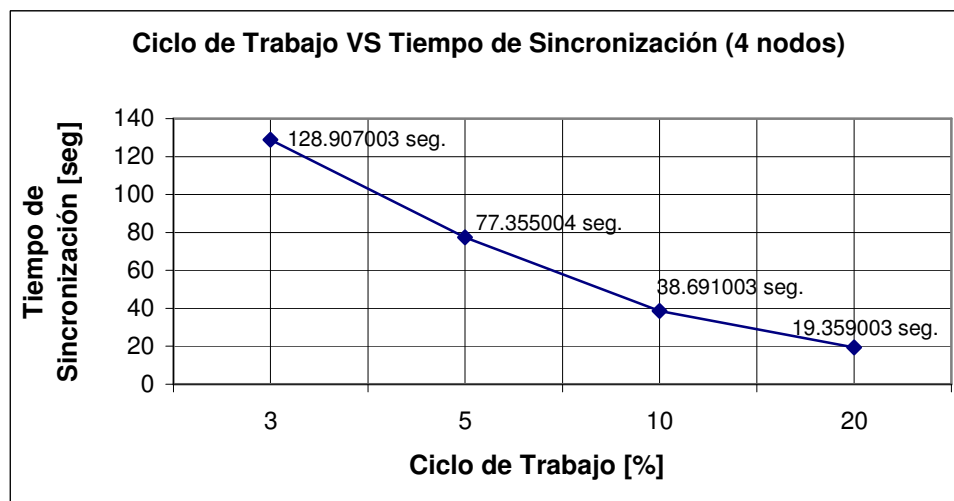
Fig.4.3. Topología con 4 nodos (Segundo Experimento). En los incisos se muestra la forma en que se lleva a cabo la comunicación de los nodos origen y destino.

La gráfica 4.4 muestra en forma porcentual el ahorro de energía en distintos ciclos de trabajo. Se puede observar que con la topología de la figura 4.3 los resultados son parecidos a los del experimento 1. Se ahorra mayor energía si se utilizan ciclos de trabajo reducidos.



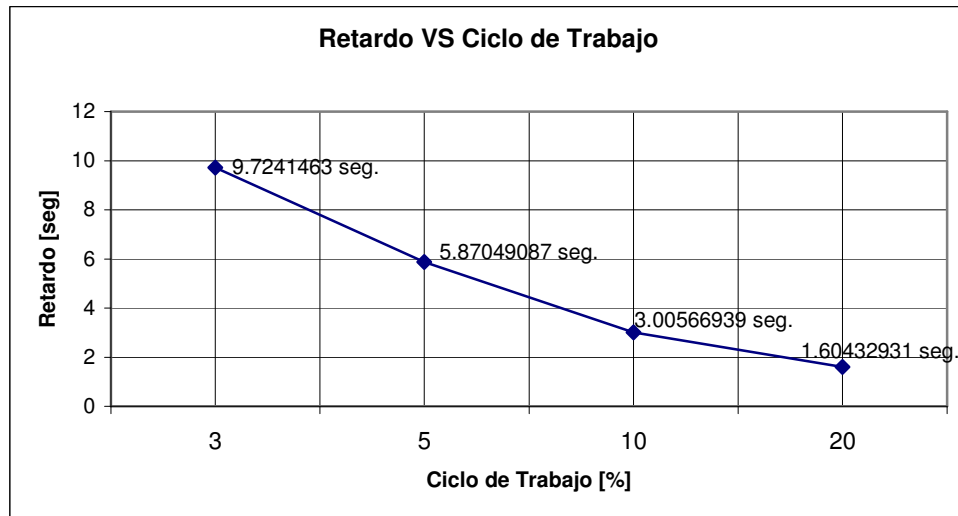
Gráfica 4.4. Resultados Topología con 4 nodos Energía VS Ciclo de Trabajo.

En la gráfica 4.5 se puede observar el tiempo en que tardan los nodos de la WSN en intercambiar horarios y adoptar uno solo para trabajar de forma sincronizada utilizando distintos ciclos de trabajo. Así se muestra que el tiempo es el mismo si se envían paquetes en cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos. También se observa que el tiempo en que tardan en sincronizarse los nodos en la WSN es mayor si se utiliza un menor ciclo de trabajo.



Gráfica 4.5. Resultados Topología con 4 nodos Ciclo de Trabajo VS Tiempo de Sincronización.

En la gráfica 4.6 se observa que el tiempo que tarda en llegar un paquete aumenta cuando disminuye el ciclo de trabajo. Todo esto posterior a que los nodos adoptaron un mismo horario en toda la WSN.



Gráfica 4.6. Resultados Topología con 4 nodos Retardo VS Ciclo de Trabajo.

### 4.2.3.- Experimento 3

Durante el experimento 3 en la simulación también se utilizó una distancia entre cada nodo de 50 metros, y se mandaron paquetes de 10 bytes cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos con tráfico CBR usando protocolos de transporte UDP y DSR como protocolo de ruteo. El nodo que inicia con la transmisión de datos es el nodo 0 y el nodo destino es el nodo 8. La topología fue similar a la figura 4.4. En este experimento el número de nodos fueron 9.

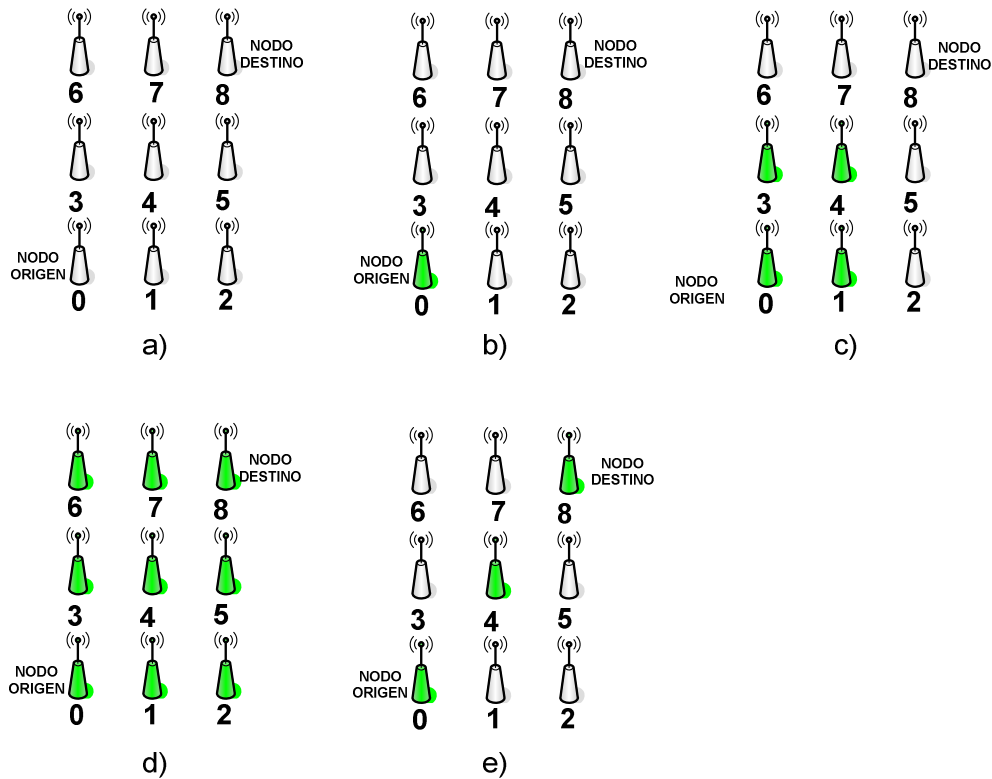
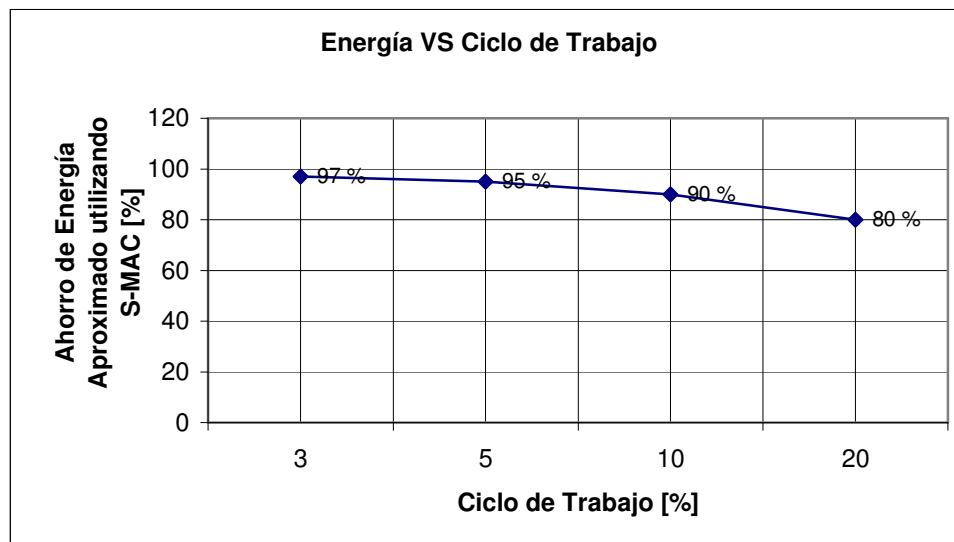


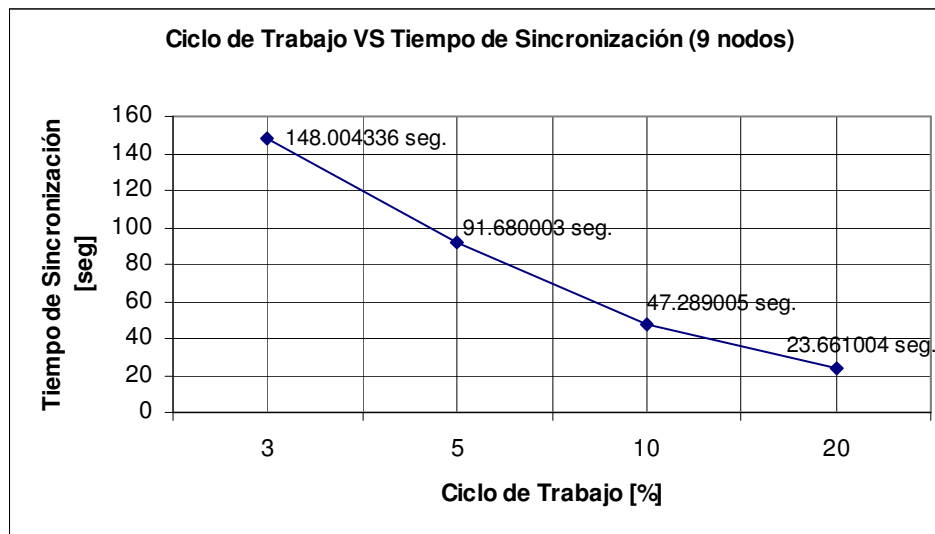
Fig.4.4. Topología con 9 nodos (Cuarto Experimento). En los incisos se muestra la forma en que se lleva a cabo la comunicación de los nodos origen y destino.

En la gráfica 4.7 se muestra el ahorro de energía que se obtuvo con el uso del protocolo S-MAC con diferentes ciclos de trabajo utilizando una topología como el de la figura 4.4, aumentando el número de nodos a 9. Como en los experimentos anteriores, el ahorro de energía es mayor si se usan ciclos de trabajo de menor porcentaje.



Gráfica 4.7. Resultados Topología con 9 nodos Energía VS Ciclo de Trabajo.

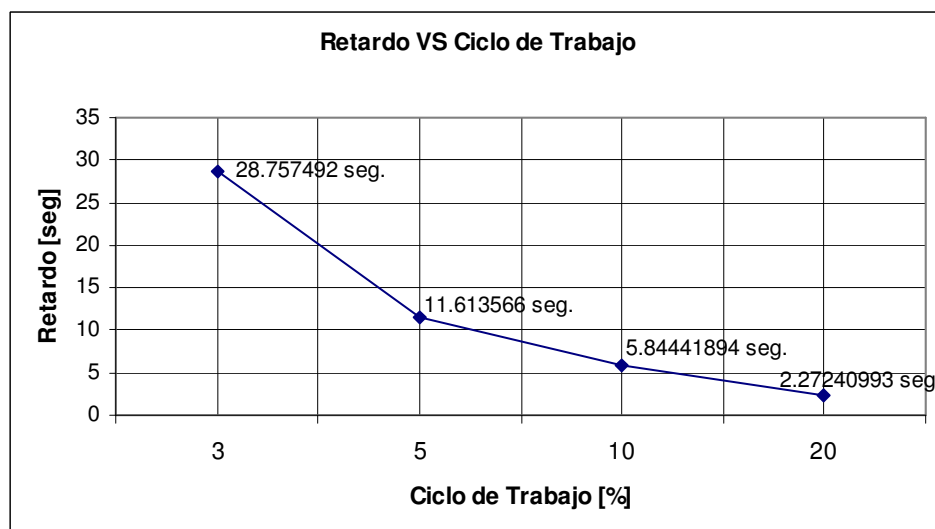
En la gráfica 4.8 se muestra el tiempo en que tardan los nodos de una WSN en adoptar un mismo horario con la topología de la figura 4.4.



Gráfica 4.8. Resultados Topología con 9 nodos Ciclo de Trabajo VS Tiempo de Sincronización.

En cuanto al tiempo que se tardan los nodos en sincronizarse para adoptar un mismo horario se puede observar que se comporta de la misma forma que los experimentos anteriores en donde el tiempo de sincronización es mayor si se disminuye el ciclo de trabajo. También es posible hacer una comparación con el experimento 1 en donde la topología es de 10 nodos de forma lineal y con el experimento actual que consta de 9 nodos, observando que el tiempo que tardan los nodos en sincronizarse es mayor en el experimento actual en comparación con el experimento 1, aún cuando el número de nodos es mayor en el experimento 1 (diez nodos).

En la gráfica 4.9 se observa que el tiempo que tarda un paquete en llegar al nodo destino (nodo 8) desde su envío (nodo 0) se incrementa cuando disminuye el ciclo de trabajo.



Gráfica 4.9. Resultados Topología con 9 nodos Retardo VS Ciclo de Trabajo.

#### 4.2.4.- Experimento 4

En el experimento 4 la simulación de la WSN estuvo formada por 16 nodos. Al igual que los experimentos anteriores la distancia entre cada nodo fue considerada de 50 metros, y se mandaron paquetes de 10 bytes cada 2, 50, 100, 200, y 500 segundos con tráfico CBR usando protocolos de transporte UDP con el protocolo de ruteo DSR. El nodo que inicia la transmisión de datos es el nodo 0 y el nodo destino es el nodo 15. La figura 4.5 muestra una topología de forma similar a la utilizada en este experimento.

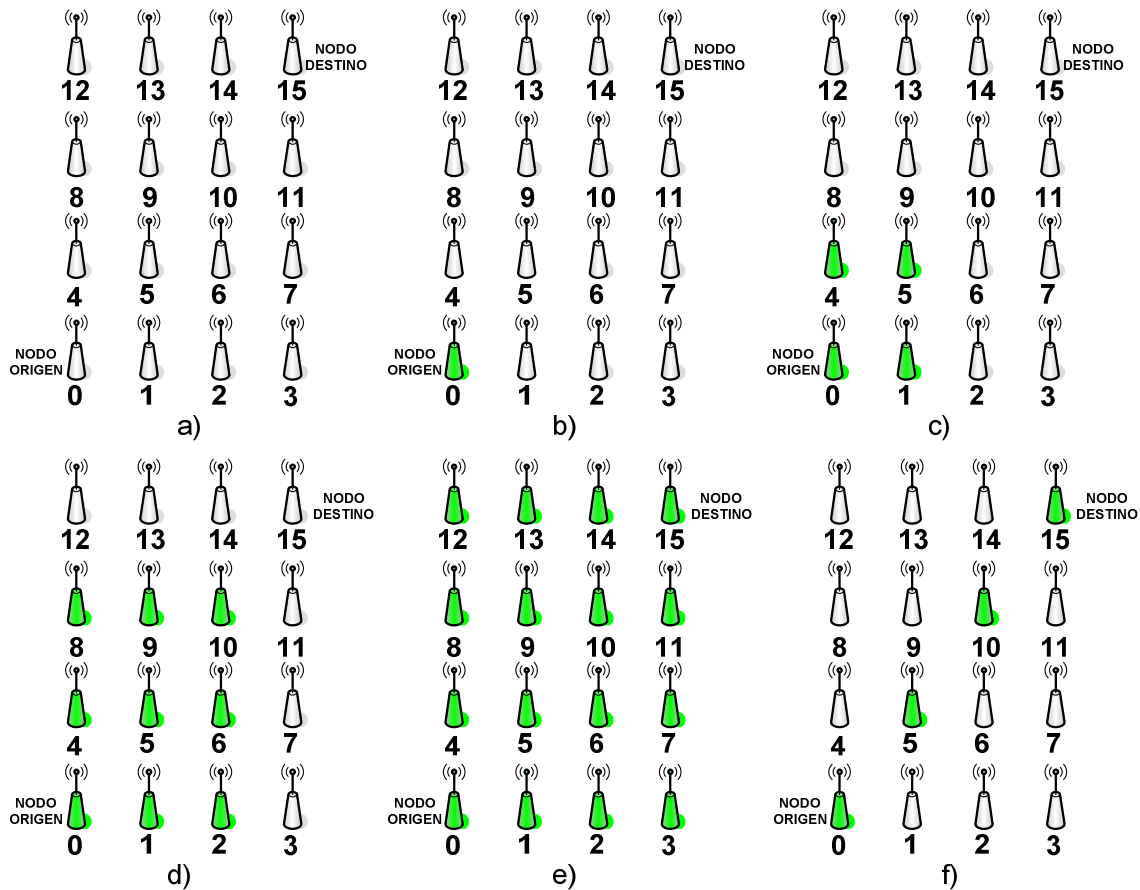
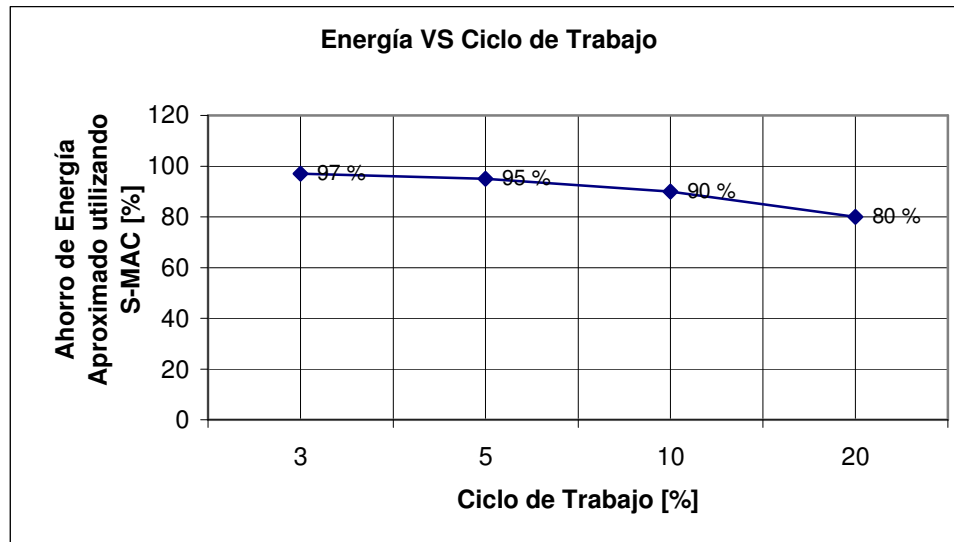


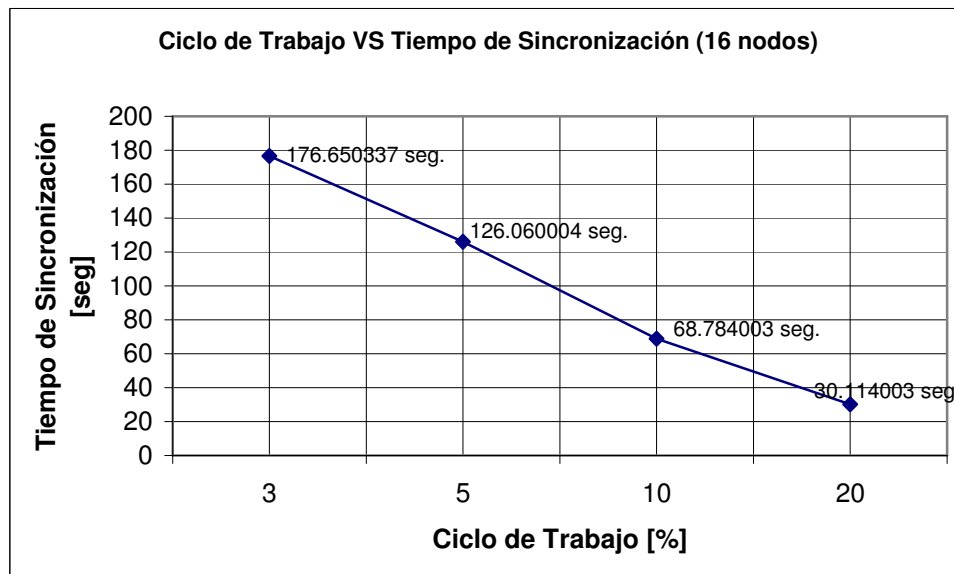
Fig.4.5. Topología con 16 nodos (Tercer Experimento). En los incisos se muestra la forma en que se lleva a cabo la comunicación de los nodos origen y destino.

En la gráfica 4.10 se muestra el ahorro de energía con los distintos ciclos de trabajo, con una topología similar a la figura 4.5. Entre menor es el ciclo de trabajo mayor es la energía que se ahorra en la WSN.



Gráfica 4.10. Tiempo de Colisión VS Ciclo de Trabajo.

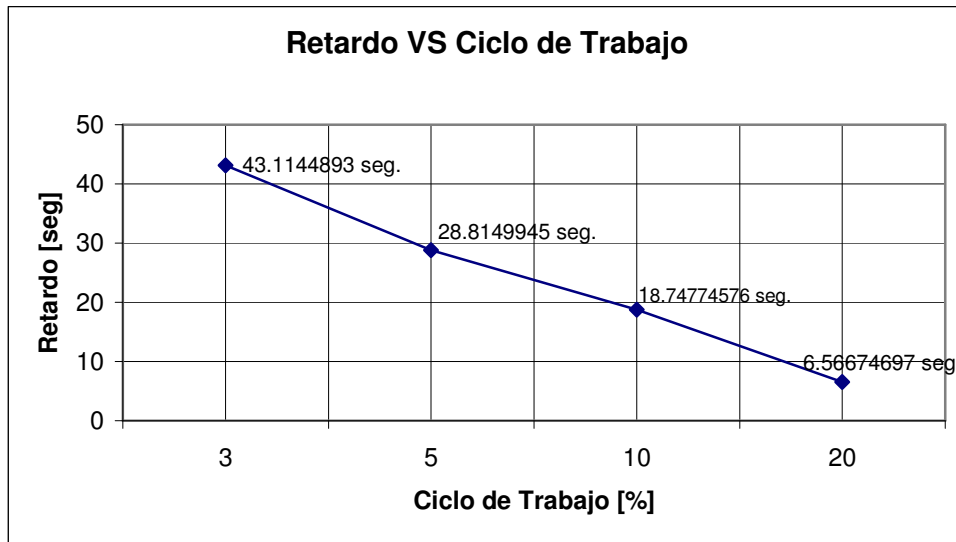
En la gráfica 4.11 se muestra el tiempo que tardan los nodos de una WSN en adoptar un mismo horario con la topología de la figura 4.5. Al compararse con la gráfica 4.8, donde se usan 9 nodos, se puede observar que el tiempo que tardan los nodos en adoptar un horario es mayor en la gráfica 4.11.



Gráfica 4.11. Tiempo de Colisión VS Ciclo de Trabajo.

Después de que los nodos adoptaron un mismo horario en toda la WSN, el tiempo que tarda un paquete en llegar al nodo destino (nodo 15) desde su envío (nodo 0) con distintos ciclos de trabajo se muestra en la gráfica 4.12. En ella se observa que el tiempo aumenta cuando disminuye el ciclo de trabajo.





Gráfica 4.12. Resultados Topología con 16 nodos Retardo VS Ciclo de Trabajo.



### 4.3.- Conclusiones del capítulo IV

De esta manera, se puede concluir que en las redes de sensores inalámbricas (WSN) utilizando el protocolo S-MAC la energía consumida varía considerablemente si se modifica el ciclo de trabajo. Se ahorra mayor energía si se utiliza un ciclo de trabajo reducido y se consume más energía si el ciclo de trabajo es alto. Por ejemplo un ciclo de trabajo de 20 % consume más energía que un ciclo de trabajo de 5 %.

El tiempo en que tardan los nodos en sincronizarse para adoptar un mismo horario en las WSN es mayor si se utiliza un ciclo de trabajo reducido. Por ejemplo en una red de sensores con un ciclo de trabajo de 3 % el tiempo de sincronía en todos sus nodos es mayor que en una red en donde su ciclo de trabajo es de 10 %.

El ciclo de trabajo que el usuario configure puede ser parte determinante en la energía y en la comunicación entre sensores. De acuerdo a los resultados de la investigación, en las WSN se recomienda usar ciclos de trabajo con bajo porcentaje en los nodos, entre 5% y 10%, debido a que ahorran una energía considerable sin que transcurra mucho tiempo en su sincronización. No obstante, hay que considerar que ciclos de trabajo de menor porcentaje ahorran más energía pero no son recomendables, ya que, los nodos se encuentran la mayor parte del tiempo en estado de dormir y esto provoca mayor retardo en su sincronización.

El tiempo que tarda un paquete en llegar a un nodo destino desde su envío es mayor cuando se utiliza un ciclo de trabajo reducido.



---

---

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES FINALES

#### 5.1.- Conclusiones

Aunque las redes de sensores inalámbricas (WSN) son una tecnología nueva, ya han demostrado su alta capacidad para ayudar a resolver múltiples situaciones que rodean al ser humano, por ejemplo en el monitoreo de algún sector en una industria, hospital, o algún área de acceso restringido como las militares.

Por ser una tecnología nueva, las WSN han tenido que sufrir de diversos problemas que como en todas las tecnologías se paga al inicio de su desarrollo. En las WSN se ha resuelto el problema de colisiones ocasionadas por nodos ocultos adoptando el protocolo CSMA/CA que incluye el mecanismo RTS-CTS. Por otra parte se ha logrado disminuir de forma importante el problema que implica el gasto de energía que consumen los nodos en estas redes, mediante protocolos propuestos por distintos investigadores, entre los que destacan: S-MAC, T-MAC y B-MAC. En el presente trabajo se describió brevemente cada uno de ellos, haciendo hincapié en el protocolo S-MAC, el cual fue utilizado para llevar a cabo distintos experimentos en los que se comprobó que mejoraba el consumo de energía en las redes de sensores inalámbricas.

Para todo investigador que busque mejorar el consumo de energía en las WSN es de suma importancia conocer perfectamente el protocolo S-MAC, debido a que la mayoría de los nuevos protocolos a nivel de la capa MAC que están dando los mejores resultados en cuanto a la disminución en el consumo de energía, se basan en los principios de S-MAC. Aunque por supuesto no se descarta la idea de que algún investigador proponga un nuevo protocolo que mejore los protocolos basados en S-MAC y que no utilice ningún mecanismo del mismo.

En un futuro cercano se espera, que el problema del consumo de energía en las WSN sea un problema mínimo y que los investigadores empleen sus investigaciones en otros temas que sirvan para seguir mejorando el desempeño de estas redes. Por lo pronto, los protocolos S-MAC, T-MAC y B-MAC son una alternativa importante para la solución del consumo de energía.



---

---

## REFERENCIAS

- [1] Ye Wei, Heidemann John, Estrin Deborah. “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”. 2002.
- [2] Tijs van Dam and Koen Langendoen. “An Adaptive EnergyEfficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks”. 2003.
- [3] Polastre Joseph, “Sensor Network Media Access Design “,2004.
- [4] Curt Schurgers Vlasios Tsiatsis Saurabh Ganeriwal Mani Srivastava. “Topology Management for Sensor Networks: Exploiting Latency and Density”,2002.
- [5] Xue Yang Nitin H.Vaidya. “AWakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay”,2004 .
- [6] Moscibroda Thomas, Rickenbach Pascal von, Wattenhofer Roger. “An.alyzing the Energy-Latency Trade-off during the Deployment of Sensor Networks”. 2006.
- [7] Dhanaraj M., Manoj B. S., and Ram Murthy C. Siva. “A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-hop Latency in Wireless Sensor Networks”,2003.
- [8] Ruzzelli Antonio G., Tynan Richard and O’Hare G.M.P. “A Low-Latency Routing Protocol forWireless Sensor Networks”,2004.
- [9] Dousse Olivier, Mannersalo Petteri, Thiran Patrick. “Latency of Wireless Sensor Networks with Uncoordinated Power Saving Mechanisms”.2004.
- [10] Schurgers Curt, Tsiatsis Vlasios, Ganeriwal Saurabh, and Srivastava Mani. “Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space”.2002.
- [11] Shnyder Victor, Hempstead Mark, Chen Borrong, Allen Geoff Werner, and Welsh Matt. “Simulating the Power Consumption of LargeScale Sensor Network Applications”. 2004.
- [12] Li Yuan, Ye Wei, Heidemann John. “Energy and Latency Control in Low Duty Cycle MAC Protocols”. 2005.
- [13] Crossbow Technology. “Getting Started Guide”. MICA.2005.
- [14] Crossbow Technology. “MoteView Users Manual”. 2006.
- [15] Crossbow Technology. “MPR-MIB Series User Manual”,2005.
- [16] TinyOS Tutorial <http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/tutorial/>



- 
- 
- [17] University of California, Berkeley. Mica2 schematics,  
[http://webs.cs.berkeley.edu/tos/hardware/design/ORCAD\\_FILES/MICA2/6310-0306-01ACLEAN.pdf](http://webs.cs.berkeley.edu/tos/hardware/design/ORCAD_FILES/MICA2/6310-0306-01ACLEAN.pdf), Mar.2003.
- [18] Hill J. and Culler D. “Mica: a wireless platform for deeply embedded networks”, 2002.
- [19] Singh S. and Raghavendra C. “PAMAS: Power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks”. 1998.
- [20] Stemm M. and Katz R. H. “Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices”, 1997.
- [21] Texas Instruments. MSP430x1xx Family User's Guide.  
<http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>.
- [22] Fall Kevin, Varadhan Kannan, “The NS Manual”. The VINT Project, UC Berkeley, LBL, USC/ISI and Xerox PARC, Julio 16, 2003
- [23] “The NAM Manual”. <http://www.isi.edu/nsnam/nam/index.html>
- [24] Marc Greis, “Tutorial for the Network Simulator NS”,  
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/>
- [25] Kaveh Pahlavan y Allen Levesque H. “Wireless Information Networks”, Wiley series in telecommunications and signal processing, Wiley-Interscience Publication, 1995.
- [26] Stallings William “Comunicaciones y Redes de Computadores”, Sexta Edición, Prentice Hall, 2002.
- [27] S.Tanenbaum Andrew, “Computer Network”, Fourth Edition, Prentice Hall, 2003.