

TESIS DEFENDIDA POR
Cecilia Coria Calvario
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Luis Armando Villaseñor González
Director del Comité

Dr. Jesús Favela Vara
Miembro del Comité

M. en C. Raúl Rivera Rodríguez
Miembro del Comité

M. en C. Raúl Tamayo Fernández
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias en Electrónica
y Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

8 de Septiembre de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN EFICIENTE EN ENERGÍA PARA UNA RED
INALÁMBRICA DE SENSORES DISEÑADA PARA LA PROTECCIÓN
AMBIENTAL EN BOSQUES**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

CECILIA CORIA CALVARIO

Ensenada, Baja California, México, Septiembre de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Cecilia Coria Calvario**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en Telecomunicaciones. Ensenada, Baja California. Septiembre 2010.

SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN EFICIENTE EN ENERGÍA PARA UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES DISEÑADA PARA LA PROTECCIÓN AMBIENTAL EN BOSQUES

Resumen aprobado por:

Dr. Luis Armando Villaseñor González
Director de Tesis

Hoy en día existe un gran interés por incorporar las recientes tecnologías de redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) para realizar el monitoreo físico y la detección de actividades ilegales como la caza furtiva, tala de árboles e incendios provocados en los bosques. Sin embargo, la implementación de WSNs presenta nuevos retos que deben ser atendidos; por ejemplo, se presenta la necesidad de utilizar estrategias que permitan reducir el consumo de energía de los sensores con la finalidad de maximizar el tiempo de vida de la red.

Este trabajo de investigación se enfoca en el diseño de un subsistema de comunicación adecuado para una WSN con aplicación en el monitoreo ambiental de bosques. Como parte del diseño se considera la integración y adaptación de distintos protocolos de capa de red, protocolos de control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés) y control de topología para redes inalámbricas de sensores, con el propósito de minimizar el consumo de energía de los nodos sensores. El diseño de la propuesta incluye la formación de una arquitectura de red jerárquica, formada por nodos cabeza de grupo (CH, por sus siglas en inglés) con la función de reportar a una estación base la información recolectada por los nodos sensores a su cargo. En cada agrupamiento de nodos sensores, se lleva a cabo la elección de nodos representantes, y a este conjunto de nodos se le denomina conjunto dominante conectado (CDS, por sus siglas en inglés). Cada CDS se compone de un número reducido de nodos sensores (con mayor energía residual) capaces de formar una dorsal de enrutamiento para brindar cobertura y conectividad a la red; durante el tiempo de operación se modifican los CDS con el propósito de repartir el consumo energético en los nodos sensores. El desempeño del modelo de simulación del subsistema de comunicación propuesto es evaluado con la herramienta de cómputo NS-2 (Network Simulator) en conjunto con MATLAB.

Palabras Clave: Redes Inalámbricas de Sensores (WSN), eficiencia en energía, subsistema de comunicación, Conjunto Dominante Conectado (CDS), Protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC).

ABSTRACT of the thesis presented by **Cecilia Coria Calvario** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS** with orientation in Telecommunications. Ensenada, Baja California, México. September 2010.

ENERGY EFFICIENT COMMUNICATION SUBSYSTEM FOR A WIRELESS SENSOR NETWORK DESIGNED FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION IN FORESTS.

Nowadays there is a great interest in incorporating the latest technologies in Wireless Sensor Networks (WSN) for physical monitoring and detection of illegal activities in forests such as poaching, logging and arson. However, the deployment of WSNs presents new challenges that must be addressed; for example, there is a need to implement strategies to reduce energy consumption of sensors in order to maximize the network lifetime.

This research focuses on the design of a communication subsystem suitable for a WSN with applications in environmental monitoring of forests. The design considers the integration and adaptation of different network layer protocols, protocols for media access control (MAC) and topology control for wireless sensor networks, in order to minimize the energy consumption of the sensor nodes. The design of the proposal includes the formation of a hierarchical network architecture, consisting of Cluster Head (CH) nodes in charge of reporting the information collected by the sensor nodes under its control to a base station. Within each cluster, an election process of representative nodes is executed, and this group of nodes is defined as the Connected Dominating Set (CDS). Each CDS is composed of a small number of sensor nodes (with higher residual energy) which are capable of establishing a routing path to provide coverage and connectivity to the network; during the time of operation, the CDS changes to distribute the energy consumption in all the sensor nodes. The performance of the simulation model of the proposed communication subsystem is evaluated using the computational tool NS-2 (Network Simulator) in conjunction with MATLAB.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), energy efficiency, communication subsystem, Connected Dominating Set (CDS), Medium Access Control protocols (MAC).

Con mucho cariño dedico este trabajo

*A mis padres José H. Coria y Leticia Calvario
A mis hermanos Jorge, Guadalupe y Elizabeth
A Eduardo J. Patrón.*

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta este punto en mi vida, en el cual, a pesar de las adversidades no me dejó caer. De igual forma, quiero agradecer a mi familia, quienes siempre estuvieron conmigo brindándome su apoyo e incondicional confianza, gracias a todos y cada uno de ellos por ser uno de los pilares más importantes en mi vida. Agradezco profundamente a Eduardo Patrón, por su motivación, comprensión y compañía durante estos años, representando otros de los pilares que más quiero en la vida.

A mi prima Verónica, por creer en mí y por darme ánimos para continuar.

A mis amigas, Leslie, Lupita, Neisy y Zaira quienes siempre confiaron en mí y han seguido de cerca en mis estudios alentándome con su amistad, gracias Amiguis.

A mis amigos y compañeros de generación, Adán, Alejandro, Daniel E., Daniel G., Eduardo, Israel, Iván, Jacobo, Jaquelin, Jesús, Juan Carlos, Miguel, Naihvy y Paulino, por compartir tantas desveladas de estudio y recreación.

A mis compañeros y grandes amigos que conocí en CICESE, Aldo, Oscar, Silvia, Obed, Joel, Erica, y Paul, gracias por compartir sus conocimientos y amistad.

Agradezco a mi director de tesis Dr. Luis A. Villaseñor González por sus acertados comentarios en la realización de este proyecto, además de mostrar disposición y confianza en todo momento. Gracias a los miembros de mi comité, Dr. Jesús Favela, al M. en C. Raúl Tamayo y en especial al M. en C. Raúl Rivera por compartir sus consejos y conocimientos para encaminar este trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de estudios de posgrado otorgada.

Quiero agradecer también al CICESE, en especial al depto. de Electrónica y Telecomunicaciones y a la dirección de estudios de posgrado, por el apoyo económico brindado.

Agradezco a todos los doctores y maestros que participaron en mi formación académica en CICESE y muy especialmente a mis coordinadores de posgrado, Dr. Arturo Velázquez, Dr. Luis A. Márquez, Dra. Ma. Del Carmen Maya y Dr. Roberto Conte por su consejo y orientación para mi permanencia en esta institución.

CONTENIDO

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
Capítulo I. Introducción	1
I.1. Marco de Referencia.....	1
I.2. Antecedentes.....	3
I.3. Planteamiento del Problema.....	4
I.4. Objetivos.....	5
I.5. Metodología de Investigación.....	6
I.6. Infraestructura Empleada.....	6
Capítulo II. Protocolos para Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)	9
II.1. Introducción.....	9
II.2. Protocolos de Capa de Enlace de Datos.....	10
II.3. Clasificación de protocolos de capa MAC.....	10
II.3.1. Protocolos de capa MAC para WSN basados en calendarización.....	11
II.3.1.1. SMACS.....	12
II.3.1.2. PEDAMACS.....	13
II.3.1.3. S-MAC.....	13
II.3.1.4. LEACH.....	21
II.3.2. Protocolos basados en Acceso Aleatorio.....	23
II.3.2.1. IEEE 802.11.....	23
II.3.2.2. PAMAS.....	24
II.3.2.3. EC-MAC.....	24
II.3.2.4. TRAMA.....	26
II.3.3. Elección de topología.....	26
II.3.3.1. Power Management Protocol for Regular Wireless Sensor Networks...	27
II.4. Protocolos de Capa de Red.....	34
II.4.1. LEACH.....	35
II.4.2. SPIN.....	35
II.4.3. GAF.....	36
II.5. Resumen del capítulo.....	38

CONTENIDO (continuación)

	Página
Capítulo III. Diseño de la propuesta para un subsistema de comunicación eficiente en energía.....	39
III.1. Características de diseño para WSN.....	39
III.1.1. Análisis de la distribución de probabilidad de los nodos.....	41
III.2. Características del diseño propuesto.....	44
III.3. Integración de la propuesta.....	47
III.3.1. Topología de red.....	47
III.3.2. Creación de rejilla virtual.....	49
III.3.3. Número de nodos.....	52
III.3.4. Rotación de CDS.....	53
III.4. Resumen del capítulo.....	55
Capítulo IV. Simulación en NS-2.....	56
IV.1. ¿Qué es Network Simulator?.....	56
IV.2. S-MAC en NS2.....	57
IV.2.1. Modos de Operación de S-MAC.....	58
IV.2.2. Parámetros configurables de S-MAC.....	60
IV.2.3. Cálculo de duración de trama S-MAC.....	62
IV.3. Adaptación de NS-2 para la simulación de la propuesta.....	64
IV.3.1. Calendarización de los nodos.....	64
IV.3.1.1. Nodos con radio activo.....	66
IV.3.1.2. Nodos con radio apagado.....	68
IV.3.2. Actualización de Energía.....	70
IV.4. Simulación de la propuesta del subsistema de comunicación.....	72
IV.5. Resumen de capítulo.....	75
Capítulo V Simulación y Resultados.....	76
V.1. Parámetros de Simulación.....	76
V.1.1. Interfaz de radio y potencia.....	76
V.1.2. Tamaño del área y cantidad de nodos.....	78
V.1.3. Configuración de Protocolos MAC y capa de red.....	79
V.2. Metodología para la simulación.....	79
V.2.1. Monitoreo de energía.....	80
V.3. Resultados Preliminares.....	83
V.3.1. S-MAC original al 5%.....	83
V.3.2. S-MAC original al 10%.....	85
V.3.3. S-MAC original al 25%.....	86
V.3.4. S-MAC al 50%.....	87
V.4. Cambio de CDS con S-MAC modificado.....	89
V.4.1. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 5%.....	91
V.4.2. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 10%.....	93

V.4.3. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 25%.....	95
V.4.4. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 50%.....	97
V.5. Análisis de Resultados.....	98
V.5.1. Ciclos de trabajo distintos con igual duración.....	100
V.5.2. S-MAC al 20% con 600N.....	104
V.6. Resumen de capítulo.....	106
Capítulo VI. Conclusiones y Trabajo Futuro.....	108
VI.1. Conclusiones y Aportaciones.....	108
VI.2. Trabajo Futuro.....	110
Referencias.....	112
ANEXO A. Factores Críticos de Diseño de un Protocolo de subcapa MAC para WSN.....	117
ANEXO B. Teoría de Ocupación.....	120
ANEXO C. Algoritmo para procesamiento de paquetes SYNC.....	122

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>		Página
1	Esquema de una red inalámbrica de sensores atendiendo un evento.....	2
2	Componentes de un nodo sensor.....	2
3	Consumo de potencia de un nodo sensor.....	3
4	Ejemplo de ciclo de trabajo al 50% en S-MAC.....	14
5	Esquema de la intersección de varios nodos que comparten más de una calendarización.	16
6	Esquema de básico de calendarización SMAC.....	17
7	Esquema de calendarización SMAC con uso de ALP.....	18
8	Sensado de portadora virtual utilizando NAV.....	19
9	Fragmentación de paquetes.....	20
10	Clasificación de redes por el número de vecinos.....	27
11	Transición de nodos sucesores participantes en CDS.....	30
12	Conjuntos Básicos Dominantes para una red de malla regular compuesta de 8 x 8 nodos.....	33
13	Estructura de una red jerárquica.....	35
14	Separación máxima entre nodos representantes.....	37
15	Estructura de red jerárquica de 2 niveles.....	45
16	Modelo de interfaz inalámbrica, módulo de comunicación AeroComm AC4790-1000.....	46
17	Topología regular para una red en malla de 5 x 5.....	49
18	Ejemplo de una rejilla virtual de lado igual a 8.....	50
19	Separación inter celdas con nodos de radio nominal de 250 metros	51
20	Trama lógica N, resultado de varias tramas n de S-MAC.....	54
21	Formato de trama S-MAC básico.....	60
22	Consumo de Energía promedio para S-MAC al 5%.....	83
23	Histograma de consumo S-MAC al 5%.....	84
24	Consumo de energía promedio para S-MAC original al 10%.....	85
25	Histograma de consumo S-MAC al 10%.....	86
26	Consumo promedio de energía para S-MAC original al 25%.....	86

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<i>Figura</i>		Página
27	Histograma de consumo S-MAC al 25%.....	87
28	Consumo promedio de energía para S-MAC original al 50%.....	88
29	Comparativa para ciclos S-MAC.....	89
30	Consumo de energía de S-MAC al 5% con rotación de CDS.....	91
31	Histograma de consumo para S-MAC al 5% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.....	92
32	Consumo de energía de S-MAC al 10% con rotación de CDS.....	93
33	Histograma de consumo para S-MAC al 10% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.....	94
34	Consumo de energía de S-MAC al 25% con rotación de CDS.....	95
35	Histograma de consumo para S-MAC al 25% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.....	96
36	Consumo de energía de S-MAC al 50% con rotación de CDS.....	97
37	Histograma de consumo para S-MAC al 50% con a) 100N, b) 300N y c) 500N.....	98
38	Consumo de energía de S-MAC al 10% con rotación de CDS de 600N y 1000N.....	100
39	Histograma de consumo para S-MAC al a) 10% con 600N, b) 5% con 300N, c) 10% con 1000N y d) 5% con 500N.....	101
40	a) Despliegue aleatorio uniforme de 372 nodos. b) Selección de nodos representantes en CDS 1.....	102
41	Consumo de energía de S-MAC al 10% con 300N y al 20% con 600N.....	104
42	a) Histograma de consumo para 10% con 300N. b) Histograma de consumo para 20% con 600N.....	105
43	Distribución de celdas basada en la teoría de ocupación para garantizar condiciones suficientes de conectividad.....	121

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>		Página
I	Comparativa de protocolos MAC para redes inalámbricas de sensores.....	25
II	Cantidad de nodos n participantes en un área de sensado de 888 x 888 metros.....	53
III	Características básicas y en desarrollo (JOURNAL_PAPER).....	58
IV	Parámetros ajustables para inicialización de smac.....	58
V	Algunos parámetros de capa física y de capa MAC.....	61
VI	Parámetros de capa MAC configurables.....	61
VII	Definición de estados junto con número de identificador.....	70
VIII	Fase de inicialización de variables.....	72
IX	Creación de nodos con atributos de simulación.....	73
X	Formación de tramas virtuales para la rotación de CDS.....	73
XI	Elección y participación de nodos representantes.....	74
XII	Cierre y finalización de la simulación.....	74
XIII	Parámetros predeterminados para la unidad de radio.....	76
XIV	Tabla de valores de Energía.....	77
XV	Número de nodos y ambiente de sensado.....	78
XVI	Configuración S-MAC.....	79
XVII	Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 5%.....	84
XVIII	Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 10%.....	85
XIX	Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 25%.....	87
XX	Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 50%.....	88
XXI	Duración de tramas virtuales S-MAC.....	90
XXII	Comparación de porcentaje de consumo de energía entre S-MAC original y S-MAC modificado.....	99

LISTA DE TABLAS (continuación)

<i>Tabla</i>		Página
XXIII	Comparación en tiempo de rotación de CDS para 5% (300N y 500N) y 10% con (600N y 1000N).....	102
XXIV	Comparación en tiempo de rotación de CDS para 10% con 300N y 20% con 600N.....	105
XXV	Algoritmo General para procesamiento de paquetes SYNC. Basado en (Feng, 2005).....	122

LISTA DE ACRÓNIMOS

AODV	Ad hoc On Demand Distance Vector (Vector de Distancia En Demanda Ad hoc)
BDS	Basic Dominating Set (Conjunto Dominante Básico)
BS	Base Station (Estación Base)
CDMA	Code Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Código)
CDS	Connected Dominating Set (Conjunto Dominante Conectado)
CH	Cluster Head (Cabeza de Clúster)
CSMA	Carrier Sense Multiple Access (Acceso Múltiple por Sensado de Portadora)
CTR	Critical Transmitting Range (Alcance de Transmisión Crítico)
CTS	Clear To Send (Libre para enviar)
DIFS	DCF Interframe space (Espacio inter-trama DCF)
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)
EIFS	Extended Interframe Space (Espacio inter-trama extendido)
FDMA	Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencia)
GAF	Geographical Adaptive Fidelity (Fidelidad Geográfica Adaptable)
LLC	Logical Link Control (Control de Enlace Lógico)
MAC	Medium Access Control (Control de Acceso al Medio)
NAV	Network Allocation Vector (Vector de Asignación de Red)
PAMAS	Power Aware Multi-Access protocol with Signalling for Ad Hoc Networks (Protocolo Multi-Acceso Consciente de Energía con Señalización para redes Ad Hoc)
PMP	Power Management Protocol for Regular Wireless Sensor Networks (Protocolo Administrador de Energía para Redes Inalámbricas de Sensores Regulares)
RTS	Request To Send (Petición para enviar)
SIFS	Short Interframe Space (Espacio inter-trama corto)
S-MAC	Sensor Networks - Medium Access Control (MAC para Redes de Sensores)

LISTA DE ACRÓNIMOS (continuación)

TDMA	Time Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Tiempo)
WLAN	Wireless Local Area Network (Red Inalámbrica de Área Local)
WSN	Wireless Sensor Network (Red Inalámbrica de Sensores)

Capítulo I

Introducción

I.1. Marco de Referencia

Una red inalámbrica de sensores (WSN, Wireless Sensor Network, por sus siglas en inglés) consiste de pequeños dispositivos con capacidades de sensado, cómputo y comunicación inalámbrica. Este tipo de red está conformada por cientos o miles de nodos desplegados en un campo para producir información de alta calidad acerca del ambiente físico (Al-Karaki y Kamal, 2004).

El comportamiento general de una red inalámbrica de sensores radica en que cada nodo sensor tiene la capacidad de coleccionar y encaminar los datos a otros nodos sensores o a la estación base. Una Estación Base (BS) puede ser un nodo externo o un nodo móvil capaz de conectar la red de sensores a una infraestructura de comunicación existente, como la Internet, donde un usuario puede acceder a los datos reportados. Debido a las características de este tipo de redes (e.g. limitado rango de transmisión de los sensores) la información generalmente se propaga a lo largo de varios nodos de la red antes de llegar a su destino final.

En la Figura 1 se ilustra la arquitectura de una red inalámbrica de sensores. En el escenario que se ilustra, el evento es detectado por un nodo sensor, el cual se encarga de generar un reporte relacionado con dicho evento. El reporte se propaga dentro de la red de sensores hasta que éste llega a la estación base. Finalmente el reporte se envía hacia el nodo sumidero, o también denominado como el nodo *sink* (Ilyas y Mahgoub, 2005).

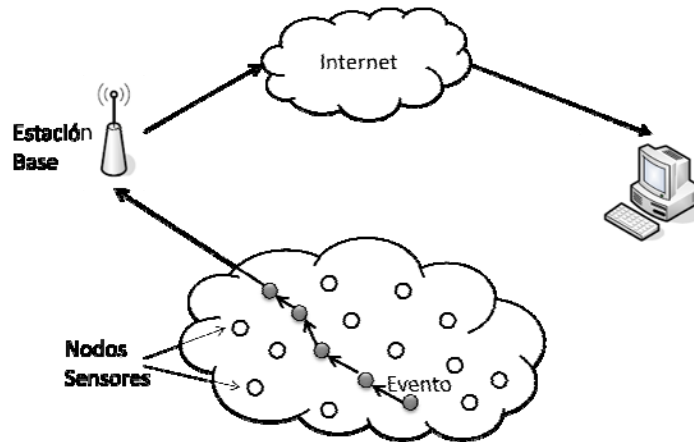


Figura 1. Esquema de una red inalámbrica de sensores atendiendo un evento.

En la Figura 2 se muestran los componentes de un nodo sensor, donde se observa que cada dispositivo se divide en cuatro partes esenciales: subsistema de sensado, subsistema de procesamiento, subsistema de comunicación, y todos ellos alimentados por la unidad de energía (Al-Karaki y Kamal, 2004).

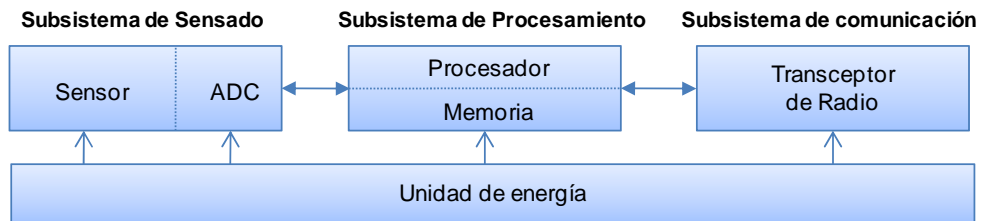


Figura 2. Componentes de un nodo sensor. Basado en Al-Karaki y Kamal (2004).

La unidad de energía es la parte del nodo sensor que proporciona el suministro energético para los diferentes componentes del dispositivo. Este suministro energético puede ser proporcionado por medio de baterías, celdas solares u otra fuente energética, lo que produce que el tiempo de vida útil del nodo sea limitado. El subsistema de sensado literalmente se utiliza para sensar variables físicas como temperatura, imágenes, sonidos, gases, etcétera.

El subsistema de procesamiento está compuesto por un microcontrolador, en el cual se procesan los datos sensados, se realizan algunos cálculos mínimos y luego se construye un paquete que contendrá la información procesada; una vez empaquetado, la información puede ser enviada por el canal de comunicación inalámbrico. Este subsistema contiene además una memoria local para facilitar las operaciones de procesamiento.

El subsistema de comunicación básicamente está compuesto por un transceptor de radio frecuencia que se utiliza para intercambiar o controlar la adquisición de datos. El mayor consumo de energía en el nodo sensor se presenta en el subsistema de comunicación, donde la actividad que consume más energía se relaciona con el intercambio de información entre nodos sensores (Jawad Ali y Roy, 2008; Van Dam y Lagendoen, 2003). La Figura 3 muestra el consumo de potencia de un nodo sensor para cada uno de sus diversos componentes, donde se observa que el subsistema de comunicación consume la mayor parte.

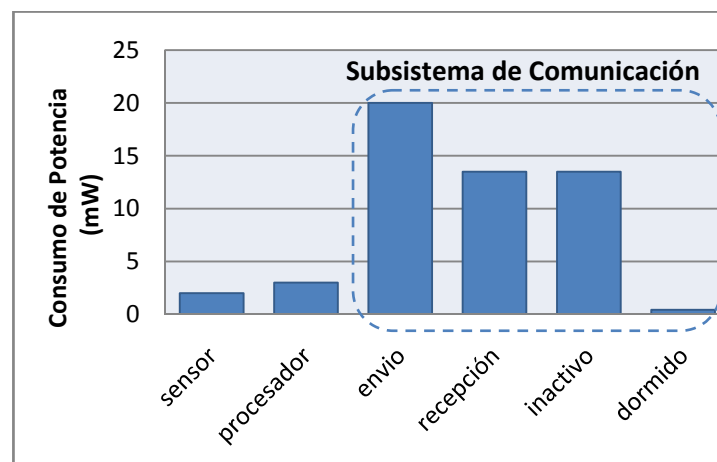


Figura 3. Consumo de potencia de un nodo sensor, según datos de Jawad Ali y Roy, 2008.

I.2. Antecedentes

La incorporación de las recientes tecnologías de redes inalámbricas de sensores adquiere mayor interés en la actualidad, partiendo del hecho que éstas pueden ser utilizadas en una

amplia variedad de escenarios, como los son las aplicaciones militares, ambientales, médicas, comerciales, entre otros (Akyildiz et al., 2005).

En el campo del monitoreo ambiental se han realizado estudios para la conservación de los recursos naturales donde se implementan WSN, por ejemplo, el trabajo realizado por (Awang y Suhaimi, 2007) como parte de la integración de programas de cómputo para la detección de incendios y contaminación en bosques; a su vez, el proyecto de investigación presentado por (Navarro Murillo, 2005) para la detección de actividades ilegales como la caza furtiva y tala de árboles basado en el desarrollo de un módulo sensor capaz de identificar sonidos de disparos y moto sierras.

El despliegue de una red inalámbrica de sensores, viene a solucionar la falta de recurso humano para el resguardo de las áreas naturales (Akyildiz et al., 2005), con la premisa de que las áreas ecológicas que requieren protección son muy extensas y requieren vigilancia continua.

I.3. Planteamiento del Problema

En el escenario de monitoreo ambiental y en particular en el monitoreo de bosques, al momento de detectar un evento, éste debe ser reportado con un mínimo retardo a una estación base o unidad recolectora llamada sumidero (o sink) para su procesamiento correspondiente. Por lo anterior, para realizar la entrega de reportes de los eventos se necesita de una ruta activa. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, el mantener activo el subsistema de comunicación, y en especial en el estado de inactividad, da como resultado un alto consumo de energía; por lo anterior se presenta la necesidad de implementar técnicas y estrategias que reduzcan el consumo energético, con la finalidad de maximizar el tiempo de vida de la red. Una de estas estrategias consiste en mantener el subsistema de comunicación del sensor en un estado de hibernación, con la opción de despertarlo cuando se requiera el envío de información o actualización de una ruta.

En particular, el diseño de un subsistema de comunicación adecuado para WSNs involucra la revisión y análisis de protocolos de comunicación de las capas de enlace de datos y red (capas 2 y 3 de la pila de protocolos de una WSN¹). En el caso particular de este trabajo de investigación, se deben de satisfacer los requerimientos de este tipo de tecnologías aplicado a un escenario de monitoreo en los bosques.

I.4. Objetivos

El objetivo general de este proyecto de tesis consiste en: proponer un subsistema eficiente en energía para una red inalámbrica de sensores en un escenario de monitoreo en bosques. El desempeño de la propuesta deberá ser evaluado mediante simulación.

Para cumplir el objetivo, es necesario realizar un estudio bibliográfico de los distintos protocolos de comunicación para redes inalámbricas de sensores, con el fin de identificar y adaptar aquellos que consideren un consumo eficiente de energía.

De manera particular, se han fijado los siguientes objetivos:

- Controlar el encendido y apagado del subsistema de comunicación del nodo, a partir de la revisión de protocolos de capa de enlace de datos, especialmente de la subcapa de control de acceso al medio.
- Crear y mantener una ruta predeterminada, con la posibilidad de alternar la trayectoria para repartir el gasto energético entre todos los nodos que conforman la red.
- Garantizar conectividad en la red para la entrega de información de los nodos sensores hacia el sink, desde cualquier punto del área a monitorear.

¹ Según la posible pila de protocolos para WSN que describen Sohaby et al. (2007). Donde en la capa 2 se realizan las funciones de enlace de datos, compartición del canal, sincronización, y localización; la capa 3 o de red incluye el enrutamiento topológico y la administración de topología adaptable.

I.5. Metodología de Investigación

La metodología de investigación que se siguió en este trabajo de tesis, incluye los siguientes puntos:

1. Se realizó un estudio de los requerimientos de diseño necesarios para implementar una red inalámbrica de sensores, para esto se revisaron conceptos tales como arquitecturas, tecnologías, ambiente de sensado, topología, entre otros; así como algoritmos y protocolos tanto de acceso al medio como de enrutamiento.
2. En base al estudio anterior, se propuso un diseño para una WSN considerando un escenario donde los sensores se despliegan en un bosque. Como parte del diseño, se analizaron con mayor detalle los algoritmos que hacen posible la comunicación en las capas de acceso al medio y de red. En base a los requerimientos del problema planteado se hizo una propuesta tomando como referencia los protocolos y algoritmos que se ajustaban al cumplimiento del objetivo general.
3. Se hicieron las adaptaciones e implementaciones necesarias para desarrollar un modelo de simulación que fue implementado en la herramienta de simulación NS-2.
4. Por último, se realizó la simulación; mediante el análisis de resultados y la comparación con los algoritmos consultados, se realizaron las conclusiones correspondientes.

I.6. Infraestructura Empleada

Para desarrollar el trabajo de investigación y simulación de una red inalámbrica de sensores se contó con la siguiente infraestructura:

- Computadora portátil Toshiba Satellite A215-27424, procesador AMD Athlon 64 X2 Dual-Core TK-55 a 1.79 GHz, 2 GB de RAM, 320 GB Disco Duro.
- Sistema Operativo Ubuntu versión 9.04, 64 bits, núcleo Linux 2.6.28.16.
- Sistema Operativo Microsoft Windows XP Professional SP3, 32 bits.
- Network Simulator versión 2.33, Matlab.
- Artículos y revistas del área.
- Bibliotecas del CICESE y UNAM.

I.7. Organización de la Tesis

En el capítulo II se describen los requerimientos esenciales para la implementación de los protocolos de comunicación, a su vez también se describen algunos protocolos que pueden utilizarse en redes inalámbricas de sensores. Además se presentan las consideraciones de diseño de las redes inalámbricas de sensores orientadas al consumo eficiente de energía para lograr extender el tiempo de vida de la red.

En el capítulo III se abstrae la información del capítulo II en cuanto a protocolos de capa de control de acceso al medio (MAC) y de red, con esto se presenta una propuesta de diseño para una WSN involucrando aspectos relevantes como la distribución y densidad de nodos. Como parte del diseño, se detalla la adaptación, interacción e importancia de las técnicas y protocolos seleccionados en base al cumplimiento de los objetivos particulares.

En el capítulo IV se describen las modificaciones y adaptaciones al código del simulador de redes NS-2 para la implementación de la propuesta. Además se explica el funcionamiento básico del código de programación creado en NS-2 para la simulación y evaluación del subsistema de comunicación.

En el capítulo V se discuten los resultados obtenidos mediante un análisis de la simulación ejecutada.

Finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones y contribuciones del trabajo realizado, incluyendo las recomendaciones propias para el trabajo futuro.

Capítulo II

Protocolos para Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

II.1. Introducción

Independientemente de la aplicación en la que se requiera implementar una WSN, es necesario examinar algunos elementos relevantes para tomar una decisión correcta en cuanto a la elección de los protocolos de comunicación; en particular se debe prestar especial atención a aquellos protocolos relacionados con las capas inferiores de la pila de protocolos para WSN, en este caso, los protocolos de capa de enlace y de la capa de red. En el diseño de los protocolos para redes inalámbricas de sensores de capa 2 (capa de enlace), como de capa 3 (capa de red), el consumo de energía se vuelve uno de los principales factores a considerar.

En este capítulo se presenta una descripción de los protocolos de capa de enlace, y de la capa de red, que se reportan en la literatura y que han sido propuestos dentro del contexto de las WSN (algunos de estos protocolos en un principio fueron concebidos para ser implementados en redes ad hoc² y en base a modificaciones han sido adaptados para funcionar con WSN). Se presentará además, una descripción detallada de algunos protocolos, que para este trabajo de investigación han sido considerados de especial interés para el diseño del modelo propuesto, el cual se expondrá en el capítulo III.

² Una red inalámbrica ad hoc es un sistema autónomo de dispositivos inalámbricos fijos o móviles, que se comunican entre sí por enlaces vía radio sin soporte de ninguna infraestructura alambrada, (Michail y Ephremides, 2003). Las principales diferencias con las WSN son: la cantidad de nodos, aplicaciones y suministro energético. En las WSN se pueden utilizar una cantidad de varios órdenes de magnitud de nodos a diferencia de las ad hoc; las WSN se utilizan primordialmente para aplicaciones de sensado mientras que las redes ad hoc para aplicaciones de comunicación, esto es, porque los nodos sensores tienen restricciones de cómputo, memoria y energía (Ilyas y Mahgoub, 2005).

II.2. Protocolos de Capa de Enlace de Datos

La capa 2 del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos (modelo OSI) al igual que la pila de protocolos para redes inalámbricas de sensores, se divide en 2 partes: la subcapa de control de acceso al medio, también llamada MAC (Media Access Control, por sus siglas en inglés), y la subcapa de control de enlace lógico LLC (Logical Link Control, por sus siglas en inglés).

En la capa de enlace de datos se controla el subsistema de comunicación del nodo, se determina cuanto tiempo y bajo qué circunstancias se realizará el cambio de estado del transceptor de radio, se ocupa además del control de acceso de los nodos a la red, control de errores, entre otras funciones.

Particularmente, esta investigación se enfoca en la subcapa de control de acceso al medio, dado que la capa MAC juega un papel importante en el diseño de una red, en el caso de una red inalámbrica de sensores no es la excepción; tradicionalmente se manejan factores críticos de diseño la robustez, adaptabilidad, retardo, eficiencia de energía, entre otros, los cuales se describen en el Anexo A y fueron presentados por (Ilyas y Mahgoub, 2005; Bachir et al. 2010; Van Dam y Langendoen, 2003).

II.3. Clasificación de protocolos de capa MAC

Uno de los objetivos en el diseño de este trabajo, es el realizar un consumo eficiente de energía, por lo que es importante enfocar la atención a los protocolos de capa MAC para WSN que consideren la reducción del consumo de energía provocado por factores tales como la escucha ociosa, sobre escucha, y colisiones (ver Anexo A). En general, los protocolos de capa MAC pueden categorizarse en dos grupos principales: protocolos MAC basados en calendarización y protocolos MAC basados en contención.

Los protocolos basados en calendarización, son una clase de protocolos de capa MAC de tipo deterministas, en los cuales el acceso al canal se realiza mediante un calendario. Para cada nodo sensor se hace una pre-asignación de recursos (e. g. reservación de ranuras de tiempo) para hacer uso del medio, de tal manera que solo un nodo puede utilizar el canal a la vez.

Por otro lado, los protocolos de capa MAC basados en contención evitan la pre-asignación de recursos y en su lugar todos los nodos comparten el canal de radio que se utiliza bajo demanda³. Los protocolos de capa MAC basados en contención buscan reducir la probabilidad de una colisión en lugar de evitarla completamente.

II.3.1. Protocolos de capa MAC para WSN basados en calendarización

Los protocolos de capa MAC para WSN basados en calendarización utilizan un calendario que regula el uso de los recursos para evitar contención entre nodos; los recursos utilizados incluyen tiempo, banda de frecuencia, o un código CDMA (Acceso Múltiple por División de Código). La mayoría de los protocolos de capa MAC para WSN y que se basan en calendarización utilizan una variante del esquema TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) donde el canal se divide en ranuras de tiempo.

TDMA opera en función de tramas lógicas. Se denomina trama lógica al conjunto de N ranuras contiguas en el tiempo. En cada trama lógica a cada sensor se le asigna un conjunto de ranuras de tiempo específicas, las cuales se repiten cíclicamente; de esta manera se constituye el calendario de acuerdo al cual los nodos sensores operarán.

³ Cuando se realiza el acceso al medio de forma simultánea por dos o más nodos, es común que se produzcan colisiones en el canal, según Van Dam y Langendoen (2003).

Basado en el calendario asignado, un sensor alterna entre dos modos, o estados de operación, denominados: modo activo (o despierto) y modo inactivo (o dormido). En el modo activo, el sensor utiliza las ranuras de tiempo asignadas dentro de una trama lógica para transmitir y recibir tramas de datos. Al agotarse el tiempo de la trama lógica asignada, el nodo sensor cambia al modo dormido, durante el cual el nodo sensor apaga su transceptor de radio para conservar la energía. Muchas variaciones del protocolo TDMA básico se han propuesto para el control de acceso al medio en WSN como las presentadas por (Kulkarni y Arumugan, 2004) y en (Van Dam y Langendoen, 2003). A continuación se presentan algunos ejemplos de protocolos basados en calendarización para redes inalámbricas.

II.3.1.1. SMACS

MAC auto organizable para redes de sensores (SMACS, Self-Organizing MAC for Sensor Networks). Es uno de los primeros intentos para desarrollar protocolos de capa MAC para redes de sensores. SMACS se diseñó para inicializar la red y organizar la capa de enlace en WSN estáticas (Sohrabi et al., 2000). En este esquema los nodos funcionan utilizando un mecanismo de tipo TDMA en el cual el nodo tiene distintos calendarios para comunicarse con sus vecinos conocidos y cada sensor se comunica con un vecino durante cada ranura de tiempo. Para evitar interferencia con los enlaces adyacentes, SMACS utiliza distintos canales de frecuencia (FDMA – Acceso Múltiple por División de Frecuencia) o varios códigos CDMA.

Por lo anterior se considera a SMACS como un protocolo de capa MAC basado en calendarización híbrida, por utilizar TDMA junto con un mecanismo para el control de interferencias en el acceso al medio.

II.3.1.2. PEDAMACS

Protocolo de acceso al medio eficiente en energía y consiente del retardo para redes de sensores (PEDAMACS, Power-Efficient and Delay-Aware Medium-Access Protocol for Sensor Networks). PEDAMACS (Coleri, 2002) es un protocolo de acceso al medio que combina las características de las redes celulares junto con las redes de sensores para aplicaciones de recolección continua de datos.

Considera que hay un solo punto de acceso (AP, Access Point) en la red a donde todos los nodos se comunican. Este punto de acceso no tiene restricciones de energía y es capaz de transmitir a altos niveles de potencia para alcanzar a cualquier nodo de la red con un solo salto. En contraste, los nodos sensores tienen un nivel de potencia de transmisión limitado, por lo que para alcanzar al AP la información debe viajar a lo largo de múltiples saltos. Sin embargo, en ciertas condiciones se puede elegir a algunos nodos de la red (con altos recursos de energía) para que éstos actúen⁴ como un AP de cada uno de los grupos (o clusters).

II.3.1.3. S-MAC

Sensor – MAC (Ye et al., 2002 y 2004). S-MAC es un protocolo de capa MAC diseñado para redes inalámbricas de sensores, puede ser utilizado para el monitoreo ambiental donde los nodos permanecen en estado inactivo por largos periodos de tiempo y ocasionalmente se activan al momento de detectar un evento. S-MAC está inspirado en PAMAS (el cual se describe como parte de los protocolos basados en contención), en el sentido de apagar el transceptor de radio para que los nodos no escuchen transmisiones de otros nodos. A diferencia de PAMAS, S-MAC no utiliza un segundo radio.

⁴ En el caso de una red en la cual los nodos sensores puedan ser electos como AP, deberán considerarse estrategias para optimizar el consumo de energía (e. g. utilizar nodos de bajo consumo energético) para compensar el gasto de energía utilizado.

Los objetivos de este protocolo son la reducción del consumo de energía principalmente y la auto – configuración de los nodos. Para cumplir con sus objetivos, S-MAC emplea 3 técnicas que a continuación se mencionan:

a) Estados periódicos de dormir y escuchar

En diversas aplicaciones de sensores y en especial en el monitoreo ambiental, los nodos encendidos permanecen en estado ocioso, a la espera de que se presente un evento; si los eventos son ocasionales y de corta duración, es inútil mantener activos los nodos por tanto tiempo. En S-MAC el usuario puede configurar el ciclo de trabajo (*duty cycle*), es aquí donde se determina que tanto tiempo necesita que el nodo permanezca activo y cuanto tiempo se considera adecuado para dormir. Por ejemplo, si establecemos el *duty cycle* a 50%, (ver Figura 4) se asegura que la mitad del tiempo el nodo escuchará y la otra mitad estará durmiendo, con lo que podemos afirmar que se ahorra el 50% de energía al utilizar este esquema.



Figura 4. Ejemplo de ciclo de trabajo al 50% en S-MAC.

La idea básica es que cada nodo mientras duerme apaga su unidad de radio y después de agotar el temporizador programado por él mismo, despierta para verificar si otro nodo desea comunicarse con él. Por simplicidad el tiempo en que los nodos duermen y despiertan es igual para todos los nodos que conforman la red, este ciclo de trabajo se elige de acuerdo a la aplicación con que se esté trabajando.

Cada nodo puede elegir su propia calendarización, para esto, S-MAC requiere una sincronización periódica, generalmente los nodos vecinos comparten la misma calendarización, sin embargo, dado al comportamiento multi-salto y la capacidad de

compartir mensajes de control, no siempre es posible que los nodos mantengan el mismo calendario, sino que pueden mantener distintos calendarios donde cada vecino debe conocer el comportamiento de su nodo adyacente.

Los nodos intercambian su calendario por medio de difusión global (*broadcast*) a sus vecinos inmediatos. Con esto se asegura que todos los nodos vecinos pueden comunicarse unos con otros incluso si tienen distinta calendarización. Los nodos que se encuentran sincronizados, forman un clúster (ó agrupación) virtual.

Una desventaja de S-MAC es que la latencia se incrementa en los periodos en que el nodo permanece dormido. Además el retardo se acumula en cada salto; así que el tiempo en el que el nodo dormirá juega un papel fundamental en cada aplicación.

Elección y Mantenimiento del Calendarizador

Antes de que cada nodo comience con su periodo de escucha y dormir, necesita elegir un calendario (ranuras de tiempo para dormir y despertar) e intercambiarlo con sus vecinos. Cada nodo mantiene una tabla en la que se almacena la calendarización de todos sus vecinos conocidos. A continuación se enumeran los pasos para que un nodo establezca su calendarización inicial.

- 1) El nodo escucha por un tiempo corto y fijo. Si no recibe algún calendario de otro nodo, entonces aleatoriamente el nodo elige su tiempo para ir a dormir e inmediatamente difunde su calendarización en un mensaje SYNC, el cual indica que dormirá después de t segundos. A este nodo le llamaremos nodo *sincronizador*, ya que el elige su calendarización de forma independiente y otros nodos pueden sincronizarse con esta calendarización.
- 2) Si el nodo recibe una calendarización de un vecino antes de elegir su propia calendarización, éste seguirá el calendario escuchado y lo adoptará como propio. A

este nodo le llamaremos *seguidor*. Entonces el nodo espera un tiempo aleatorio t_d y difunde su calendarización indicando que dormirá en $t - t_d$ segundos. El retardo aleatorio sirve para evitar colisiones, en el caso de que varios seguidores escuchen el mismo mensaje de un sincronizador, y deseen difundir su calendarización al mismo tiempo.

- 3) Si un nodo recibe una calendarización después de haber seleccionado y difundido la propia, éste adoptará ambas calendarizaciones (i.e. el nodo se programa para despertar en el tiempo que indique cada calendarización). El nodo difunde su calendarización antes de ir a dormir.

Se espera que un nodo no adopte distintas calendarizaciones, puesto que el nodo, primero intenta seguir el calendario establecido por alguno de sus vecinos. Sin embargo, puede darse el caso en que dos nodos de manera independiente elijan su calendarización (ya sea porque no alcancen a escucharse, o porque transmitan casi al mismo tiempo), los nodos que se encuentren entre estos nodos adoptarán ambos calendarios. Cuando un nodo tiene más de una calendarización, tiene menos tiempo para dormir, y de esta manera consumen más energía que los demás. Este esquema se puede observar en la Figura 5.

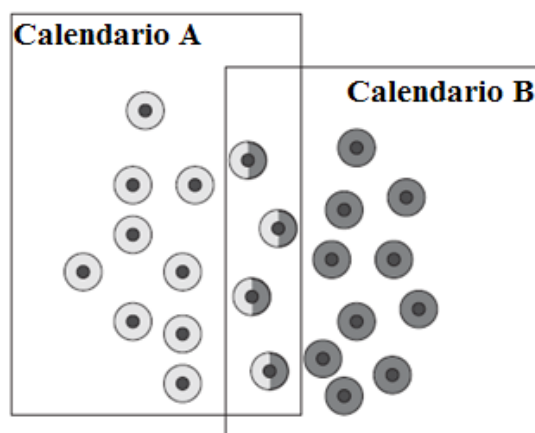


Figura 5. Esquema de la intersección de varios nodos que comparten más de una calendarización. Basado en el esquema propuesto por (Sohraby et al. 2007).

Escucha Adaptable

Para reducir el tiempo en que los nodos permanecen en un estado activo, se emplea la técnica de S-MAC para una escucha adaptable, esto significa que, al término de una transmisión se puede enviar otra transmisión. En S-MAC un mensaje puede viajar a través de múltiples saltos, dependiendo de la longitud del periodo activo; es por esto que en S-MAC la comunicación se puede realizar de dos maneras distintas:

- *Sin escucha adaptable*

Cada nodo puede enviar a lo mucho un paquete de datos en cada trama, si pierde su oportunidad, deberá esperar a la siguiente trama para enviar datos. Esto puede provocar un retardo en cada salto, ver Figura 6.

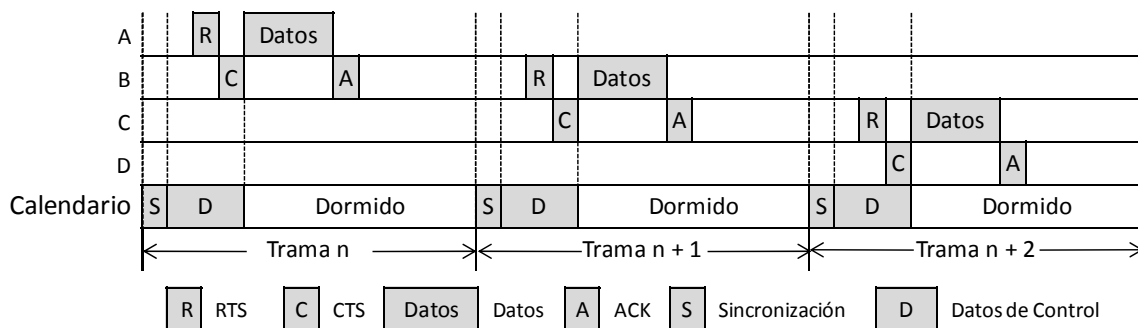


Figura 6. Esquema de básico de calendarización SMAC.

- *Periodo de escucha adaptable (ALP, Adaptive Listening Period)*

El nodo verifica al término de la transmisión si el tiempo restante en la trama n es el suficiente para hacer una segunda transmisión a uno de sus vecinos, si es así, el nodo entra en modo ALP y hace el envío de datos. Con lo que en la misma trama n se pueden enviar

dos mensajes y con esto aprovecha el tiempo. Con esta configuración se puede inferir que un paquete puede viajar hasta dos saltos de su origen, como se muestra en la Figura 7.

También se puede implementar la propiedad de más de un ALP en una sola trama, pero esto dependerá obviamente de si el tiempo restante de la trama N es suficiente para llevar a cabo la transmisión.

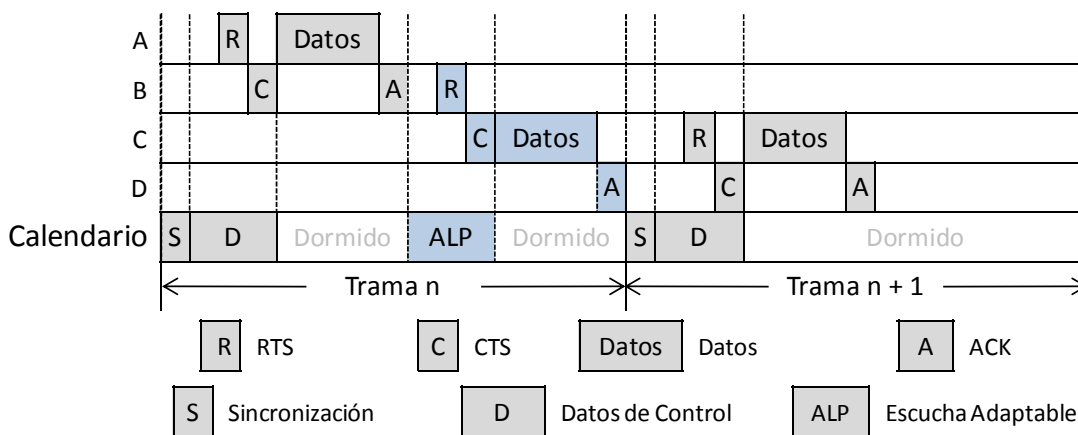


Figura 7. Esquema de calendarización SMAC con uso de ALP.

b) Evasión de colisiones y sobre escucha

Si varios vecinos quieren comunicarse con un nodo, éstos deberán contender por el acceso al medio al igual como sucede en el estándar IEEE 802.11 (protocolo basado en contención mencionado en la siguiente sección). Este mecanismo utiliza mensajes de control para petición de envío RTS (Request To Send), y avisos que indican que el medio se encuentra libre (CTS, Clear To Send). El nodo que envíe primero un RTS es el que gana el medio, y el nodo receptor que está a la escucha responde con un mensaje CTS.

Hay un campo en el paquete transmitido donde se indica la duración de dicha transmisión, si un nodo recibe un paquete que no es para él, puede conocer el tiempo en que

permanecerá en silencio. El nodo puede almacenar la duración en una variable que se llama NAV (Network Allocation Vector) y establecer un temporizador para ello. Cada vez que se establece un NAV, este temporizador se va decrementando hasta llegar a cero, de modo que si un nodo tiene información por enviar, primero revisa el NAV, mientras no sea cero indicará que el medio está ocupado, a esto se le llama sensado de portadora virtual, ver Figura 8.

Al igual que IEEE 802.11, S-MAC utiliza portadoras físicas como virtuales, el sensado de portadora físico se hace en la capa física; el tiempo aleatorio para la espera del sensado de portadora es muy importante, ya que es el que evita las colisiones. El medio se puede considerar libre cuando ambas portadoras, física y virtual, se encuentren libres. En caso de que haya una colisión o el medio este ocupado, implementa el algoritmo de *back off*, con lo que espera cierto tiempo almacenado en el NAV; al momento de establecer este contador, el nodo entra en un estado de dormir y despertará al momento de finalizar dicho temporizador.

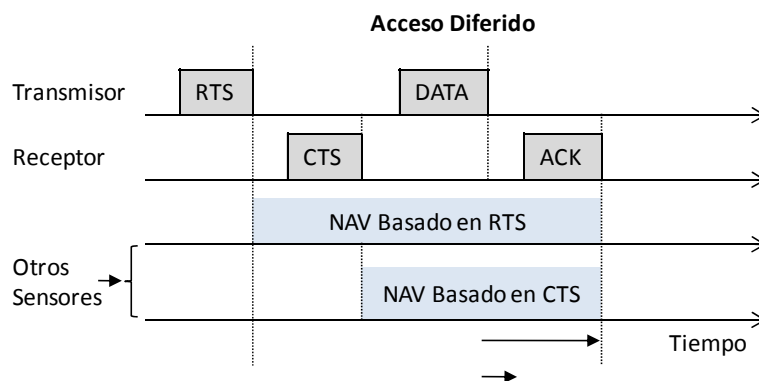


Figura 8. Sensado de portadora virtual utilizando NAV.

Cuando se desea hacer una transmisión se efectúa el sensado del canal, si el nodo falla al acceder al medio, este va a dormir y despertará cuando el receptor este libre y a la escucha. Los paquetes de amplia difusión (broadcast), se hacen sin utilizar los mensajes RTS/CTS.

Los paquetes para un solo destinatario (unicast) tienen la secuencia de RTS/CTS/DATA/ACK entre transmisor y receptor.

Evasión de sobre escucha

En 802.11 mientras el nodo se encuentre en estado activo, se mantendrá a la escucha de las transmisiones de sus vecinos para hacer uso del sensado de portadora virtual. Como resultado de esto, los nodos sobre escuchan gran cantidad de paquetes que no son enviados directamente hacia él, esto da como resultado una pérdida de energía. En S-MAC para evitar la sobre escucha, un nodo duerme inmediatamente después de escuchar un mensaje RTS o CTS con un paquete que no es para él; logrando reducir la probabilidad de causar colisiones y además evitar la sobre – escucha.

c) Paso de mensaje

La desventaja de transmitir un mensaje muy largo como un solo paquete, es que si el mensaje está corrupto, o es interrumpido a causa de cualquier error de transmisión, se pierde el paquete completo a causa de unos cuantos bits.

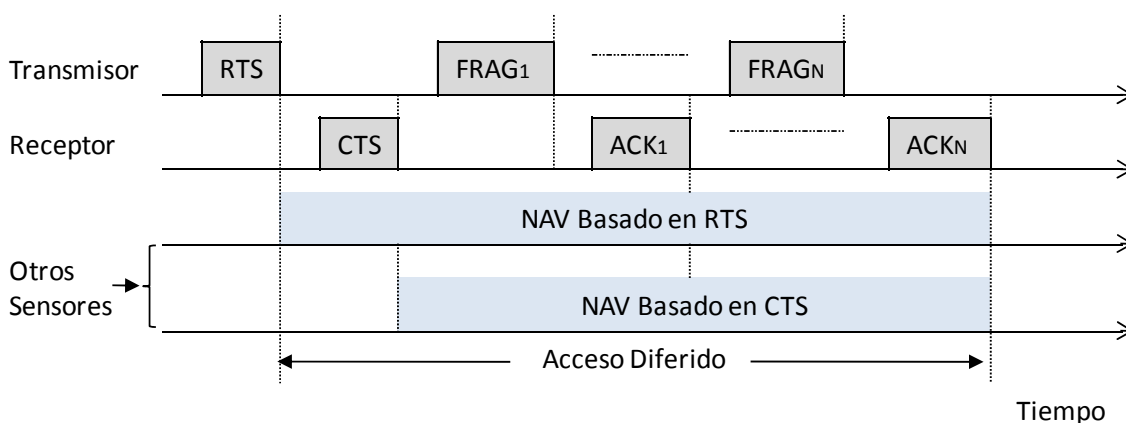


Figura 9. Fragmentación de paquetes.

La solución que ofrece S-MAC es el dividir dicho mensaje en paquetes pequeños independientes que se envían de forma de ráfaga, cuando se hace de esta manera solo se necesita un mensaje de RTS y CTS con lo que se ahorra tiempo y energía, ver la Figura 9. Esto representa la diferencia principal con el estándar 802.11, ya que este envía mensajes RTS y CTS cada vez que recibe un fragmento del paquete.

II.3.1.4. LEACH

Agrupamiento jerárquico adaptativo de baja energía (LEACH, Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (Heinzelman et al., 2000). El protocolo LEACH emplea un enfoque jerárquico y organiza los nodos en grupos (o clusters). Dentro de cada grupo los nodos toman turno para asumir el papel de la cabeza de grupo CH (*Cluster Head*), ver Figura 13. LEACH utiliza TDMA para garantizar la comunicación entre los nodos y el CH (Sohraby et al., 2007).

El CH reenvía la información recolectada hacia la estación base. El CH organiza a los nodos en base a una calendarización TDMA que transmite a cada uno de los nodos en el grupo. Además el calendario puede ser utilizado por los nodos para determinar las ranuras de tiempo durante las cuales debe permanecer activo. Con esta medida, permite a los nodos apagar su unidad de radio hasta que sea su próximo turno de estar activo. LEACH asume que todos los nodos en el grupo comienzan su fase de iniciación al mismo tiempo, y a partir de ésta permanecen sincronizados.

La comunicación entre los nodos y su CH se realiza utilizando el espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), donde a cada clúster se le asigna un código de esparcimiento, el cual es utilizado por todos los nodos en el clúster para transmitir datos a su CH. Los códigos de esparcimiento o propagación son asignados a los CH en la fase inicial, cuando el primer CH anuncia su posición, seguido por los demás CH. Los nodos necesitan ajustar el nivel de potencia de transmisión para reducir la interferencia con los clusters cercanos.

Los CH además de recibir datos de los nodos, también se encargan de agregar los datos necesarios para enviar los paquetes hacia la estación base. La comunicación entre los CH y la BS se logra utilizando códigos de espaciamiento fijos y CSMA. Antes de comenzar a transmitir los datos, el CH debe sentir el canal para asegurarse que otro CH no esté haciendo uso del canal. Si el canal se encuentra ocupado, el CH retarda la transmisión de datos hasta que el canal se encuentre libre.

En general, los protocolos basados en calendarización son libres de contención, por lo que eliminan el gasto de energía ocasionada por colisiones. Además los nodos sensores solo necesitan encender sus radios para transmitir o recibir datos en las ranuras de tiempo asignadas, con esto también se evita la sobre escucha; resultando en ciclos de trabajo bajos que a largo plazo ayudan a extender el tiempo de vida de la red significativamente.

Los protocolos MAC basados en calendarización presentan algunas desventajas que limitan su uso en WSNs. El uso de TDMA requiere de una organización previa de los nodos en un grupo. Este tipo de estructura jerárquica restringe frecuentemente a los nodos a solo comunicarse con su CH; consecuentemente la comunicación par a par no puede ser soportada directamente, a menos que los nodos requieran escuchar durante todas las ranuras de tiempo. Por otro lado, lograr la sincronización de tiempo entre nodos sensores distribuidos resulta costoso y complicado, especialmente en redes inalámbricas con restricciones de energía.

Los esquemas basados en calendarización también necesitan mecanismos adicionales como FDMA o CDMA para concretar la comunicación entre grupos (inter clúster) y evitar interferencias entre éstos. Finalmente, los protocolos de capa MAC basados en TDMA están limitados en escalabilidad, lo que dificulta la adaptabilidad para movilidad y cambios en el tráfico de la red y topología. Si un nodo ingresa o deja un grupo, el tamaño de la trama así como la asignación de la ranura deberán ser ajustados. Frecuentemente estos cambios pueden llegar a ser costosos o de efecto lento.

II.3.2. Protocolos basados en Acceso Aleatorio

También llamados *protocolos basados en contención*, los cuales no necesitan coordinación para acceder al medio, ya que utilizan un mecanismo de *back-off* en el cual se considera un tiempo aleatorio para que los nodos puedan intentar acceder al canal. Este tipo de protocolos tiene como ventaja el uso de mensajes de control RTS y CTS, lo que los hace robustos en la solución de diversos problemas, como lo son el nodo oculto, la evasión de colisiones, la sobre-escucha, la escucha ociosa, entre otros. Actualmente existen diferentes iniciativas para diseñar protocolos basados en acceso aleatorio con el objetivo de optimizar el consumo de energía y por consiguiente extender el tiempo de vida de la red; los principales candidatos se mencionan a continuación.

II.3.2.1. IEEE 802.11

Es un estándar desarrollado para aplicaciones en redes inalámbricas de área local (WLAN). Los nodos de estas redes suelen ser, en su mayoría, laptops y otros dispositivos que se conectan a la red local. La función de coordinación distribuida (DCF, Distributed Coordination Function) de IEEE 802.11 es el método de acceso que soporta la transferencia de datos de forma asíncrona o basada en mejor esfuerzo cuando la red funciona en modo ad hoc. DCF también puede funcionar con redes de infraestructura.

IEEE 802.11 es un protocolo basado en contención que toma como base protocolos como MACA (Karn, 1990) y MACAW (Bhargawan et al., 1994), donde estos esquemas se propusieron para mejorar el Acceso Múltiple por Sensado de Portadora (CSMA, Carrier Sense Multiple Access) original desarrollado por (Kleinrock y Tobagi, 1975). Estos utilizan el CSMA con Evasión de Colisiones (CSMA/CA). La detección de colisiones (CSMA/CD) no se utiliza porque el nodo no tiene la habilidad de escuchar el canal mientras transmite.

II.3.2.2. PAMAS

Protocolo con Señalización de Acceso Múltiple Consciente de Potencia (PAMAS, Power Aware Multiaccess Protocol with Signalling). Protocolo para redes ad hoc (Singh y Raghavendra, 1998). PAMAS es un protocolo basado en contención diseñado para redes ad hoc donde uno de los principales objetivos se relaciona con la eficiencia en el consumo de energía. Este protocolo se basa en una modificación del protocolo MACA (Karn, 1990) y mejora la funcionalidad agregando canales separados para el control de paquetes RTS/CTS y paquetes de datos. En el canal de señalización junto con los elementos anteriores, también se adjunta “un tono ocupado”, para que los nodos que no participen en la comunicación apaguen su transceptor de radio. Con esto, PAMAS trata de evitar la sobre escucha entre los nodos vecinos y lo hace agregando un segundo radio de baja potencia en sus dispositivos; sin embargo, este protocolo no provee solución a la escucha ociosa.

II.3.2.3. EC-MAC

Control de Acceso al Medio para Conservar Energía (EC-MAC, Energy-Conserving Medium Access Control). Protocolo para redes inalámbricas ATM⁵ (Sivalingam et al., 2000). Se presenta brevemente este protocolo de capa MAC por su significativa contribución hacia la minimización del consumo de potencia en los nodos de redes inalámbricas de sensores y redes ATM.

El objetivo de este protocolo de acceso es conservar la energía de la batería; soporta distintas clases de tráfico y es capaz de ofrecer niveles de calidad de servicio reservando el ancho de banda. A diferencia del estándar IEEE 802.11 (y otros más que son buenos con la eficiencia de energía) éstos protocolos no fueron diseñados con esta meta, en cambio EC-MAC fue desarrollado con el principal objetivo de ser eficiente en energía.

⁵ ATM (Asynchronous Transfer Mode, Modo de Transferencia Asíncrona). Es una tecnología de conmutación basada en pequeñas celdas de tamaño fijo. El concepto ATM surgió como un mecanismo de transporte para el uso de futuros servicios de banda ancha; es decir, permite la convergencia de redes de área local, redes de área amplia y las redes públicas futuras (McDysan y Spohn, 1998).

A continuación se presenta una tabla comparativa entre algunos de los principales protocolos de capa MAC que fueron diseñados para cumplir con los requerimientos de una red inalámbrica de sensores.

Tabla I. Comparativa de protocolos MAC para redes inalámbricas de sensores.

	SMAC	SMACS/EAR	TRAMA	PEDAMACS
Características	Calendarización TDMA Modo dormido coordinado entre los vecinos por medio de calendarios Escucha adaptable Agrupamiento (clúster) virtual	Calendarización híbrida TDMA/FDMA Presenta características para nodos móviles	Acceso aleatorio (CSMA) para descubrimiento de vecinos Acceso calendarizado (TDMA) para transmisión de datos	Punto de Acceso (AP) con alta potencia de transmisión TDMA centralizado calendarizado por el nodo AP Organización jerárquica
Aplicaciones	WSN con nodos estacionarios	WSN con poco tráfico y requerimientos estrictos de latencia	WSN basada en eventos	WSN con recolección de datos centralizada
Méritos	Latencia reducida para mensajes multi-salto Hardware simple para TDMA	Baja latencia Habilidad para crear enlaces al vuelo No requerimientos para clusters No requerimientos de sincronización	Reutilización de ranuras TDMA Adaptable al tráfico	Alto ahorro de energía en WSN centralizadas
Desventajas	Requiere sincronización Los agrupamientos virtuales pueden no coincidir con los agrupamientos físicos	Hardware complejo para FDMA o CDMA Pérdida de ranuras de tiempo Baja utilización del ancho de banda La frecuente conmutación puede ocasionar grandes pérdidas de energía	Requiere sincronización Baja utilización del ancho de banda en WSNs con recolección periódica de datos	Necesita control centralizado El AP requiere alta potencia Overhead alto por calendarización.

II.3.2.4. TRAMA

Protocolo de Acceso al Medio Adaptativo al Tráfico (TRAMA, Traffic Adaptive Medium Access Protocol) (Sohrabi et al., 2000). TRAMA es un protocolo reciente de capa MAC para WSN en cuanto a eficiencia de energía y acceso al canal libre de colisiones. Utiliza información basada en el tráfico para asignar calendarios individuales a los nodos por consiguiente es un protocolo adaptable al tráfico de la red. TRAMA puede dar soporte para tráfico unicast, broadcast y multicast.

II.3.3. Elección de topología

Un factor importante a considerar en el diseño de la red es elegir la topología que más se adapte a las necesidades de la red inalámbrica de sensores; suponiendo que la colocación de los nodos sensores puede controlarse y que permanecerá relativamente fija. La contención desempeña un papel importante, dado que el nivel de contención puede variar dependiendo de la aplicación, por lo que no existe una topología apropiada para todas las aplicaciones. Sin embargo, se han realizado análisis como los mostrados en (Ilyas y Maghoub, 2005) que muestran sugerencias y algunas recomendaciones para realizar una decisión lo mas informada posible.

Una de las topologías presentadas por estos autores, consideran una cuadrícula de nodos en dos o tres dimensiones, donde los vértices en esta cuadrícula son los nodos que transmitirán paquetes, y las aristas representan los enlaces entre los nodos adyacentes que harán la recepción. De acuerdo a las topologías de malla que se presentan (Ilyas y Maghoub, 2005), es posible encontrar la ruta óptima entre una fuente (S) y un destino (D) ó la ruta más corta entre ellos.

Además, los autores afirman que una red se puede clasificar de acuerdo a la cantidad de vecinos para cada nodo (ver Figura 10) e indican cómo obtener la cantidad de saltos desde una fuente a uno o varios destinos, pasando por los nodos adyacentes.

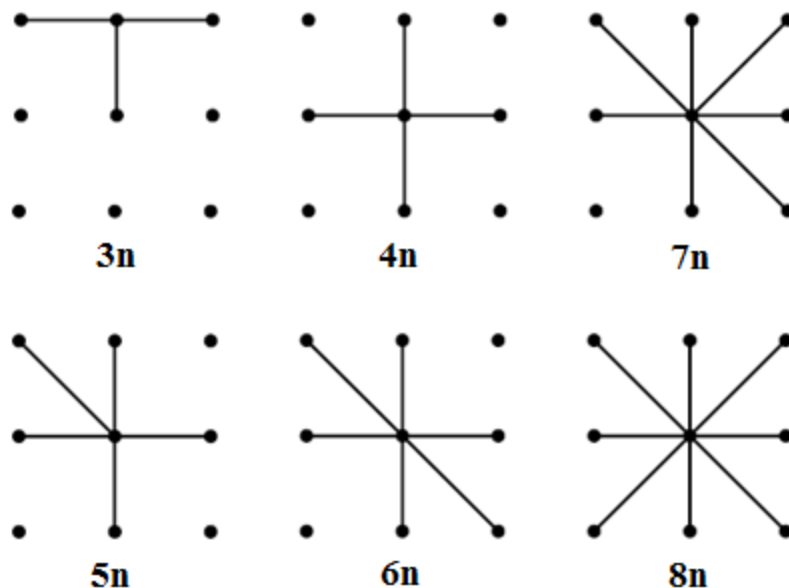


Figura 10. Clasificación de redes por el número de vecinos.

Bajo este rubro, en seguida se describe un proyecto realizado por (Liao et al., 2005) que ejemplifica el uso del control de topología aplicado a una red de cuatro vecinos.

II.3.3.1. Power Management Protocol for Regular Wireless Sensor Networks

Protocolo Administrador de Energía para Redes inalámbricas de sensores regulares⁶ (Liao et al. 2005). La mayoría de los protocolos para redes de sensores, son diseñados para redes irregulares⁷, que en ocasiones pueden ser adaptados a escenarios regulares, sin embargo, un

⁶ En este trabajo de tesis, cuando se habla de una red inalámbrica de sensores regular, se refiere a que el despliegue de los nodos en el área a monitorear sea controlado. En este caso, el despliegue de los nodos conservan una estructura en forma de cuadrícula con igual separación entre nodos.

⁷ Cuando se habla de una red inalámbrica de sensores irregular, se refiere a un despliegue de nodos no controlado, es decir, se realiza de forma aleatoria con la posibilidad de que el despliegue de nodos sea más denso en algunas áreas.

algoritmo para redes irregulares suele ser complicado y resulta menos eficiente que los que se diseñan para redes regulares.

Como se ha mencionado, una de las mejores soluciones para el ahorro de energía es apagar la unidad de radio utilizando el modo de ahorro de energía PS (*Power Save*) cuando no haya información por transmitir o recibir. Para reducir el consumo de energía, PMP (por sus siglas en inglés, *Power Management Protocol*) trata de mantener el mayor número de dispositivos en el estado de ahorro de energía, mientras que por otro lado se intenta mantener la conectividad en la red con el propósito de proporcionar rutas activas para el transporte de mensajes durante el reporte de un evento.

Este protocolo tiene dos objetivos principales. En primer lugar, todos los nodos deben tener la oportunidad de cambiar a modo de ahorro de energía para que el consumo de potencia en la red sea balanceado. En segundo lugar, los nodos que estén en estado activo deberán estar conectados entre ellos y proporcionar cobertura, para que al momento de sensar y enviar información en cualquier punto geográfico, este reporte sea entregado a la estación base sin ningún problema.

Bajo esta premisa, surge el concepto de Conjunto Dominante Conectado (CDS, *Connected Dominating Set*). Se define como un conjunto de nodos activos conectados que son representantes de otros nodos que se encuentran en modo de ahorro de energía. Este CDS proporciona cobertura, conectividad y puede utilizarse como una dorsal de enrutamiento; basado en (Xu et al., 2001; Chen et al., 2002; Liao et al., 2005).

Sincronización

El PMP, elige distintos conjuntos dominantes conectados de acuerdo a la topología de la red (lo cual se explica más adelante), a cada conjunto le asigna un identificador i , y cada

CDS debe activarse en función de los mensajes de sincronización enviados por una estación base. La rotación de los CDS se hace en base al método round robin⁸.

Para lograr este propósito, el protocolo PMP no necesita de una sincronización global; solo los nodos activos deben ser sincronizados. Por lo que requiere una estación base (BS) que haga difusión de un mensaje de sincronización que incluya su marca de tiempo actual ($TS - Timestamp$), de esta forma cuando los nodos vecinos reciben el mensaje, ajustan su marca de tiempo a: $TS + T_{SY}$, donde T_{SY} es el tiempo requerido para difundir un mensaje de sincronización a sus vecinos. Después del ajuste, los nodos en el CDS activo difunden su propio mensaje de sincronización a sus vecinos para entrar en el modo de ahorro de energía (Liao et al., 2005).

Para tolerar el desfase de reloj entre los nodos activos y sus sucesores, cada nodo activo se mantendrá despierto hasta que su sucesor encienda, con esto se garantiza una transición suave.

Para ilustrar la transición entre los nodos de cada CDS y futuras referencias, asumimos que:

- c : es el número de distintos conjuntos dominantes conectados, equivalente al número de ranuras de tiempo por trama.
- CDS_i : es el conjunto dominante conectado activo.
- $CDS_{i \bmod c+1}$: es el conjunto dominante conectado sucesor
- S_i : es el número de ranuras de tiempo que ha dormido un nodo sucesor.
- $S_{i \bmod c+1}$: es el número máximo de ranuras de tiempo consecutivas que puede dormir un nodo sucesor.
- Δt : es el desfase de reloj máximo en segundos, entre cualquier par de nodos.

⁸ La planificación round robin, consiste en un algoritmo donde se eligen los elementos de un grupo de forma equitativa y con un orden racional. Generalmente se comienza por el primer elemento en la lista y continúa el orden hasta el último elemento, terminada la ronda, vuelve a comenzar con el primero; basado en (Shreedhar y Varghese, 1996).

Los nodos participantes en CDS_i pueden permanecer activos hasta por $S_i \bmod c+1 \times \Delta t$ segundos extra al finalizar la i -ésima ranura de cada trama, donde $1 \leq i \leq c$.

Por lo que al término de la duración de cada trama, la BS enviará $S_i \times \Delta t$ segundos después un mensaje de difusión (i.e. broadcast) en el que incluye su marca de tiempo actual; solamente los nodos participantes en el CDS activo ajustarán su marca de tiempo y enviarán un mensaje de difusión, entre todos los nodos que conforman el conjunto activo, indicando la nueva sincronización.

Por ejemplo en la Figura 11 el nodo B se mantiene activo un tiempo Δt al final de la primera ranura de tiempo, porque su sucesor A ha dormido solo una ranura. De manera similar, A debe permanecer activo por $2\Delta t$ segundos extra al final de la tercera ranura de tiempo porque su sucesor B ha dormido por dos ranuras de tiempo.

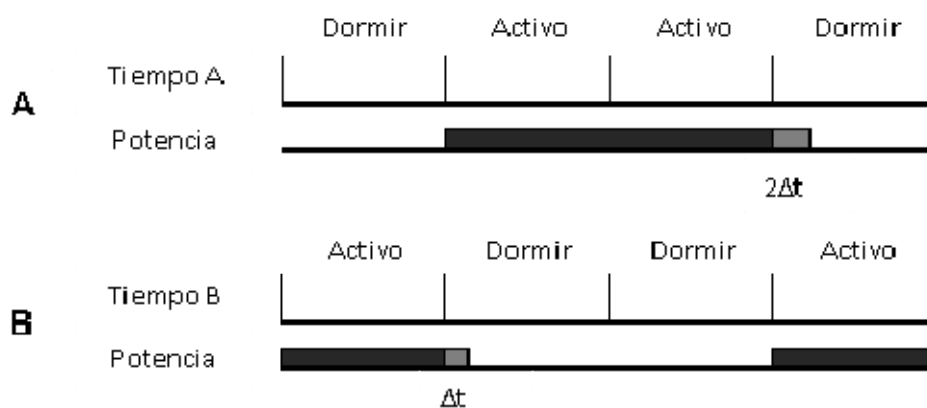


Figura 11. Transición de nodos sucesores participantes en CDS.

Cambio de Modo (Power Mode Switch)

Los conjuntos dominantes conectados se eligen en base a algunos lineamientos. En primer lugar se seleccionan ciertas columnas y filas para formar algunos conjuntos dominantes básicos (BDS – *Basic Dominating Set*). Para cada BDS podemos elegir algunos nodos para

unir los nodos participantes en los BDS, con esto cada BDS estará conectado y a su vez formará uno o varios CDS. Una vez formado el CDS, los nodos activos en el conjunto dominante conectado actual, estarán sincronizados y cambiarán su estado de acuerdo a las siguientes reglas:

R1: cualquier nodo que pertenezca al conjunto dominante CDS_i deberá despertar y servir a los nodos en la ranura de tiempo i -ésima de cada trama.

R2: los otros nodos que no pertenezcan a CDS_i y que no tengan mensajes para transmitir, deberán pasar al modo PS (*Power-Save*, Ahorro de energía)

R3: los nodos que pertenezcan a $CDS_i \bmod c+1$ son los sucesores de los nodos en CDS_i

R4: si el nodo en CDS_i debe cambiar su modo a PS y aún tiene mensajes por transmitir, este pasará sus mensajes a alguno de sus vecinos en $CDS_i \bmod c+1$ y a continuación pasar al modo PS.

Elección de CDS para topologías de malla regulares

El Protocolo de administración de energía para redes regulares puede ser utilizados para redes 2D y 3D con distintos números de vecinos, en este caso se describe PMP para redes de malla en 2D con 4 vecinos, donde cada nodo puede representar a 4 de sus vecinos. Es decir, como en el caso de la Figura 10 con una red de 4 vecinos, en total son 5 nodos, de los cuales el nodo central será el representante. El caso ideal es que solo $\frac{1}{5}$ de los nodos sean elegidos como miembros del CDS. Sin embargo, $\frac{1}{5}$ de los nodos no es suficiente para formar un conjunto dominante conectado; en palabras simples, una vez que un nodo es elegido para formar parte del conjunto dominante conectado, de manera automática los nodos en la misma columna (o renglón) también pasarán a formar parte del CDS.

Suponiendo que la topología es regular y de tipo malla, y que el tamaño de la malla esta dado por $m \times n$ (columnas x filas) donde m y n son enteros positivos. De tal modo, que el nodo (x, y) se puede encontrar en algún punto entre $1 \leq x \leq m$ y $1 \leq y \leq n$.

La elección de cada CDS se hace utilizando el siguiente algoritmo, en donde la variable k está relacionada con las columnas, mientras l se relaciona con las filas.⁹

Para formar el primer conjunto dominante básico (denominado BDS_1) se eligen las columnas $1, 4, 7, \dots, 3k + 1$, donde $3k + 1 \leq m$, Figura 12a)

De manera similar, en la Figura 12b) se elige las columnas $2, 5, 8, \dots, 3k + 2$, donde $3k + 2 \leq m$, con lo cual formamos el segundo conjunto dominante básico (BDS_2).

Para formar el tercer conjunto dominante básico (BDS_3) no se toman las columnas $3, 6, 9, \dots, 3k + 3$ como parecería obvio, si hiciéramos esto, los nodos de la primera columna no estarían siendo representados por algún otro nodo de la red.

Para balancear el consumo de energía de los nodos, elegimos los nodos en la $(3l + 1)$ fila, para formar el tercer conjunto dominante básico (BDS_3) y $(3l + 2)$ para formar el cuarto conjunto dominante básico (BDS_4); donde $l \geq 0$ y $3l + 2 \leq n$. Como se puede observar en la Figura 12c) y Figura 12d) respectivamente.

Cada BDS estará activo en una ranura de tiempo, es decir, en la ranura 1 estará activo el BDS_1 en la ranura 2 el BDS_2 y así sucesivamente, con lo que se rotarán cíclicamente cada uno de los BDS apareciendo cada 4ta ranura.

Ahora, dado que el BDS_1 y BDS_2 no son conjuntos dominantes conectados, debemos elegir una fila para unir tales BDS al momento de cambiar el turno de actividad, así que, la unión de los conjuntos dominantes básicos así como los nodos de la fila elegida formarán a su vez uno o varios conjuntos dominantes conectados.

⁹ Se utilizan variables distintas (k, l) porque PMP no da por hecho que para una topología en malla, el número de columnas y filas sea el mismo.

De manera similar, debemos elegir una columna para unir BDS_3 y BDS_4 al momento de cambiar a modo activo. Como la mayoría de los nodos en las columnas $(3k + 3)$ y las filas $(3l + 3)$ no pertenecen a ninguno de los cuatro BDS, entonces elegimos los nodos en la fila $(3l + 3)$ para unir los conjuntos dominantes básicos BDS_1 y BDS_2 ; los nodos en la columna $(3k + 3)$ serán elegidos para unir los conjuntos dominantes básicos BDS_3 y BDS_4 .

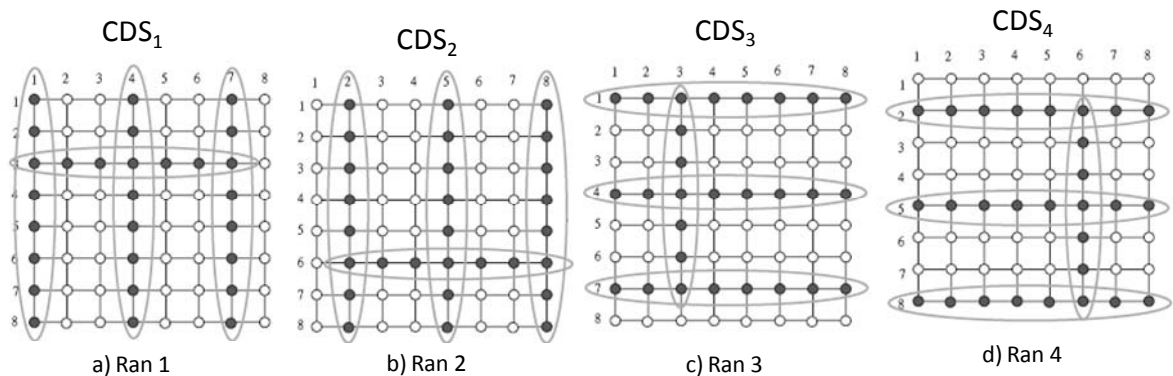


Figura 12. Conjuntos Básicos Dominantes para una red de malla regular compuesta de 8×8 nodos.

De manera general, los nodos en la $(6l + 3)$ fila unirá el BDS_1 en la $(4l + 1)$ ranura de tiempo, los nodos en la $(6l + 6)$ fila unirá el BDS_2 en la $(4l + 2)$ ranura de tiempo; a su vez, los nodos en la $(6k + 3)$ columna unirá el BDS_3 en la $(4l + 3)$ ranura de tiempo y los nodos en la $(6k + 6)$ columna unirá el BDS_4 en la $(4l + 4)$ ranura de tiempo.

Es importante notar que este protocolo solo es útil cuando en un arreglo de dimensión $m \times n$ se tiene que $(m \bmod 3) = 2$ y $(n \bmod 3) = 2$. Cuando $(m \bmod 3) = 1$ y los nodos en BDS_2 despiertan, los nodos en la columna m no serán representados por ningún nodo. Cuando $(m \bmod 3) = 0$ y los nodos en BDS_1 despiertan, los nodos en la columna m no serán representados por ningún nodo. De igual manera ocurre para n . Esta restricción es útil para evitar utilizar nodos extras para representar a las columnas ó renglones sin cobertura.

II.4. Protocolos de Capa de Red

Los nodos sensores pueden estar densamente distribuidos en el área a monitorear, como resultado los nodos pueden estar muy cercanos unos con otros. Al ser distancias cortas de separación entre los nodos, se consume menos energía al transmitir mensajes entre los nodos sensores. En tal caso, una buena opción puede ser la comunicación multi-salto, cuando la red de sensores tiene restricciones en cuanto a consumo de energía y niveles de potencia de transmisión. Sin embargo, el desarrollo de protocolos de enrutamiento para redes inalámbricas de sensores presenta más retos que el anterior, por lo que para ser estudiados se presenta las principales clasificaciones (Al-Karaki y Kamal, 2004).

En general, los protocolos de enrutamiento pueden dividirse en enrutamiento plano, jerárquico y basado en localización dependiendo de la estructura de la red. En el enrutamiento plano, todos los nodos desempeñan roles iguales. En el enrutamiento jerárquico los nodos tienen distintos roles. En el enrutamiento basado en localización se explota la posición de los nodos para encaminar los datos en la red.

Un protocolo de enrutamiento se considera adaptativo si efectivamente se pueden controlar ciertos parámetros del sistema para adaptarse tanto a las condiciones actuales de la red como a los niveles de energía disponibles. Además, estos protocolos pueden ser clasificados en base a la operación del protocolo: basados en multi-trayectoria, pregunta, negociación, calidad de servicio ó coherencia.

Existe otra categoría para definir cómo es que los nodos encuentran una ruta hacia su destino, estos protocolos pueden ser proactivos, reactivos e híbridos. Cuando los nodos permanecen estáticos es preferible utilizar un protocolo manejado por tablas que un protocolo reactivo; los protocolos reactivos gastan una gran cantidad de energía en el descubrimiento de rutas e inicialización. Otra clase de protocolos de enrutamiento son los cooperativos, donde los nodos sensores envían datos a un nodo central en el cual son agregados y quizás ser sujetos a más procesamiento (Redondo Galván, 2006).

II.4.1. LEACH

En la sección II.3.1.4 se describió la funcionalidad del protocolo LEACH al nivel de la capa de enlace de datos. En esta sección se describen las funcionalidades del protocolo LEACH al nivel de la capa de red, en este sentido LEACH hace uso de una estructura jerárquica (ver Figura 13) basada en la agregación de datos.

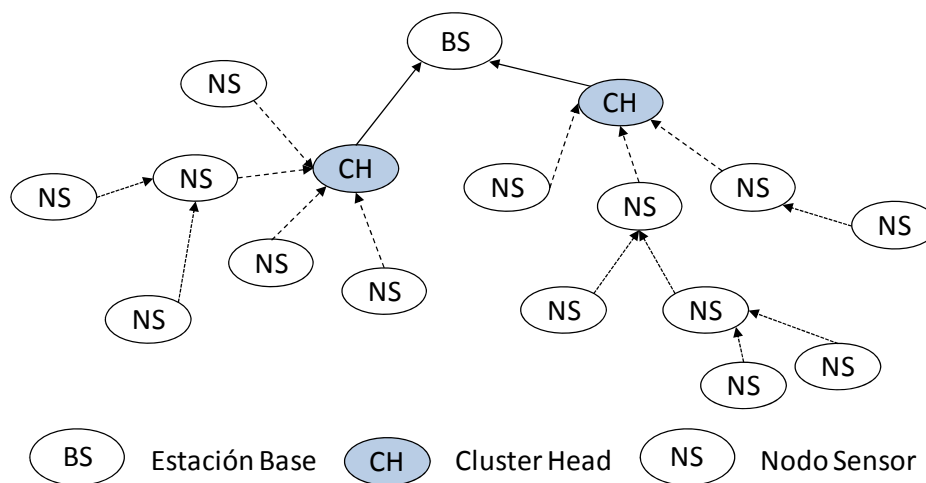


Figura 13. Estructura de una red jerárquica.

Es un protocolo de comunicación que intenta distribuir la carga energética de forma equitativa entre todos los nodos de la red, elige aleatoriamente un nodo cabeza de grupo de entre los nodos que conforman la red. Utiliza compresión de datos para reducir la cantidad de información que será transmitida a la estación base, esto se logra, realizando algunos cálculos y fusionando datos localmente para conservar la energía de cada nodo.

II.4.2. SPIN

Protocolo de Sensores para la Información vía Negociación. (Sensor Protocols for Information via Negotiation) (Kulik et al., 2002). Es un protocolo plano, basado en negociación, con agregación de datos, con limitada escalabilidad, multi-trayectoria y también basado en consulta.

Es un conjunto de protocolos para la comunicación eficiente en energía entre los sensores inalámbricos. Propone negociación y adaptación de recursos como una solución a los inconvenientes de la red, como la implosión causada por inundación, traslape de alcance del radio de transmisión de los nodos y conservación de energía. Utiliza paquetes pequeños para hacer la negociación, además se comunica eficientemente evitando redundancias. Cada nodo tiene un administrador de recursos, lo que les permite limitar su actividad cuando el nivel de energía es bajo.

II.4.3. GAF

Fidelidad Geográfica Adaptativa (Geographical Adaptive Fidelity) (Xu et al. 2001). Este protocolo fue diseñado originalmente para redes móviles ad hoc, (aunque también puede ser aplicable a redes de sensores) tiene como objetivo reducir el consumo de energía.

Primeramente, la red es dividida en una cuadrícula virtual con zonas fijas. En cada zona o celda, los nodos se organizan para jugar distintos roles. Entre los nodos de cada celda se elige un nodo sensor representante que estará despierto por un cierto periodo de tiempo mientras los otros duermen. Es decir, GAF conserva la energía apagando los nodos innecesarios sin afectar el nivel de enrutamiento de la red. Con esto, busca eliminar las redundancias para conservar la energía mientras conserva la fidelidad de la aplicación.

GAF es un protocolo para redes basado en localización y utiliza las celdas virtuales para designar nodos representantes. Cada nodo GAF requiere información de localización (e. g. utilizando un GPS ¹⁰), que le permita relacionar el nodo con un punto de la cuadrícula virtual creada. GAF incrementa sustancialmente el tiempo de vida de la red a medida que el número de nodos aumenta.

¹⁰ GPS (Global Positioning System, Sistema de posicionamiento Global). GAF supone que la información de localización es obtenida por medio de dispositivos GPS u otras técnicas de localización mencionadas en (Xu et al., 2001). Aunque también pueden ser útiles el uso de estrategias de trilateración como las que se aplican en redes ad hoc.

El tamaño de la cuadrícula o rejilla virtual se basa en la distancia máxima de alcance del radio nominal R del dispositivo. Formalmente la definición de la separación en las celdas virtuales es: *la distancia máxima entre dos posibles nodos en celdas adyacentes*. Tal como se indica en la Figura 14, donde se observa que la separación entre el nodo 2 de la celda B y el nodo 5 de la celda C, no debe exceder el tamaño de R .

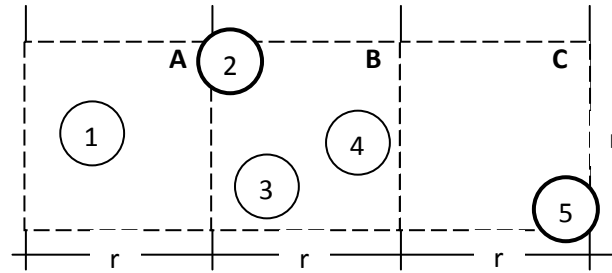


Figura 14. Separación máxima entre nodos representantes.

De tal modo que la diagonal máxima que conecta dos celdas adyacentes queda representada de esta forma:

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \quad (1)$$

ó

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (2)$$

Para determinar cual nodo permanecerá activo en la celda, GAF utiliza una estrategia de balanceo de carga. Cuando un nodo permanece en estado activo por un tiempo T_a , cambia a un estado de descubrimiento para brindar la oportunidad de que otro nodo de esa misma celda pueda ser representante y cambiar su estado a activo. Este cambio se hace en base a un nivel de energía, es decir, los nodos que conserven el mayor nivel de energía remanente son los candidatos más probables a ser representantes.

La decisión de encender y apagar los nodos es independiente de los protocolos de enrutamiento para las redes inalámbricas de sensores (y redes ad hoc, según sea el caso). Dicho de otra manera, si un nodo está en un estado activo y a su vez enviando paquetes de enrutamiento cuando es tiempo de apagar el nodo, GAF asume que el algoritmo de enrutamiento es el responsable de re-enrutar el tráfico rápidamente.

II.5. Resumen del capítulo

En este capítulo se revisaron algunas opciones de comunicación, tanto para capa de enlace de datos como de capa de red. Además se presentaron recomendaciones de diseño para los protocolos de comunicación en WSN.

Para este trabajo de investigación, la atención se enfocó en la revisión de los protocolos que consideran la optimización de la energía, ya que son relevantes para el cumplimiento de los objetivos particulares descritos en el capítulo I. Los protocolos en los que se profundizó fueron: S-MAC, PMP y GAF, los cuales son fundamentales para la integración de la propuesta del subsistema eficiente en energía que se hace en el capítulo III.

Capítulo III

Diseño de la propuesta para un subsistema de comunicación eficiente en energía

III.1. Características de diseño para WSN.

Según la investigación propuesta por (Romer y Mattern, 2004) hay ciertos lineamientos a seguir para el diseño de una red inalámbrica de sensores. Para presentar las características del modelo propuesto, es necesario indicar cuáles son las condiciones y consideraciones que se hacen acerca del mismo; estas consideraciones son las siguientes:

Emplazamiento: Se refiere al despliegue de los nodos en el ambiente físico. Puede realizarse de manera aleatoria o manual y ésta puede ser de forma única o continua. El emplazamiento o despliegue de los nodos tiene un impacto en diversas propiedades como son la densidad de nodos y la movilidad.

Movilidad: Este aspecto está asociado con la capacidad de los nodos sensores de cambiar su posición después del despliegue inicial. La movilidad puede ser causada por efectos colaterales (i. e. factores ambientales como viento, agua) o por propiedades deseables del sistema. Puede realizarse de manera pasiva (e.g. sujeto a un objeto móvil) o de manera activa (i. e. con capacidades automotrices).

Costo, tamaño, recursos y energía: Dependiendo de las necesidades de la aplicación el costo de un nodo sensor puede variar entre varios cientos de dólares o solo algunos centavos. Por otro lado, el tamaño de un nodo sensor puede ser del tamaño de una caja de

zapatos o de proporciones microscópicas. Las capacidades y recursos de un nodo sensor están limitados al tamaño y costo, estas limitaciones pueden ser en cuestión de energía, cómputo, almacenamiento y comunicación. La energía puede estar almacenada en baterías o extraídas del ambiente (celdas solares por ejemplo), y el consumo de la energía puede variar de acuerdo al software del sistema o la programación de la aplicación en la que se utilice.

Heterogeneidad: Las primeras redes de sensores típicamente estaban compuestas por nodos sensores homogéneos, es decir, con capacidades de hardware y software idénticas. Sin embargo, las WSN actuales pueden componerse de una variedad de dispositivos distintos. Esta diversidad puede basarse en las capacidades de cómputo, potencia de transmisión y recepción, estar equipados de hardware especial como GPS, o estar equipados con interfaces de comunicación para establecer enlaces a larga distancia con otro tipo de redes como satélite o la Internet. El grado de heterogeneidad afecta la complejidad del software así como el manejo de todo el sistema.

Topología de red: Una propiedad importante de la red de sensores es su diámetro, que está asociado a la cantidad máxima de saltos entre cualquier par de nodos. La forma más básica de una topología de red se presenta cuando cada nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo a un salto. En una red multi-salto se pueden formar otro tipo de topologías de red como grafos o árboles de comunicación. La complejidad del mecanismo de enrutamiento y procesamiento de los datos (e. g. en una red tipo estrella donde se realiza agregación y correlación de datos por un nodo central) también depende de la topología.

Cobertura: El radio de alcance efectivo de los nodos sensores para monitorear el área, define su área de cobertura. La cobertura de la red se mide por el grado de cobertura del área de interés de los nodos sensores. En una cobertura escasa, solo unas partes del área de interés están cubiertas por los nodos sensores. En una cobertura densa, el área de interés está completamente cubierta por los nodos sensores. Con una cobertura redundante, varios

sensores cubren la misma posición. Una red con alta cobertura es una red robusta y puede utilizarse para prolongar el tiempo de vida de la red, apagando nodos redundantes.

Conectividad: La cobertura de la señal de radio y las posiciones físicas individuales de los nodos sensores definen la conectividad de la red. Se dice que la red está conectada si siempre existe una ruta que permita la comunicación entre dos nodos cualesquiera en la red. Se dice que la conectividad en la red es intermitente si la topología de la red se particiona ocasionalmente. Si los nodos están aislados la mayor parte del tiempo entonces la comunicación es esporádica, este último caso generalmente se presenta en escenarios donde los nodos son móviles. La conectividad influye en el diseño de protocolos de comunicación.

Tamaño de la red: El número de nodos sensores participantes en la red se relaciona con el área de cobertura, la conectividad y el tamaño del área de interés. El tamaño de la red puede variar de entre unos pocos de nodos a miles de ellos.

Para la elección del tamaño de la red y cantidad de nodos se presenta el trabajo propuesto por autores como (Blough y Santi, 2002; Santi y Blough, 2003; Santi et al., 2001) para la obtención del número de nodos participantes en la red para garantizar un nivel alto de conectividad.

III.1.1. Análisis de la distribución de probabilidad de los nodos

Para determinar el número de nodos suficiente para garantizar conectividad en el área a monitorear, se presenta a continuación una de las técnicas llamadas control de topología utilizada por (Santi y Blough, 2003), que en general basa su técnica en la *teoría de la ocupación* presentada en el Anexo B.

Dentro del contexto de la teoría de la ocupación, uno de los principales factores corresponde al tamaño de cada celda virtual creada r , y depende directamente del alcance de transmisión del dispositivo. Otro parámetro de importancia se relaciona con el número de nodos n , que conforman la red.

Como parte del análisis de la distribución de los nodos, se considera que los nodos se distribuyen de manera aleatoria uniforme e independiente en una región $R = [0, l]^d$ que representa a un cubo d – dimensional donde $1 \leq d \leq 3$ y con lados de longitud l ; el parámetro d se conoce como la dimensión de la red.

Se define una red inalámbrica multi-salto d -dimensional como $M_d=(N, D)$, donde N es un conjunto de nodos, y D representa la función de desplazamiento. $D: N \times T \rightarrow [0, l]^d$, para algún $l > 0$. La función $D: N \times T \rightarrow [0, l]^d$ asigna a cada elemento de N , para cualquier instante de tiempo $t \in T$, un conjunto de coordenadas en una región d -dimensional.

El rango o alcance asignado (RA – Range Assignment) para una red d -dimensional $M_d=(N, D)$ es una función RA: $N \rightarrow (0, R]$ que asigna a cada elemento de N un valor entre $(0, R]$, representando el alcance de transmisión. El parámetro R es llamado *máximo alcance de transmisión* de los nodos en la red, el cual depende de las características de los transceptores de radio equipados en los dispositivos sensores.

Los autores Santi y Blough presentan algunos teoremas que pueden ser aplicados perfectamente para encontrar la cantidad de nodos suficientes para garantizar conectividad, los cuales se presentan a continuación.

Teorema 1. (Santi y Blough, 2003). Considérense n nodos, cada uno con un alcance de transmisión igual a r , colocados de manera uniforme aleatoria dentro de una región $[0, l]^d$ con $d = 2, 3$ y considérese que

$$r^d n = kl^d \log l \quad (3)$$

para alguna constante $k > 0$. Adicionalmente considérese que $r = r(l) \ll l$ y $n = n(l) \gg 1$. Si $k > dk_d$, ó $k = dk_d$ y $r = r(l) \gg 1$, entonces el grafo comunicado resultante es conectado a.c.s.¹¹ donde

$$k_d = 2^d d^{\frac{d}{2}} \quad (4)$$

Teorema 2. (Santi y Blough, 2003). Considérense n nodos, cada uno con un alcance de transmisión de r , colocados de manera uniforme aleatoria en $[0, l]^d$ con $d = 2, 3$ y considérese que $r = r(l) \ll l$ y $n = n(l) \gg 1$. $r^d n \in O(l^d)$, entonces el grafo comunicado resultante no es a.c.s. conectado.

Nótese que la brecha entre la condición necesaria y suficiente para la conectividad a.c.s. es conocida como $r^d n \in \Theta(l^d \log l)$, es suficiente para conectividad a.c.s. (Teorema 1) y que $r^d n \gg l^d$ es necesaria para conectividad a.c.s. (Teorema 2). Así que, el alcance de transmisión crítico (CTR) para conectividad, denotado como r_c , puede ser cualquier función de tipo de (5) donde $f(l)$ es una función tal que $f(l) \in O(\log l)$ y $f(l) \gg 1$.

$$\frac{l^d f(l)}{n} \quad (5)$$

Esto significa que a través de una simulación extensiva, los autores (Santi y Blough 2003) argumentan que $f(l) \log l$ es también una condición necesaria para la conectividad a.c.s.. Por lo que hacen la siguiente proposición para probarlo.

¹¹ Del análisis asintótico. Significa Asintóticamente Casi Seguro, del inglés a.a.s.: Asymptotically Almost Sure.

Proposición 1. Si $R = [0, l]^d$, con $d = 2, 3$ y n nodos son distribuidos aleatoriamente uniforme en R , el CTR para conectividad está dada por (6) donde k es una constante de características de la ecuación (7).

$$r_c = k \frac{l^d \log l}{n} \quad (6)$$

$$0 \leq k \leq 2^d d^{\frac{d}{2}+1} \quad (7)$$

Finalmente, (Santi et al., 2001) mostraron que, si n nodos son desplegados aleatoriamente en $[0, l]$, entonces, el alcance de transmisión r estará conectado con una probabilidad cp de al menos: (ver ecuación (8))

$$cp = 1 - (l - r) \left(1 - \frac{r}{l}\right)^n \quad (8)$$

$$r \approx l \sqrt{\frac{d \log l}{n}} \quad (9)$$

Además se mostró por (Santi et al., 2001) que la ecuación (9) es una buena opción para el rango asignado inicial de los nodos si es el RA lo que se busca.

III.2. Características del diseño propuesto

A continuación se detallan las consideraciones y características que serán empleadas en el diseño del subsistema propuesto para este trabajo de tesis, estos elementos se han elegido primordialmente para cumplir con el objetivo general descrito en el capítulo I con el fin de efectuar un consumo eficiente de energía.

Las características de este diseño se proponen en base a la información del capítulo II sobre protocolos tanto de capa MAC como de capa de red para WSN, y al estudio de probabilidad para determinar el número de nodos de la sección anterior.

Las características y principales requerimientos para el diseño de la arquitectura que se propone para una WSN para un escenario de monitoreo de bosques son las siguientes:

- Solo hay una estación base (i.e. sink) localizada lejos de el área de sensado.
- El despliegue de los nodos se hace de manera no controlada, es decir, se colocarán nodos con una distribución aleatoria uniforme.
- Todos los dispositivos permanecerán inmóviles después de su colocación. Cada uno conoce su localización exacta (i.e. en base a estrategias de trilateración o técnicas como las mencionadas por (Bulusu et al., 2000)).
- La comunicación en la red es multi-salto¹² con enlaces simétricos, donde un enlace simétrico se define como la igualdad en cuanto a radio de cobertura entre un par de nodos, además, se dice que la comunicación puede efectuarse en ambos sentidos.

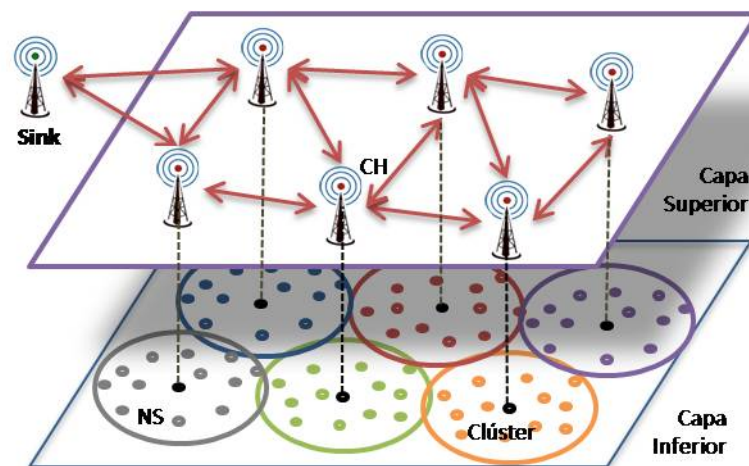


Figura 15. Estructura de red jerárquica de 2 niveles. Formada por agrupamientos de Nodos Sensores organizados por nodos cabeza de grupo (CH).

¹² Se considera utilizar comunicación multi-salto, ya que una comunicación par a par (comunicación directa) no es práctica, porque generalmente los nodos sensores se encuentran muy alejados del sink, (Zeng y Xu, 2007) lo que implica mayor consumo de potencia al transmitir o recibir debido a la distancia.

- Se propone una estructura de red de tipo jerárquica con 2 niveles, con nodos cabeza de grupo (*Cluster-Head*) que tienen a su cargo un grupo de nodos sensores para el reporte de eventos, como el propuesto por (Pan et al., 2003) en la Figura 15.
- A cada nodo se le asignará un identificador único (ID) y se diferenciará su jerarquía por sus tareas dentro de la red.

Para los nodos cabeza de grupo se considera que:

- Son dispositivos sin restricciones de energía, se alimentan de manera externa (i.e. celdas solares, baterías).
- La separación entre nodos cabeza de grupo (CH) puede ser de varios kilómetros, para esto se consideran dispositivos con mayor capacidad de procesamiento y radio de alcance. Un ejemplo de este tipo de interfaces de comunicación es el módulo de comunicación AeroComm AC4790-1000 utilizado por (Pérez Ramos, 2008), donde se menciona que este dispositivo puede ser adaptado para aplicaciones con redes de sensores y funciona a distancias mayores de 10 km con trayectoria de visibilidad directa (ver Figura 16).
- El CH proporcionará la calendarización inicial a los nodos sensores a su cargo para dormir o despertar de acuerdo a la duración de la ranura.
- El CH procesará y eliminará redundancias de la información recolectada por los nodos sensores, la cual hará llegar a la estación base.



Figura 16. Modelo de interfaz inalámbrica propuesto por (Pérez Ramos, 2008) que incluye el módulo de comunicación AeroComm AC4790-1000.

En el caso de los nodos sensores, se considera que:

- Son los encargados de recolectar los datos de la variable física, es decir, reportan los eventos sucedidos al CH, a través de una comunicación multi-salto inter-clúster.
- Son dispositivos con menor radio de alcance de transmisión que el CH, donde la distancia máxima no deberá exceder a 1 km.
- Se han reportado trabajos como el de (Navarro Murillo, 2005) donde la distancia de separación con un buen desempeño puede ser de 500 metros. El cual utiliza un módulo de AeroComm modelo AC4490-1000M.
- Dentro de cada clúster debe existir una ruta activa, con la posibilidad de alternar su trayectoria para repartir el gasto energético entre los nodos que conforman la red.

III.3. Integración de la propuesta

El diseño que se propone para cumplir con los objetivos y coadyuvar a la solución del problema planteado se basa en cuatro módulos principales, y estos son:

- a) Protocolo Administrador de Energía (PMP) para el control de la topología
- b) Protocolo GAF para la creación la rejilla virtual
- c) Análisis de Santi y Blough para determinar el número de nodos.
- d) Protocolo S-MAC para la rotación de CDS.

A continuación se describe la interacción de los elementos que integran la propuesta destacando su función en pro de cumplir los objetivos planteados en el capítulo I.

III.3.1. Topología de red

Comencemos por el control de topología, el protocolo administrador de energía para redes regulares (PMP, capítulo II.3.3.1) se visualiza como una buena opción para la disposición

física de los nodos, lo cual nos garantiza que en todo momento existirá una ruta activa dominante que varía en el tiempo para darle oportunidad a otros nodos de participar como nodos activos.

Con el protocolo PMP se obtiene un consumo eficiente de energía por parte de todos los nodos que participarán en la ruta activa, además no es necesario que el 100% de los nodos estén encendidos todo el tiempo, sin embargo, cualquiera de ellos es capaz de detectar un evento y reportarlo. Dada esta situación la colocación del nodo CH no representa problema porque habrá una ruta disponible para comunicarse con él; para fines de simulación el nodo CH será colocado al centro de cada clúster.

El protocolo PMP supone un ambiente simétricamente regular, que corresponde al caso de un despliegue controlado, donde para cada celda (intersección fila – columna) exista por lo menos un nodo, que en algún instante de tiempo predeterminado, sea capaz de hacer las funciones de un elemento miembro del CDS activo, como el nodo central de la Figura 17.

Las restricciones del PMP son claras, deberá existir un nodo en cada intersección o celda, todos los nodos participarán en algún momento en la ruta activa conectada. Por otro lado, el tamaño de las columnas m y de las filas n que componen el área a monitorear está limitado a que el módulo matemático 3 de n y el módulo 3 de m debe ser igual a 2. En este sentido, en el ejemplo que se muestra en la Figura 17 y que denota un arreglo de dimensiones de 5 x 5, el esquema PMP no funciona adecuadamente ya que cuando se hace la segunda rotación para el CDS, según las reglas de PMP se elegiría la fila 6 y en este caso sería imposible conectar el conjunto conectado básico.

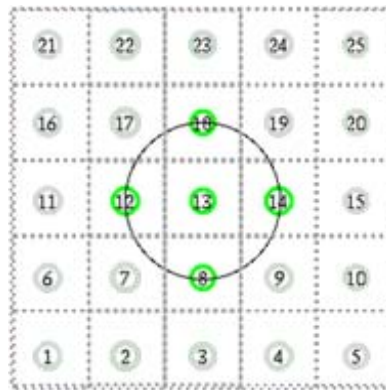


Figura 17. Topología regular para una red en malla de 5 x 5. En donde el radio de alcance del nodo 13 lo comunica principalmente con 4 vecinos adyacentes.

Por lo que el número mínimo de m y n debe ser igual a 8, como se mostró en la Figura 12 del capítulo II. Adicionalmente el protocolo PMP requiere de un nodo por cada intersección, y en la propuesta se considera que el ambiente no es controlado, por lo que básicamente se tendría más de un nodo por intersección; debido a esto se requiere de la implementación del protocolo GAF (ver sección II.4.3).

III.3.2. Creación de rejilla virtual

Considerando que para este trabajo de investigación, el despliegue de los nodos no es controlado y que se hace con una distribución aleatoria uniforme; se considera también que cada nodo sensor conoce de antemano su localización después del despliegue, y que además son nodos sin movilidad. Estas consideraciones son razón suficiente para emplear el protocolo GAF. Donde uno de los primeros pasos del mecanismo empleado en GAF consiste en la creación de la rejilla virtual.

Para este trabajo se define R como el radio nominal de alcance del dispositivo¹³ y r como una unidad de longitud por lado de la rejilla virtual, y que la distancia máxima de separación entre nodos está dada por la diagonal máxima que conectan dos celdas adyacentes y se obtiene de la ecuación (1) vista en el capítulo 2.

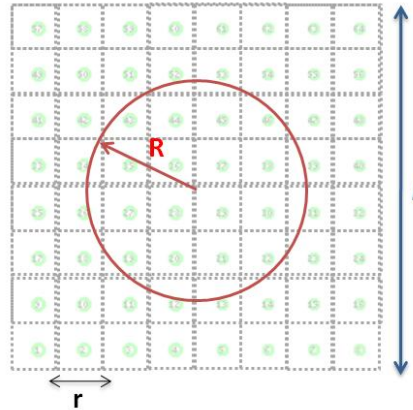


Figura 18. Ejemplo de una rejilla virtual de lado igual a 8, con dispositivos de radio nominal igual a R y donde r corresponde a tamaño máximo de separación entre celdas.

Si R es el radio de alcance crítico del dispositivo (250 metros en este caso) mostrado en la Figura 18, entonces sustituyendo en la ecuación (2) se tiene que el tamaño de cada celda virtual r está dada por:

$$r \leq \frac{250}{\sqrt{5}} \leq 111 \text{ metros} \quad (10)$$

Dada la restricción del protocolo administrador de energía (mencionada en II.3.3.1) para conservar la mayor cantidad de energía, el tamaño de la malla deberá ser mayor o igual a 8 x 8.

¹³ Por cuestiones de simulación, contando con los elementos ya establecidos para simular redes inalámbricas de sensores, se define que el radio nominal de los dispositivos para la implementación es de 250 metros lo cual se explica con mayor detalle en el capítulo V.

Puesto que la separación entre celdas (calculada en (10)) es igual a 111 metros, como se puede observar en la Figura 19; entonces tenemos que el tamaño de las celdas $r = 111$ metros, y si consideramos la restricción de PMP, entonces el tamaño mínimo del área a monitorear está dado por $l = 888$ metros para cada grupo (o clúster).

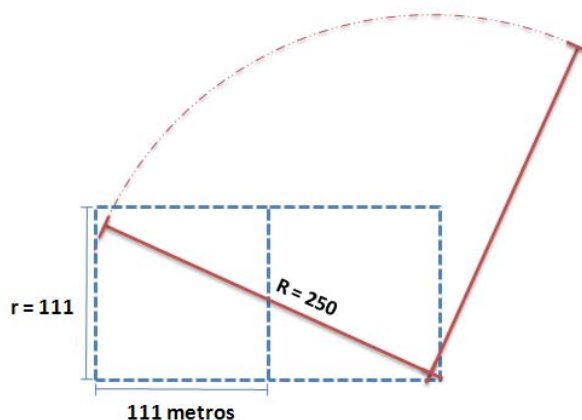


Figura 19. Separación inter celdas con nodos de radio nominal de 250 metros que representa la diagonal máxima de separación para comunicarse.

De acuerdo a los requerimientos del protocolo GAF en conjunto con el funcionamiento del protocolo PMP, se requiere que como mínimo exista un nodo en cada celda; para GAF, en aquellos escenarios donde existan más de un nodo dentro de la misma celda, se elegirá el nodo con mayor energía para que éste opere como el nodo representante activo en cada rotación de CDS. Con esto se busca que no sean los mismos nodos los representantes en cada celda, sino que los nodos dentro de una celda se vayan rotando. Los nodos que no pertenezcan al CDS activo cambiarán su estado a apagado (o dormido). Esto se hace para repartir el gasto energético en todos los nodos de la red y contribuir a maximizar el tiempo de vida útil.

Lo que nos lleva a la siguiente pregunta, ¿Cómo garantizar que haya por lo menos un nodo en cada celda? Esta pregunta se responde fácilmente con el análisis previamente realizado

por (Santi et al. 2001) para determinar el número de nodos y garantizar un alto grado de conectividad.

III.3.3. Número de nodos

Para determinar el número de nodos a ser desplegados se utiliza el Teorema 1 propuesto por (Santi y Blough, 2003), el cual garantiza conectividad con alta probabilidad. Como no es necesario calcular el rango de alcance crítico (ya que se utiliza un dispositivo con radio nominal fijo, para fines de simulación), el primer paso, es despejar la ecuación (3) en función de n .

$$n = k \frac{l^d \log l}{r^d} \quad (11)$$

Donde:

$$d = 2$$

$$r = 250$$

$$l = 888$$

En este caso, r corresponde al alcance o radio de transmisión del dispositivo. Además para el caso de k se utiliza la ecuación (7) para verificar la probabilidad de conectividad que ofrecerá la red. Resolviendo para (7), (8) y (11) tenemos los siguientes valores de k , n y el porcentaje de conectividad de la Tabla II.

Como se observa, los métodos de PMP, GAF y la teoría de ocupación están muy ligados ya que los tres comparten el enfoque de la creación de una rejilla virtual.

Tabla II. Cantidad de nodos n participantes en un área de sensado de 888 x 888 metros con un radio de alcance homogéneo de 250 metros por nodo.

k	<i>Conectividad (%)</i>	n (nodos)
8	99.071	298
10	99.75	372
12	99.892	447
14	99.964	521
16	100	596

III.3.4. Rotación de CDS

Una vez determinado el número de nodos necesarios para garantizar conectividad con alta probabilidad, es importante indicar cada cuanto tiempo se realizará la rotación para que se elijan nuevos nodos representantes y los que ya tuvieron su periodo activo duerman.

Por lo tanto, la rotación de cada conjunto dominante será una tarea para el protocolo S-MAC. Se optó por utilizar S-MAC por ser uno de los primeros protocolos desarrollado para redes inalámbricas de sensores, y en general es la base de otros protocolos para WSN, por lo que su funcionamiento básico puede ser adaptado fácilmente.

Se complementa con GAF para indicar cuales nodos son los que deben permanecer activos y cuales deberán dormir en cada trama. Además S-MAC es elegido por ser un protocolo basado en calendarización el cual puede ser adaptado para formar tramas lógicas, es decir, la unión de varias tramas S-MAC que forman un conjunto N , la cual se observa en la Figura 20.

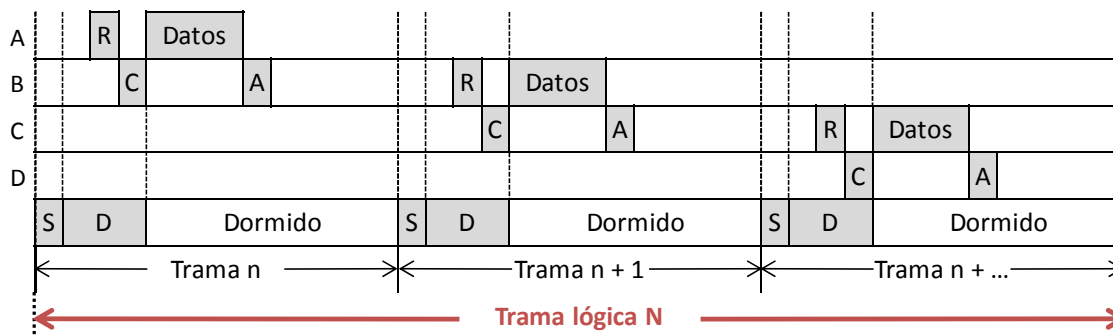


Figura 20. Trama lógica N , resultado de varias tramas n de S-MAC.

En la figura 20, se observa que una trama lógica N está compuesta por más 2 o más tramas n de S-MAC. Para referencias posteriores en los siguientes capítulos se utilizará la notación xN , donde x representa un número entero mayor o igual a 2. Por ejemplo, cuando se habla de una trama virtual de longitud $300N$, significa que se utilizará un conjunto de 300 tramas S-MAC simples continuas en tiempo.

Algunas consideraciones para implementar S-MAC para este trabajo son:

- Una trama lógica N (compuesta por n tramas S-MAC) corresponde a la duración en que permanecerá activo cada CDS. Por lo tanto, la rotación de CDS se realizará cada N unidades de tiempo.
- El nodo cabeza de grupo (CH), tiene la capacidad de establecer la calendarización para la rotación de los CDS.
- Al comienzo de cada ciclo CDS, el CH indica cuales nodos deben dormir y cuales permanecer activos. Los nodos que no pertenezcan al CDS activo inmediatamente deberán cambiar su unidad de radio a modo dormido, y despertarán hasta el siguiente cambio de CDS.

III.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se presentaron los requerimientos y condiciones de diseño para la implementación de un subsistema eficiente en energía para el monitoreo ambiental en bosques; esta propuesta se hizo para brindar una solución a la descripción del problema planteado en el capítulo I.

En base a la investigación del capítulo II se hicieron una serie de consideraciones para plantear el diseño principalmente de la topología y disposición de los nodos físicamente. Además se revisó un punto importante para la red, que es el número de nodos necesario para garantizar conectividad.

La propuesta básicamente consiste en la implementación de diversos mecanismos:

- El protocolo PMP para obtener una ruta variable, disponible y conectada todo el tiempo.
- El protocolo GAF para dividir el área de monitoreo de forma virtual y hacer la elección de nodos representantes.
- El análisis de probabilidad de Santi para determinar el número de nodos que cubran el área con alta probabilidad de conectividad.
- Por último el protocolo S-MAC para indicar cuales nodos serán los que permanezcan activos y cuales otros tendrán que apagar su transceptor de radio.

Con esta propuesta se busca el ahorro y consumo eficiente de energía, al presentar una red robusta, conectada, jerárquica y con cobertura tal que permita que nodos redundantes apaguen su unidad de radio para repartir el gasto de energía entre todos los nodos que conforman un grupo (o clúster) y con esto maximizar el tiempo de vida de la red.

Capítulo IV

Simulación en NS-2

IV.1. ¿Qué es Network Simulator?

La herramienta de cómputo Network Simulator, también conocido como NS-2, es un simulador de redes de cómputo que tiene como función principal, probar o analizar el funcionamiento de una red de comunicación sin llegar a la implementación física de ésta. NS-2 permite simular conexiones cableadas o inalámbricas utilizando protocolos para las diferentes capas del modelo de referencia OSI, de igual forma es posible implementar una amplia variedad de fuentes de tráfico.

NS-2 está basado en el lenguaje orientado a objetos C++ y el intérprete OTcl, con estas herramientas es posible hacer una simulación de eventos discretos controlados por temporizadores previamente calendarizados, lo cual permite que a cada intervalo de tiempo sea posible analizar el comportamiento de la red en cuestión.

Por su parte, el lenguaje estructurado C++ brinda jerarquía, robustez y flexibilidad al hacer posible la manipulación de datos como encabezados, paquetes y la implementación de algoritmos de gran tamaño. C++ es un lenguaje de programación de rápida ejecución, puede utilizarse cuando en una aplicación el tiempo de simulación sea un factor crítico. Sin embargo, el proceso de hacer modificaciones y re compilar el código C++ presenta una menor flexibilidad, por lo que se considera que el código implementado en este lenguaje será modificado muy pocas veces. Por lo anterior, el simulador NS-2 hace uso del intérprete OTcl ya que al trabajar en la simulación de redes de datos, es frecuente la modificación de diversos parámetros como lo son las configuraciones de los escenarios, por lo que el uso de

OTcl facilita la implementación y simulación de redes de datos. Sin embargo, el uso del intérprete OTcl reduce el tiempo de ejecución. Es por esto que el uso de C++ junto con la flexibilidad del intérprete OTcl proporcionan a NS-2 la ventaja de ser un simulador rápido en tiempo de ejecución, fácilmente personalizable y adaptable al escenario deseado.

Como dato adicional, NS-2 es una herramienta gratuita para ser instalada en equipos basados en UNIX, y necesita un compilador de C++ para ejecutar los programas. (Para más información sobre NS-2 en las referencias se encuentra la dirección de la página oficial <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>).

IV.2. S-MAC en NS2

El protocolo S-MAC fue diseñado para la plataforma Mote¹⁴ que es implementada con el sistema operativo TinyOS¹⁵, como se describe en el trabajo de (Ye et al., 2002). El módulo smac se incluye en NS-2 a partir de la versión 2.28. Sin embargo, la versión 2.28 contiene varios errores de programación, pero en general cautiva su esencia.

Hasta la fecha aún existen partes del módulo smac que continúan en desarrollo, estas porciones de código están comentadas bajo la leyenda JOURNAL_PAPER. En la Tabla III, se describen las propiedades implementadas en el módulo smac para NS-2 con las características básicas totalmente funcionales y las descritas como JOURNAL_PAPER. Para este trabajo, fue necesario hacer algunas adecuaciones al software de simulación (*Network Simulator NS-2.33*) principalmente al código de smac, por lo que se optó por utilizar la configuración básica que es la más estable.

¹⁴ Un mote es un dispositivo electrónico muy pequeño compuesto de un microprocesador con memoria, sensor, radio de baja potencia y una batería. Desarrollado por la Universidad de California en Berkeley; manufacturado y vendido por Crossbow Technology Inc (<http://www.xbow.com/>).

¹⁵ TinyOS es un sistema operativo muy pequeño basado en eventos, ofrece modularidad para el hardware específico y aplicaciones específicas que requieran de muy poco procesamiento y almacenamiento (Hill et al., 2000).

Además de los cambios al código, smac en NS-2 maneja una serie de parámetros que pueden ser manipulados por el usuario. En algunos casos, como se observa en la Tabla IV, estos elementos pueden ser inicializados principalmente en el archivo TCL o directamente en el código de C++ (*smac.cc*).

Tabla III. Características básicas y en desarrollo (JOURNAL_PAPER).

Características básicas	Características JOURNAL_PAPER
Calendarización periódica	Escucha adaptable
Sensado de portadora física y virtual	Paso de mensaje
Evasión de sobre escucha	Algoritmo de sincronización mejorado
Mecanismos RTS/CTS para paquetes tipo unicast	Actualización de vecinos
Algoritmo de sincronización	Calendarización global
Descubrimiento de vecinos	

Tabla IV. Parámetros ajustables para inicialización de smac.

Nombre de bandera	Descripción
syncFlag_	Si es igual a 1, S-MAC funciona en modo de apagado periódico. Si es 0, S-MAC no utilizará el apagado periódico.
dutyCycle_	Indica el valor del ciclo de trabajo en porcentaje. Controla la duración del modo para dormir. De forma predeterminada el valor es de 10%. Esta característica solo funciona si la bandera de syncFlag_ es 1.
selfConfigFlag_	Si es igual a 1, todos los nodos S-MAC siguen un calendario de sincronización automático. Si es igual a 0, la calendarización para cada nodo puede ser configurada por el usuario.

IV.2.1. Modos de Operación de S-MAC

S-MAC puede funcionar de 3 modos distintos: apagado no periódico, apagado periódico sin escucha adaptable y apagado periódico con escucha adaptable. La elección de alguno de estos modos dependerá en gran medida de la aplicación que se desee implementar.

Por ejemplo, en estudios realizados por (Chen et al., 2006) se mostró que al utilizar el modo de apagado periódico sin escucha adaptable, para redes con poca carga de tráfico de datos se obtiene un muy buen desempeño en cuanto a energía. En el mismo trabajo de (Chen et al., 2006), también se demostró que el modo que utiliza la escucha adaptable mostró buenos resultados al reducir la latencia.

A continuación se definen los modos en que puede operar el protocolo S-MAC (Ye et al., 2002):

Modo 1: Apagado no periódico.

Si la bandera `syncFlag_` es igual a 0, S-MAC funcionará bajo el modo de apagado no periódico. Los nodos no siguen un calendario para dormir y encender, es decir todo el tiempo de la simulación estarán en modo activo. Sin embargo la característica de evasión de sobre escucha sigue funcionando, lo que significa que los nodos pueden dormir cuando detectan que la transmisión es para alguno de sus vecinos. Este modo no puede ser activado cuando se utilizan las características de `JOURNAL_PAPER`¹⁶.

Modo 2: Apagado periódico, sin escucha adaptable.

Si el parámetro `syncFlag_` es igual a 1 y no está activado el código de `JOURNAL_PAPER`, S-MAC trabajará bajo este modo. En otras palabras, S-MAC solo trabaja con las características básicas; no hay escucha adaptable ni paso de mensaje.

Modo 3: Apagado periódico, con escucha adaptable.

Este modo está disponible solo si se ha compilado el código `JOURNAL_PAPER`, en este caso funcionará con las características avanzadas como las mencionadas en la Tabla III.

¹⁶ S-MAC señala un error de segmentación si se desea implementar el modo 1 con escucha adaptable. Es una situación que no fue contemplada desde su inicio, y continúa apareciendo en versiones recientes como la 2.33; se considera inestable.

Para utilizar la escucha adaptable, además de compilar el código JOURNAL_PAPER es necesario modificar también la siguiente bandera en el archivo smac.cc y smac.h según el modo que se desee, por defecto esta desactivado:

```
adaptiveListen_ = 0;
```

IV.2.2. Parámetros configurables de S-MAC

De acuerdo a las necesidades de la aplicación en la que se requiera utilizar S-MAC será como se configuren algunos parámetros personalizables como el modo de operación, el ciclo de trabajo, la cantidad de paquetes para enviar en una trama, cantidad de vecinos y calendarios, etcétera. Estos son los tipos de elementos que se configuran para capa MAC, pero además hay otras opciones para capa física que también pueden ser manipuladas en NS-2, por lo que a continuación se muestra como está constituida una trama S-MAC y los valores predeterminados de los parámetros que la conforman.

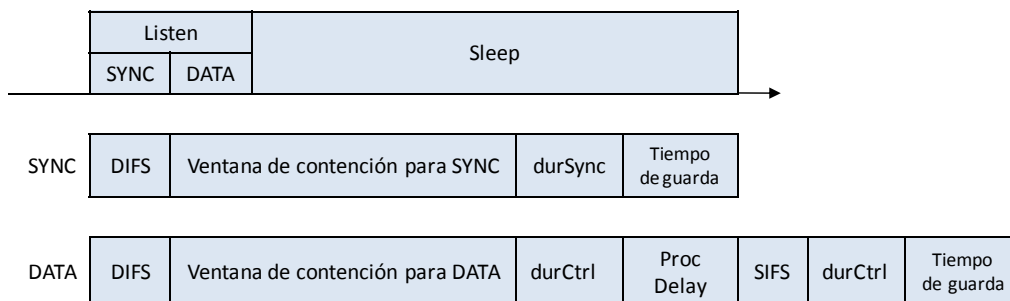


Figura 21. Formato de trama S-MAC básico

El tamaño de la trama S-MAC es el mismo para todos los nodos que conforman la red, y éste puede variar de acuerdo al ciclo de trabajo y algunas variables de capa física como las mostradas en la Tabla V y Tabla VI.

Tabla V. Algunos parámetros de capa física y de capa MAC

Nombre	Descripción	Valor
BANDWIDTH	Tasa de transmisión de Radio	20 kbps
ENCODE_RATIO	Codificación Manchester	2
SIZEOF_SMAC_CTRLPKT	Tamaño de los paquetes de control	10 bytes
SIZEOF_SMAC_SYNCpkt	Tamaño de los paquetes SYNC	9 bytes
slotTime_	Tiempo de la ranura en la ventana de contención	1 ms
difs_	Espacio inter-trama DCF	10 ms
sifs_	Espacio inter-trama corto	5 ms
eifs_	Espacio inter-trama extendido	50 ms
durSyncPkt_	Tiempo para transmitir un paquete SYNC	10.2 ms
durCtrlPkt_	Tiempo para transmitir un paquete de control	11 ms
timeWaitCtrl_	Longitud de una trama en ms	18 ms

Tabla VI. Parámetros de capa MAC configurables.

Nombre	Descripción	Valor
SYNC_CW	Número de ranuras en la ventana de contención de SYNC	31
DATA_CW	Número de ranuras en la ventana de contención de DATA	63
SIZEOF_SMAC_DATAPKT	Tamaño fijo de del paquete en bytes	50
durDataPkt_	Tiempo para transmitir un paquete de datos en ms	43
syncTime_	Longitud del periodo SYNC en ms	55.2
dataTime_	Longitud del periodo de DATA en ms	105
listenTime_	Longitud del periodo de escucha en ms	160.2
sleepTime_ (10% duty cycle)	Longitud del periodo sleep en ms	1442.8
cycleTime_ (10% duty cycle)	Longitud de una trama en ms	1603

Los valores de la Tabla VI son los que aparecen de forma predeterminada en la configuración de S-MAC, pero al cambiar algunos de los valores como la ventana de contención SYNC, DATA u otro valor como el tamaño del paquete, se actualiza la duración del ciclo de trabajo.

IV.2.3. Cálculo de duración de trama S-MAC

Al final de la Tabla VI se indica que la duración de un ciclo de trabajo al 10% es de 1603 *ms*, y las operaciones para llegar a este resultado se presentan en esta sección; pero antes de llegar a los resultados y en base a la Figura 21 se observan las variables DIFS y SIFS, entre otras, las cuales se utilizan para el mecanismo de contención como en el caso del 802.11 y su descripción es la siguiente:

DIFS: espacio inter-trama de DCF (Distributed Coordination Function, Función de Coordinación Distribuida). Se utiliza al comienzo de cada ventana de contención, es el tiempo mínimo que el nodo tiene que esperar para iniciar una transmisión.

SIFS: espacio inter-trama corto. Se usa antes de enviar un paquete CTS o ACK. Toma en cuenta el retardo que lleva el procesamiento de cada paquete.

EIFS: espacio inter-trama extendido. Se utiliza en el caso de ocurrir una colisión para dar tiempo a la aplicación del algoritmo de retroceso o back-off.

Una vez definidos los conceptos anteriores, comencemos por obtener los valores de duración para el paquete SYNC, en S-MAC el nombre de esta variable es *syncTime_* y se define como:

$$syncTime_ = difs_ + slotTime_ * SYNC_CW + durSyncPkt_ + guardTime_ \quad (12)$$

por lo tanto,

$$syncTime_ = 10ms + 1ms * 31 + 10.2ms + 4ms = 55.2ms \quad (13)$$

Continuando para obtener el valor de la duración del paquete DATA (que contiene mensajes de control principalmente, ver Figura 21), representado por la variable $dataTime_$, se tiene que:

$$dataTime_ = difs_ + slotTime_ * DATA_CW + durCtrlPkt_ + PROC_DELAY + sifs_ + durCtrlPkt_ + guardTime_ \quad (14)$$

$$dataTime_ = 10ms + 1ms * 63 + 11ms + 5ms + 11ms + 1ms + 4ms = 105ms \quad (15)$$

El tiempo en que un nodo se encuentra activo o en estado de escucha, está compuesto por el tiempo de sincronización más el tiempo para los datos de control. El tiempo de escucha de calcula de la siguiente manera:

$$listenTime_ = syncTime_ + dataTime_ \quad (16)$$

$$listenTime_ = 55.2ms + 105ms = 160.2ms \quad (17)$$

Y el tiempo del ciclo de trabajo (ecuación 18), es calculado en base del porcentaje indicado por el usuario. La duración de la trama S-MAC varía de acuerdo al porcentaje del ciclo de trabajo utilizado, por ejemplo, en la ecuación (19) se calcula la duración de una trama S-MAC para un ciclo de trabajo del 10%.

$$cycleTime_ = listenTime_ * \frac{100}{dutyCycle_} + 1 \quad (18)$$

$$cycleTime_ = 160.2 * \frac{100}{10} + 1 = 1603ms \quad (19)$$

Por lo que solo resta completar el tiempo que duerme el nodo (ecuación 21), que corresponde a la duración de la trama S-MAC (ecuación 19) menos el tiempo que el nodo utiliza en el estado de escucha (ecuación 17) para el ejemplo del ciclo de trabajo del 10%.

$$sleepTime_ = cycleTime_ - listenTime_ \quad (20)$$

$$\text{sleepTime}_- = 1602\text{ms} - 160.2\text{ms} = 1442.8\text{ms} \quad (21)$$

IV.3. Adaptación de NS-2 para la simulación de la propuesta

Para utilizar el simulador NS-2 y adaptarlo a las necesidades de este proyecto, fue necesario revisar gran parte de módulos que interactúan con el módulo smac, entre ellos el módulo wireless-phy, mobilenode, energy-model, mac, y channel. Esta revisión es necesaria para conocer el ambiente de programación y las funciones que pueden invocarse tanto en el módulo smac como en el archivo TCL.

Las modificaciones más importantes en el código del simulador NS-2 fueron realizadas para ajustar la inclusión de smac como parte de la propuesta. Por lo que se presenta a continuación las modificaciones principales al código de smac, las cuales se han realizado en los archivos:

[ns-2.33/mac/smac.cc](#)

[ns-2.33/mac/smac.h](#)

IV.3.1. Calendarización de los nodos

Lo primero que se hizo fue verificar la implementación de la variable `selfConfigFlag_` que como ya se mencionó en la Tabla IV es la que indica la calendarización que seguirán los nodos. Cuando se cambia el valor a 0, significa que el usuario programador controlará la participación de los nodos en la ranura de tiempo indicada; es decir, el usuario funge como el nodo cabeza de grupo (CH) y éste debe de notificar que nodos deberán permanecer despiertos, y cuáles deberán dormir (lo cual se describe en esta misma sección)

La información de notificación sobre el estado del nodo, se incluye en el paquete SYNC y en la fase de inicialización (antes de cada rotación de CDS) se le hace llegar a cada nodo

bajo la consideración de que el CH es un dispositivo con capacidades mayores de procesamiento y de gran alcance de transmisión, por lo que puede enviar este mensaje a un salto. Cuando el nodo conoce su calendarización, él mismo envía un mensaje de difusión a sus vecinos en el que informa que cambiará de estado (i. e. encendido o apagado según lo indicado por el CH) y que permanecerá en dicho estado por T milisegundos, así todos los nodos actualizarán su tabla de calendarios y la tabla de vecinos. El procedimiento para actualizar el calendario de cada nodo se explica a detalle en el ANEXO C.

Un factor importante para el buen desempeño de la simulación es la cantidad máxima de nodos vecinos y la tabla calendarizadora de los nodos. Estos datos son parámetros configurables en el programa *smac.h* y se encuentran como:

```
#define SMAC_MAX_NUM_NEIGHBORS 20  
#define SMAC_MAX_NUM_SCHEDULES 4
```

De forma predeterminada, el número máximo para la tabla de vecinos es de 20 y 4 para la tabla de calendarios. Si se excede este valor, el programa emitirá una alerta y terminará su ejecución, por lo que se recomienda que este número sea seleccionado de acuerdo a las características del sistema.

En el caso de este trabajo de tesis, con las características presentadas en el capítulo III en la sección III.3.3 supongamos que se utilizan 372 nodos desplegados de forma aleatoria uniforme; de forma general podríamos decir 372 nodos se distribuyen en 64 celdas virtuales, con lo que se podrían observar más de 5 nodos por celda en algunos casos. Además si utilizamos un dispositivo con un radio nominal como el de la Figura 18, se puede ver que un nodo puede tener el alcance para escuchar más de 8 celdas virtuales adyacentes con 5 nodos cada una. Es por esto, que para este trabajo no se puede utilizar el valor predeterminado para el número de vecinos y calendarios.

En *smac.cc* el procedimiento para controlar al nodo se indica en la función *SMAC::command* en particular a la condición de *schedule-start-time* que solo se activa si la variable *selfConfigFlag_ = 0*, y obligatoriamente debe utilizarse seguida del tiempo en milisegundos. En este caso se hace una variación a este código solo para utilizarse con los nodos que deben permanecer despiertos.

IV.3.1.1. Nodos con radio activo

Para el diseño del subsistema de comunicación eficiente en energía, se propone que solo unos nodos sean los nodos representantes que permanecerán activos en rondas formadas por un CDS. El funcionamiento general, es que en cada ronda se borran las tablas de vecinos y calendarios de cada nodo, esto se realiza porque no es factible que los nodos activos almacenen la calendarización de todos sus vecinos (incluyendo los que no participan en el CDS). Los nodos activos participantes en el CDS serán elegidos en base a su nivel de energía residual, es decir, los nodos con mayor energía serán los representantes de cada celda virtual, según el protocolo GAF.

Así que el nodo comienza con una nueva tabla en cada rotación de CDS, e inmediatamente inicia con el descubrimiento de vecinos que también estén activos. Bajo esta nueva programación el nodo encenderá y dormirá conforme al esquema S-MAC por el tiempo T indicado, hasta que no se le avise al nodo que deba dormir por cambio de CDS.

En el programa *smac.cc* quedará así:

```

if ( selfConfigFlag_ != 1) {
if (strcmp(argv[1], "schedule-start-time") == 0) {
startTime_ = strtod(argv[2],NULL);

if (numSched_ > 0) {
int i, schedId, calendarios = numSched_;

```

```

        while (calendarios != 0) {
            schedTab_[calendarios].numPeriods = 0;
            schedTab_[calendarios].txData = 0;
            schedTab_[calendarios].txSync = 0;
            mhCounter_[calendarios]->value_ = '\x0';
            mhCounter_[calendarios]->tts_ = '\x0';
            mhCounter_[calendarios]->stime_ = '\x0';
            calendarios --;
        }
    }

    mhCounter_[0]->value_ = 0;
    mhCounter_[0]->tts_ = listenTime_;
    mhCounter_[0]->stime_ = cycleTime_;
    state_ = IDLE;
    numSched_ = 0;
    numSync_ = 1;
    numNeighb_ = 0;
    schedListen_ = 1;
    searchNeighb_ = 1;
    currSched_ = 0;
    schedTab_[0].numPeriods = SYNCPERIOD;
    schedTab_[0].txData = 0;
    schedTab_[0].txSync = 1;    // need to brdcast my schedule
    startTime_ = startTime_ + listenTime_;
    if ( startTime_ >= cycleTime_ )
        startTime_ = listenTime_;
        mhCounter_[0]->sched(CLKTICK2SEC(startTime_));
    mySyncNode_ = index_; // myself
    currSched_ = 0;
    return TCL_OK;
}
}

```

IV.3.1.2. Nodos con radio apagado

Para el caso de los nodos que deban dormir se hace otra modificación a la función *SMAC::command* pero se agrega una nueva condición que es *schedule-duerme* para indicar al nodo que debe cambiar al modo apagado (o dormido). Esta condición solo funciona al igual que la anterior, si está desactivada la bandera *selfConfigFlag_*. En este caso no se indica una duración, solo el comando *schedule-duerme*.

Cuando se ejecuta el comando *schedule-duerme* para los nodos que no participan en el CDS, lo primero que hace la rutina, es inicializar las tablas de calendarios y vecinos del nodo a dormir. En la rutina se les indica a los nodos que formarán el CDS activo (por medio de un mensaje de difusión), que el nodo en cuestión dormirá a partir de *1e-9* segundos (es un tiempo muy pequeño que por programación debe ser mayor a cero), esto es para dar la impresión de que el nodo comienza a dormir de forma inmediata. Una vez enviado el mensaje, el nodo entra en estado apagado.

El código queda de la siguiente manera:

```

if ( selfConfigFlag_ != 1) {
    if (strcmp(argv[1], "schedule-duerme") == 0) {
        if (numSched_ > 0){
            int i, schedId, calendarios = numSched_;
            while (calendarios != 0)
            {
                schedTab_[calendarios].numPeriods = 0;
                schedTab_[calendarios].txData = 0;
                schedTab_[calendarios].txSync = 0;
                mhCounter_[calendarios]->value_ = 'x0';
                mhCounter_[calendarios]->tts_ = 'x0';
                mhCounter_[calendarios]->stime_ = 'x0';
                calendarios --;
            }
        }
    }
}

```

```

    mhCounter_[0]->value_ = 0 ;
    mhCounter_[0]->tts_ = listenTime_ ;
    numSched_ = 0;
    numSync_ = 0;
    numNeighb_ = 0;
    schedListen_ = 0;
    searchNeighb_ = 0;    //no busca vecinos
    currSched_ = 0;
    schedTab_[0].numPeriods = 0;
    schedTab_[0].txData = 0;
    schedTab_[0].txSync = 1;    // need to brdcast my schedule
    startTime_ = 1e-9;
    startTime_ = startTime_ + dataTime_;
    mySyncNode_ = index_; // myself
    sleep();
    return TCL_OK;
}

```

Nótese que se utiliza la función `sleep()` que se incluye en `smac`, y que a su vez, hace referencia a la función `WirelessPhy::node_sleep()`, la cuál es la encargada de la capa física para que el nodo apague o entre en modo de ahorro de energía por un tiempo indefinido; en este caso hasta que el CH le indique que debe encender en el CDS al que pertenezca. Es por esto que no se agrega tiempo para despertar.

Dentro del módulo `/mac/wireless-phy.cc` las funciones `node_sleep()` y `node_wakeup()`, realizan los cambios de estados físicos para el transceptor de radio. Sin embargo, esto se lleva a cabo una vez que se haya verificado el estado anterior del radio, y esto se realiza en el módulo de `EnergyModel::set_node_state(int state)`. Si el nodo está realizando una transmisión, recepción o actualizaciones de ruta, se inicia un temporizador, el cual no debe exceder al tiempo máximo que puede durar el paquete en la red, (este tiempo es asignado por el módulo `mac` de NS-2) para que termine sus operaciones. En caso de no concluir con las tareas anteriores, simplemente obliga al nodo a cambiar al estado que se seleccionó en `wireless-phy`.

IV.3.2. Actualización de Energía

Continuando con el módulo smac, para hacer el monitoreo de energía se verificó el estado del radio en todo momento de ejecución, los posibles estados son definidos en la tabla VII:

Tabla VII. Definición de estados junto con número de identificador

Estado del radio	#	Descripción
#define RADIO_SLP	0	Radio apagado
#define RADIO_IDLE	1	Radio inactivo
#define RADIO_RX	2	Recepción de radio
#define RADIO_TX	3	Transmisión de radio

Antes de realizar cualquier cambio de estado de la unidad de radio, se agregó la siguiente línea al módulo smac para el monitoreo de la energía.

```
DecrEnergy(index_, radioState_, Scheduler::instance().clock());
```

La función *DecrEnergy* utiliza como parámetros de entrada, el ID del nodo en cuestión, el estado en que se encontraba el nodo antes del cambio, y el tiempo de ejecución actual. Su implementación es la siguiente:

```
void DecrEnergy(int nodo, int opc, double time)
{
    double gasto= 0.0, transcurrido = 0.0, P_ = 0.0;
    switch(opc){
        case 0: P_ = es_; break;
        case 1: P_ = ei_; break;
        case 2: P_ = er_; break;
        case 3: P_ = et_; break;
    }
    transcurrido = time - relojes[nodo];
    relojes[nodo] = time;
}
```

```

gasto=transcurrido * P_;
ene_res[nodo]= ene_res[nodo]- gasto;
if (nodo != 0)
    printf ("%f\t%d\t%f\n",time,nodo,ene_res[nodo]);
}

```

La variable $P_$ está asociada con la potencia de cada estado del nodo, por ejemplo el valor de la potencia en estado dormido: $es_ = 0.042 J$. La variable $relojes[nodo]$ se inicializa con el valor del tiempo de ejecución en que se hace el cambio de estado. La actualización de la energía de cada nodo se obtiene del residuo de la energía actual menos el cálculo de la potencia del estado por el tiempo que transcurrió.

Este procedimiento se implementó solo en *smac.cc* para realizar las cuestiones del análisis de resultados, que se presentan en el capítulo V. Sin embargo las funciones propias de NS-2 para actualizar el nivel de energía se llevan a cabo en el módulo *mobile/energy-model.cc* el cual se tomó como base para la creación de la función anterior.

Tanto el módulo *wireless-phy.cc* como el *energy-model.cc* fueron adaptados para mostrar gráficamente cuando un nodo duerme y cuando está activo. A cada nodo se le agrega un marcador, que en este caso es un hexágono de color azul que indica que el nodo duerme; por ejemplo, en el módulo *energy-model* cuando cambia el estado del radio del nodo a dormido se hace así:

```

tcl.evalf("%s add-mark m1 blue hexagon",node_ ->name());

```

Este tipo de modificadores se hacen con fines de ilustración para la herramienta NAM¹⁷ para demostrar que los nodos están trabajando como se le ha indicado.

¹⁷ NAM: Network Animator. Es una herramienta de visualización de los eventos que suceden en la simulación, a través de archivos generados por el simulador de redes NS-2. Soporta diseño de topología, animaciones a nivel de paquetes, herramientas para inspección de datos, entre otros. NAM se incluye en la descripción que hacen los autores en la página oficial de NS-2.

IV.4. Simulación de la propuesta del subsistema de comunicación

El funcionamiento de la propuesta se lleva a cabo en la implementación TCL, la metodología de operación de este código se basa en la propuesta compuesta por la integración de los protocolos PMP, GAF, S-MAC y el despliegue aleatorio uniforme de los nodos. Este código se divide en 5 fases principales, la secuencia de la programación se divide en las tablas VIII, IX, X, XI y XII que describen el desarrollo de la simulación.

Tabla VIII. Fase de inicialización de variables.

	Inicialización
1	Se inicializan las variables globales, tales como cantidad de nodos, tiempo de simulación en milisegundos, área a monitorear y para el caso de representar las cuadrículas virtuales, se calcula el tamaño máximo de cada celda en base a las operaciones mostradas en el capítulo III, para una cuadrícula de 8 x 8.
2	Si no se especifican valores como altura de la antena, ganancia, alcance de transmisión del radio, de forma predeterminada NS-2 toma las características de la tarjeta Lucent WaveLan DSSS utilizada en un principio para la comunicación por el protocolo 802.11 en NS-2. (Estas características se presentan en el capítulo V).
3	Se especifican los valores para simulación para el protocolo S-MAC. También se define el protocolo de enrutamiento a utilizar, en este caso AODV ¹⁸ , además de otros parámetros como el tipo de canal, modelo de propagación, entre otros. En esta caso, S-MAC modo 2: <i>Mac/SMAC set syncFlag_ 1</i> <i>Mac/SMAC set selfConfigFlag_ 0</i> <i>Mac/SMAC set dutyCycle_ 10</i>

¹⁸ AODV: Protocolo de redes Ad hoc basado en vector de distancia (del inglés Ad hoc On-Demand Distance Vector). Se elige AODV por ser un protocolo sencillo de implementar, bajo la premisa vista en el capítulo II donde GAF considera la presencia de un protocolo de enrutamiento de forma paralela. Además pensando en que solo existe una sola ruta disponible, el enrutamiento pasará a segundo plano.

Tabla IX. Creación de nodos con atributos de simulación.

Creación de nodos	
4	Se procede a la creación de los nodos participantes en el monitoreo con los atributos descritos en la fase de inicialización. Además se define que los nodos sensores no tendrán movilidad. En esta fase también se establece la posición física de los nodos, ésta se obtiene a partir de una distribución aleatoriamente uniforme, realizada de forma independiente para cada nodo. Para ubicar al nodo dentro de una celda como la propuesta en GAF, es necesario conocer su posición en el escenario de simulación. En este punto también se indica qué nodo actuará como el CH al cual se dirigirá la información recolectada.
5	Se indica la fuente de tráfico para la información, el tiempo de inter arribo, tamaño de paquete, entre otros. Para esta simulación no se incluyó una fuente de tráfico porque se trata de simular una red poco congestionada, e inactiva por largos periodos.
6	A los nodos creados se le agregan atributos de smac para controlarlos. <i>Node/MobileNode instproc getMac {param0} {</i> <i>\$self instvar mac_</i> <i>return \$mac_(\$param0)</i> <i>}</i>

Tabla X. Formación de tramas virtuales para la rotación de CDS.

Creación de Conjuntos Dominantes Conectados	
7	Se determinan los CDS en base a la información presentada en el capítulo II y III, para formar los conjuntos básicos. Estableciendo por localización las celdas participantes.
8	Se comienza la simulación, (como el tiempo de calendarización es controlado por el usuario) los cambios de CDS se hacen en base a la unión de varias tramas S-MAC para formar una trama virtual de mayor tamaño. Por lo que se le indica el tiempo de cada trama virtual en milisegundos.

Tabla XI. Elección y participación de nodos representantes.

Participación de nodos representantes	
9	<p>En cada trama virtual se utiliza un conjunto CDS preformado, para la elección del nodo representante de celda, se verifica primero cuál de ellos es el nodo con mayor energía residual, esta información se obtiene del módulo <i>common/mobilenode.cc</i> de NS-2 bajo la instrucción:</p> <pre><i>set energia_residual [\$node_(\$ID) energy]</i></pre> <p>Donde se almacena en una variable <i>energia_residual</i> la cantidad de energía que dispone el nodo <i>ID</i> en ese momento de la simulación.</p>
10	<p>Una vez obtenidos los nodos representantes del CDS se les indica a todos los nodos cual será el papel que deben desempeñar en la trama virtual, por lo que se les informa a los nodos que no son representantes que deberán dormir en esa ranura de tiempo.</p> <pre><i>\$mac_(\$ID) schedule-duerme</i></pre>
11	<p>A los nodos representantes se les informa cuanto tiempo estarán encendidos e inmediatamente siguen las funciones ya descritas en S-MAC para su operación.</p> <pre><i>\$mac_(\$ID) schedule-start-time \$ciclo_trabajo_</i></pre>

Tabla XII. Cierre y finalización de la simulación.

Finalización	
12	<p>Al término de la ranura de tiempo programada, se realiza iterativamente el proceso descrito en los puntos 9 a 11 de la Tabla XI para hacer la elección y rotación de los CDS hasta que el tiempo de simulación se agote.</p>
13	<p>Se les indica a los nodos que deben parar la simulación y se procede a cerrar los archivos creados para visualización que monitorean los eventos en NS-2.</p>

IV.5. Resumen de capítulo

En este capítulo se presentó una descripción de la herramienta de simulación NS-2. Algunas de las principales consideraciones para la selección del simulador NS-2 incluyen que éste es un simulador gratuito y además cuenta con la implementación del protocolo de capa MAC para redes inalámbricas de sensores, S-MAC. Adicionalmente, se mostraron las modificaciones realizadas al código de smac para adaptarse a las necesidades de la aplicación diseñada, y los parámetros configurables propios de S-MAC; de igual forma se analizaron y modificaron otros módulos de NS-2 para adaptar e integrarse a la propuesta.

En el transcurso de la simulación de este trabajo, se presentaron algunos inconvenientes, en particular que siendo el intérprete OTcl orientado a eventos, la simulación no puede ejecutarse de manera totalmente secuencial. Para esto, se extrajeron variables de la simulación en tiempo de ejecución para tomar decisiones sobre los nodos que deben ser electos para ser representantes de la celda virtual; estos datos son necesarios para realizar el cambio de CDS.

Además de la presentación del funcionamiento del programa TCL para la simulación, también se calcularon los valores de trama para S-MAC lo cual da pie a la obtención de resultados con distintas configuraciones para el tamaño de la trama virtual S-MAC.

Capítulo V

Simulación y Resultados

V.1. Parámetros de Simulación

En NS-2, cada nodo en la red puede ser configurado con atributos específicos, y también es posible modificar las características de los componentes del mismo. Por ejemplo, para cada nodo es posible modificar parámetros como: la ganancia de la antena y el alcance del radio de transmisión, entre otros. Para propósitos del presente trabajo de investigación, todos los nodos sensores son homogéneos y comparten las mismas características predeterminadas de NS-2, las cuales se definen en el archivo *ns/tcl/lib/ns-default.tcl* de NS-2.

V.1.1. Interfaz de radio y potencia

Tabla XIII. Parámetros predeterminados para la unidad de radio.

Frecuencia	914MHz
Umbral de Recepción	3.652×10^{-10} W
Potencia de Transmisión	281.83815 mW
Ancho de Banda	2 Mbps
Modelo de Propagación	Dos rayos
Antena	Omnidireccional
Altura de las Antenas	1.5 Metros
Ganancia de las Antenas	1
Factor de Pérdida	1
Radio de Transmisión	250 Metros

En la Tabla XIII se muestran los parámetros predeterminados para una interfaz de radio Lucent WaveLAN DSSS.

De acuerdo a los experimentos realizados por (Ye, et al., 2002) en los que se presentó una demostración del funcionamiento de S-MAC utilizando los dispositivos denominados Rene Motes (UCB) se observa que el consumo de energía fue de: 13.5mW, 24.75mW y 15 μ W para los estados de: recepción, transmisión y apagado, respectivamente. Investigaciones como las realizadas por (Ye, et al., 2002, 2004; Stemm y Katz, 1997; Pearlman et al., 2002) han demostrado que en el transceptor de radio la potencia utilizada entre el estado de recepción y el estado inactivo es muy parecida, por lo que los autores sugieren el mismo nivel de potencia para el estado de recepción e inactivo.

En la Tabla XIV se presenta el consumo de energía de los estados del nodo basados en el trabajo de (Pearlman, et al., 2002) donde se utiliza una interfaz de red 915MHz WaveLAN Turbo. Este modelo de dispositivo se asemeja al utilizado de forma predeterminada en la herramienta NS-2. Estos autores además definen que el máximo radio de alcance de transmisión es de 250 metros para cada nodo sensor, en los cuales, la unidad de energía está dotada con 8400J de energía inicial, lo que corresponde a dos baterías AAA de carga completa.

Tabla XIV. Tabla de valores de Energía.

Potencia de Tx	1.425 J/s
Potencia de Rx	0.925 J/s
Potencia en escucha	0.925 J/s
Potencia dormido	0.042 J/s
Energía Inicial	4200J

Para la realización de las simulaciones del presente trabajo de investigación, se consideró utilizar una energía inicial de 4200J (simulando la mitad de carga de las baterías); esta consideración, junto con los valores de potencia utilizados por (Pearlman, et al., 2002)

descritos en la Tabla XIV, se hace para acelerar el proceso de la simulación de la propuesta y obtener resultados en menor tiempo.

V.1.2. Tamaño del área y cantidad de nodos

El procedimiento para determinar el tamaño del área a monitorear, así como la cantidad de nodos necesarios para realizar dicha función, se presentó en el capítulo III. A manera de referencia, se presenta la Tabla XV para mostrar estos valores.

Tabla XV. Número de nodos y ambiente de sensado

Área a monitorear	888 x 888 Metros
Número de nodos	372 (Estáticos)
Despliegue	Aleatorio Uniforme

Para el escenario de simulación representado en la tabla II del capítulo III, existe una restricción en el número de nodos, donde la constante k condiciona el porcentaje de conectividad con alta probabilidad. Para la evaluación del desempeño de esta propuesta, se optó por utilizar el valor de $k=10$ (372 nodos). Al utilizar 372 nodos se obtiene una probabilidad de conectividad del 99.75%.

En NS-2 se modificó el número máximo de tablas de calendarios y tablas de vecinos (analizado en la sección IV.3.1) para garantizar el 100% de probabilidad de conectividad al incrementar el número de nodos a desplegar (Tabla II). Sin embargo, se presentaron ocasiones en que el simulador de redes arrojaba errores en el mantenimiento de dichas tablas. Por lo que se optó por utilizar 372 nodos al ser la mejor opción que se adaptó sin problemas y que garantiza un muy buen nivel de conectividad con alta probabilidad.

V.1.3. Configuración de Protocolos MAC y capa de red

De acuerdo a los modos de operación de S-MAC que se presentaron en la sección IV.2.1, para propósitos este trabajo de investigación solo se consideró el modo 2 de S-MAC. Con respecto al protocolo de enrutamiento, se implementó el protocolo AODV para realizar el encaminamiento de los datos que se produzcan como resultado de los eventos detectados por los nodos sensores activos. Se realizaron simulaciones para distintos ciclos de trabajo en S-MAC los cuales se observan en la Tabla XVI.

Tabla XVI. Configuración S-MAC

Protocolo MAC	S-MAC
<i>adaptiveListen_</i>	0
<i>syncFlag_</i>	1
<i>selfConfigFlag_</i>	0
<i>dutyCycle_</i>	5, 10, 25, 50
Protocolo de red	AODV

El porcentaje máximo para el ciclo de trabajo de S-MAC a simular en esta investigación es del 50%, porque se considera un escenario con eventos esporádicos, con una red poco congestionada, donde no es necesario permanecer en un estado activo por más del 50% de la duración de la trama S-MAC.

V.2. Metodología para la simulación

Para cada escenario de simulación se realizaron 10 repeticiones aleatorias e independientes. Los distintos escenarios simulados se presentan en el siguiente orden:

- S-MAC sin modificaciones para 5%, 10% 25% y 50% de ciclo de trabajo.
- S-MAC modificado con 5% de ciclo de trabajo, para 50N, 100N, 300N y 500N

Donde el conjunto N corresponde a tramas S-MAC unidas para formar tramas virtuales (ver sección II.3.4 para la rotación de CDS).

- S-MAC modificado con 10% de ciclo de trabajo, para 50N, 100N, 300N y 500N.
- S-MAC modificado con 25% de ciclo de trabajo, para 50N, 100N, 300N y 500N.
- S-MAC modificado con 50%¹⁹ de ciclo de trabajo, para 100N, 300N y 500N.

Se incluye además otra nueva configuración con ciclo de trabajo del 20% para hacer comparaciones en tiempo y consumo de energía para el análisis de resultados.

V.2.1. Monitoreo de energía

Para evaluar la eficiencia del modelo propuesto, las simulaciones se enfocaron esencialmente al monitoreo de energía. Cabe mencionar que solo se está evaluando la simulación sin intervención de fuentes de tráfico de datos, con el fin de analizar el desempeño del subsistema de comunicación cuando la mayor parte del tiempo se encuentra ocioso. Para obtener resultados más confiables, se obtuvo el valor medio para cada juego de 10 simulaciones por configuración.

Lo más importante para evaluar la propuesta, es observar que sucede en la unidad de radio, así que las modificaciones al código NS-2 que se hacen en el módulo smac (mencionadas en el capítulo IV) se basan en la siguiente fórmula presentada por (Antoniu, 2007).

$$E^{Total} = \sum_{i=1}^n (p^{tx}t_i^{tx} + p^{rx}t_i^{rx} + p^{inactivo}t_i^{inactivo} + p^{dormido}t_i^{dormido}) \quad (22)$$

Donde:

- n : es el número total de nodos.

¹⁹ Se omite la simulación para S-MAC al 50% con 50N, porque generó archivos muy extensos para analizar (mayores de 2 gigabytes). Esto se debe a que el tiempo de rotación es el más pequeño para las distintas configuraciones de tramas virtuales, lo que produce que el cambio de estado en el transceptor de radio sea muy frecuente.

- p : está asociada con la potencia requerida para cada uno de los estados del nodo, transmisión (tx), recepción (rx), estado *inactivo* y estado *dormido*.
- t : se asocia al tiempo en el que el transceptor de radio ha permanecido en algún estado, como transmisión (tx), recepción (rx), *inactivo* y *dormido*.

Para la presentación de los resultados, se normaliza la energía inicial a 4200J, estrictamente corresponde a la energía E_0 que es igual a la sumatoria de la energía inicial de los 372 nodos en $t=0$; posteriormente se obtiene la energía total (E_t^{Total}) en el instante t en incrementos de 15 minutos hasta finalizar la simulación con $t=14400s$. (4 horas de simulación). La energía promedio (E_{prom}) en el instante t se obtiene por la ecuación (23):

$$E_{prom} = \frac{E_0 - E_t^{Total}}{n} \quad (23)$$

donde

$$E_0 = 372 \times 4200 J = 1,562,400 J \quad (24)$$

De acuerdo a la información de la sección III.3.1 que describe la topología de la red empleada para este trabajo, en la Figura 12 se puede observar que para una matriz de 64 celdas virtuales se formarán básicamente 4 conjuntos dominantes conectados (CDS). En cada CDS (de la Figura 12) participarán activamente solo 28 nodos, que serán los representantes de todos los nodos participantes.

Haciendo cálculos básicos para obtener la cantidad promedio de nodos por celdas (P_{nodos}), se calcula por (25).

$$P_{nodos} = \frac{Nodos}{Celdas} \quad (25)$$

$$P_{nodos} = \frac{372}{64} = 5.8 \text{ nodos} \quad (26)$$

Para comparar el tiempo de vida de la red, primero se presenta la siguiente definición: *El tiempo de vida de la red se define como el tiempo en que un cierto porcentaje de nodos muere, es decir, agotan su reserva de energía* (Xu et al., 2001).

En la literatura se ha definido el concepto del tiempo de vida útil de la red de distintas formas, como las presentadas por (Heinzelman et al., 2001; Singh et al., 1998) que definen el tiempo de vida de la red como el tiempo en el que el primer nodo muere.

Sin embargo, para este trabajo de investigación, el enfoque de (Xu et al., 2001) se adapta adecuadamente para evaluar el desempeño de la propuesta mediante la simulación, debido a que aplicando la ecuación (26) se obtiene que para 372 nodos repartidos en 64 celdas, el promedio de nodos por celda es de aproximadamente 5 nodos; es decir, cabe la posibilidad de que un nodo muera en una celda virtual, y aún así, puede existir la presencia de otros nodos equivalentes que lo sustituyan.

Para determinar el umbral óptimo de energía que cumpla con la definición de tiempo de vida de la red presentada, se considera que en cualquier instante de tiempo en la simulación de alguno de los escenarios propuestos, se encontrará un CDS activo compuesto por 28 nodos activos en conjunto con un CH²⁰.

Por lo anterior, podemos inferir que con la presencia de un solo CDS se puede continuar con el reporte de eventos. Si en total se cuenta con 4 CDS básicos que proporcionan una ruta alterna disponible, con 28 nodos por cada CDS, se tienen 112 nodos que deben permanecer vivos para el reporte de eventos, lo que es equivalente a decir que de los 372 nodos, se necesita la existencia de por lo menos el 30% de los nodos; numéricamente el 30% de los nodos equivale a una energía residual (con valores normalizados) de **1260J** en la red para considerarse útil.

²⁰ El nodo CH se excluye del análisis del tiempo de vida de la red, al considerarse un nodo con capacidades superiores de procesamiento y sin restricciones de energía. Ver sección III.2.

Ahora, si se desea utilizar un enfoque más flexible que garantice una ruta activa conectada con probabilidad del 90% se puede utilizar como base el estudio realizado por (Blough y Santi, 2002); en lugar de utilizar el 30% de los nodos, el umbral se ve disminuido a aproximadamente el 25% de los nodos; numéricamente el 25% de los nodos equivale a una energía residual de **1050J** en la red (con valores normalizados).

V.3. Resultados Preliminares

Considerando la implementación de S-MAC original, las pruebas que se presentan a continuación se enfocaron en medir el consumo de energía de los nodos a lo largo de la simulación. Los diferentes escenarios que se consideran en esta sección incluyen: S-MAC con un ciclo de trabajo del 5%, 10%, 25% y 50%.

Los resultados para cada configuración se analizan en función del tiempo de vida de la red, por lo que se delimita el tiempo de vida de la red para un umbral del 30% de nodos útiles (**1260J**) y el 25% de nodos útiles (**1050J**).

V.3.1. S-MAC original al 5%

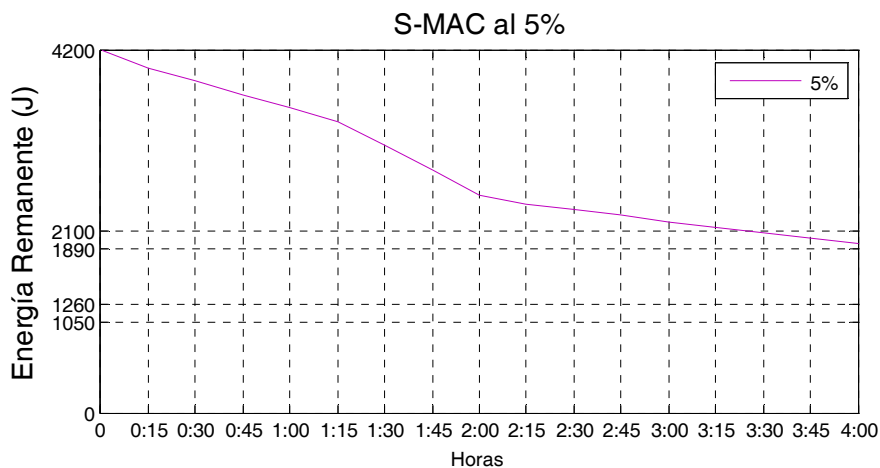


Figura 22. Consumo de Energía promedio para S-MAC al 5%.

La energía promedio al finalizar la simulación fue de **1955.1385 J** (entre los valores de 1890J y 2100J de la Figura 22), con esto se observa que se consume solo un poco más de la mitad de la energía total. El consumo de energía en promedio en la red en intervalos de 15 minutos se muestra en la tabla XVII.

Tabla XVII. Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 5%.

0:15	0:30	0:45	1 hora	1:15	1:30	1:45	2 horas
3990.59	3833.18	3677.15	3521.73	3369.32	3087.18	2798.25	2510.35
2:15	2:30	2:45	3 horas	3:15	3:30	3:45	4 horas
2405.59	2340.14	2276.670	2212.90	2146.57	2082.65	2018.74	1955.13

Además el **47.44%** de los nodos (176 nodos) consumieron en promedio **1272 J** que equivale aproximadamente al 30% de su energía total; pero un **28%** de los nodos (107 nodos) casi agotan su energía total consumiendo (4025J) un **96.33%** de su energía, (ver la Figura 23).

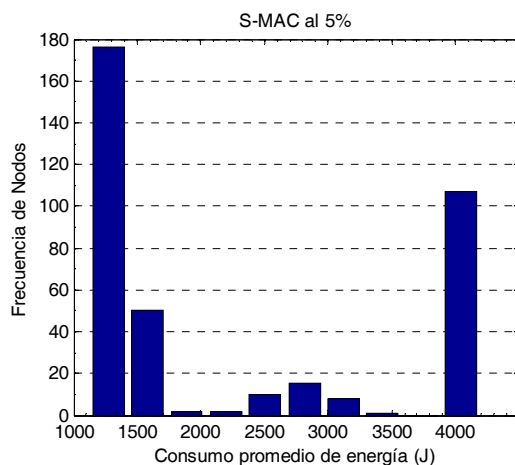


Figura 23. Histograma de consumo S-MAC al 5%.

V.3.2. S-MAC original al 10%

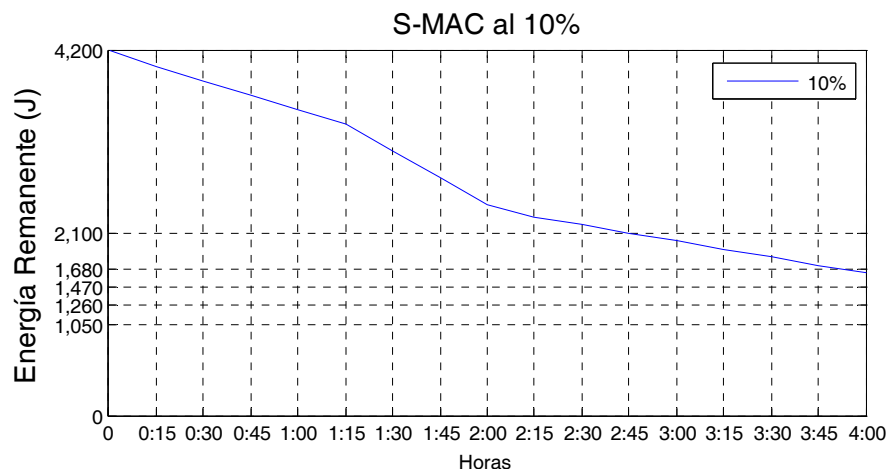


Figura 24. Consumo de energía promedio para S-MAC original al 10%.

En la Figura 24, se ilustra que para S-MAC con un ciclo de trabajo del 10% al final de la simulación se obtienen **1635.30J** de energía residual (entre los valores de 1470J y 1680J). Estos valores de energía residual, aún se encuentran por encima del umbral definido para el tiempo de vida de la red, y el consumo cada 15 minutos de la energía se observa en la Tabla XVIII.

Tabla XVIII. Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 10%.

0:15	0:30	0:45	1 hora	1:15	1:30	1:45	2 horas
4005.61	3837.71	3671.72	3508.48	3345.62	3046.55	2734.94	2417.05
2:15	2:30	2:45	3 horas	3:15	3:30	3:45	4 horas
2278.77	2187.14	2094.77	2003.21	1910.78	1819.27	1726.77	1635.30

En el histograma de consumo para el caso del 10% de ciclo de trabajo (Figura 25), el **43.36%** de los nodos (161 nodos) hicieron el menor consumo de energía que fue de **1697 J**; el **29.43%** de los nodos (109 nodos) consumieron (4068J) el **96.86%** de su energía.

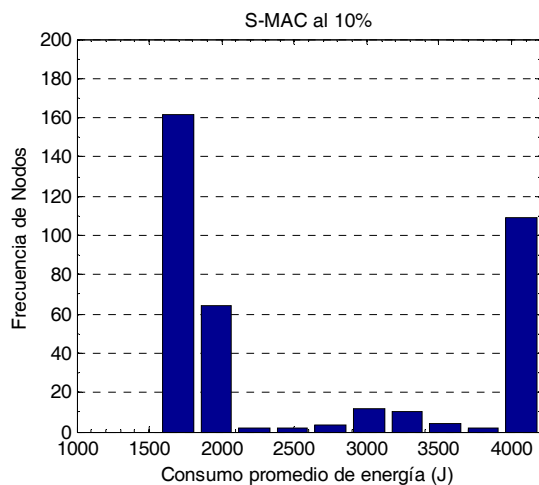


Figura 25. Histograma de consumo S-MAC al 10%

V.3.3. S-MAC original al 25%

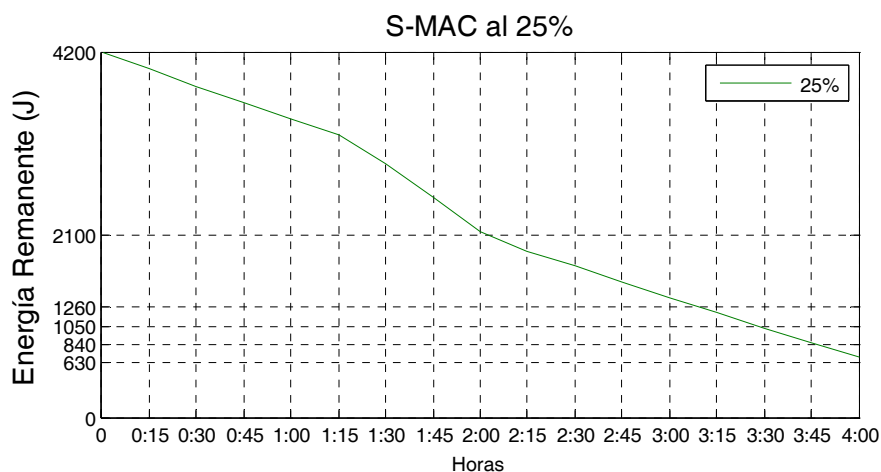


Figura 26. Consumo promedio de energía para S-MAC original al 25%.

El consumo de energía promedio total al finalizar las simulaciones sobrepasa el umbral definido para el tiempo de vida de la red (1260J para un 30% de nodos útiles y 1050J para un 25%). Como se observa en la Tabla XIX, la energía residual final fue de 679.88 Joules ubicado entre los valores de 840J y 630J de la Figura 26.

Tabla XIX. Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 25%.

0:15	0:30	0:45	1 hora	1:15	1:30	1:45	2 horas
3996.02	3803.83	3612.75	3424.00	3237.25	2906.50	2531.54	2131.89
2:15	2:30	2:45	3 horas	3:15	3:30	3:45	4 horas
1908.06	1729.93	1551.75	1373.37	1195.30	1017.72	844.78	679.8889

Para S-MAC original con un 25% de ciclo de trabajo, el **38.87%** de los nodos (144 nodos) consumieron **3040.43J** en promedio, y el **35.59%** de los nodos (132 nodos) consumieron (4138J) un **98.54%** de su energía total, ver Figura 27.

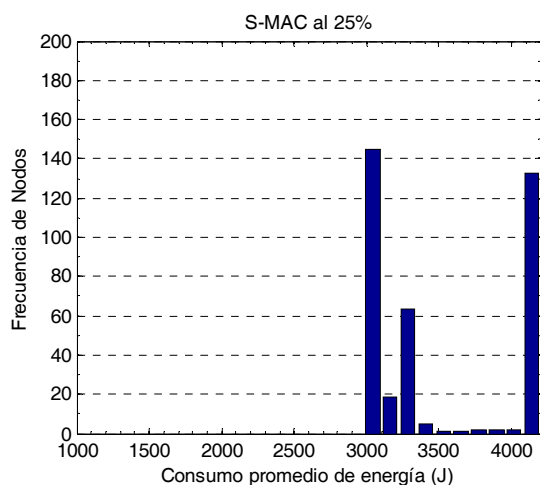


Figura 27. Histograma de consumo S-MAC al 25%.

V.3.4. S-MAC al 50%

En el caso de S-MAC original al 50%, el 100% de los nodos drenaron su batería antes de terminar la simulación. Como se observa en la Figura 28 y se reafirma en la Tabla XX, entre las 2:15 y 2:30 horas de simulación, el consumo promedio energía por parte de los

nodos ya era de más del 75% de la energía total, es decir, sobrepasó el umbral mínimo del 25% de nodos vivos que definen el tiempo de vida útil de la red.

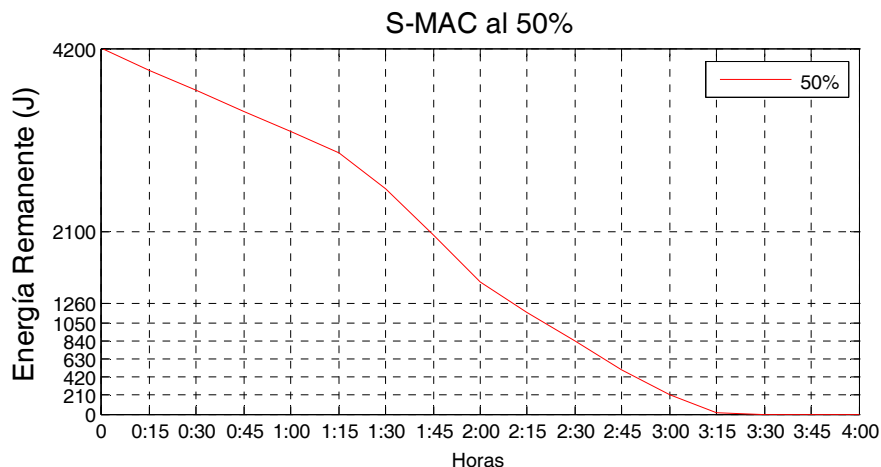


Figura 28. Consumo promedio de energía para S-MAC original al 50%.

Tabla XX. Valor de energía residual promedio por cada 15 minutos para S-MAC original al 50%.

0:15	0:30	0:45	1 hora	1:15	1:30	1:45	2 horas
3949.51	3709.19	3470.86	3233.75	2999.04	2592.91	2048.89	1517.41
2:15	2:30	2:45	3 horas	3:15	3:30	3:45	4 horas
1154.74	829.44	511.14	218.20	4.9387	0	0	0

Antes de finalizar las simulaciones, alrededor de 3:30 horas de simulación el promedio de los nodos en cuanto a energía residual ya era nula, por lo que para el caso de S-MAC original con un ciclo de trabajo del 50% no se necesita de un histograma que muestre el consumo de los nodos al término de la simulación.

En la Figura 29, se hace una comparación entre los distintos escenarios simulados para S-MAC básico con ciclos de trabajo de 5%, 10%, 25% y 50%.

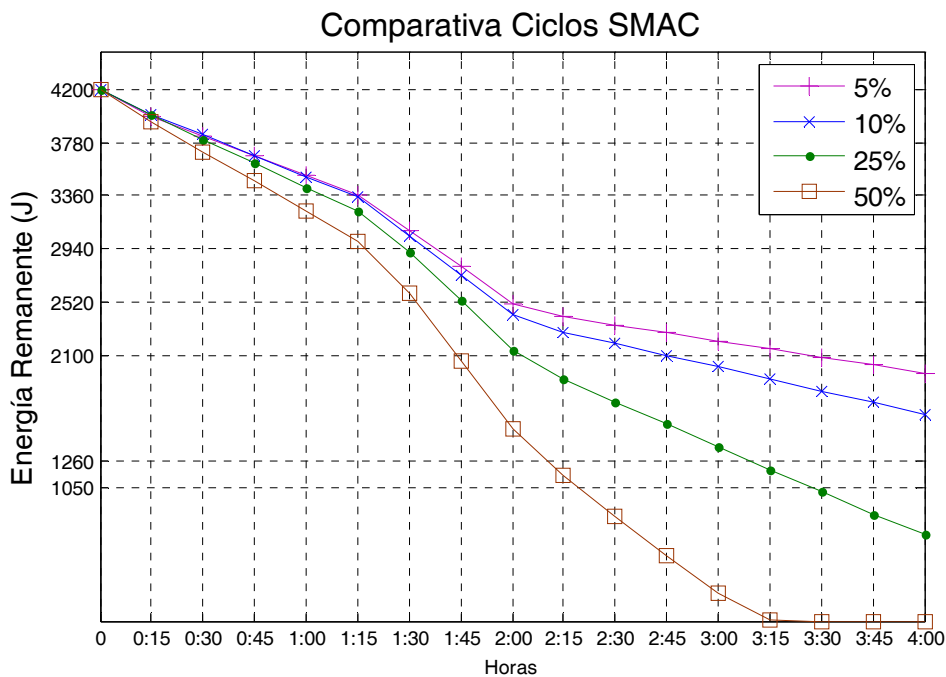


Figura 29. Comparativa para ciclos S-MAC. Los ciclos de 25% y 50% exceden el umbral mínimo del 25% de nodos activos útiles.

Como es de esperarse, a medida que aumenta el ciclo de trabajo aumentará también el consumo de energía (ver Figura 29), las simulaciones anteriores se realizaron con la finalidad de compararlas con el diseño propuesto.

En la siguiente sección se presentan los resultados del desempeño de la arquitectura de red que se propone considerando el impacto del cambio del conjunto dominante conectado. En este caso, además de hacer la distinción entre ciclos de trabajo, también se incluye la rotación de los distintos CDS.

V.4. Cambio de CDS con S-MAC modificado

Como se describió con anterioridad en la sección III.3.4, la rotación de los conjuntos dominantes conectados se hace en función de tramas virtuales formadas por tramas S-MAC

simples. La Tabla XXI define la duración en segundos para los conjuntos formados por 50, 100, 300 y 500 tramas S-MAC simples consecutivas para formar las distintas tramas lógicas en los distintos ciclos de trabajo de los escenarios de simulación.

Tabla XXI. Duración de tramas virtuales S-MAC.

Ciclo de Trabajo	Duración de Trama S-MAC por factor “N”				
	1	50	100	300	500
5%	3.205 s	2 min 40.25 s	5 min 20.5s	16 min 1.5 s	26 min 42.5 s
10%	1.603 s	1 min 20.15 s	2 min 40.3 s	8 min 0.9 s	13 min 21.5 s
25%	0.6418 s	32.09 s	1 min 4.18 s	3 min 12.54 s	5min 20.9 s
50%	0.3214 s	16.07 s	32.14 s	1 min 36.42 s	2 min 40.7 s

En S-MAC básico se supone que los 372 nodos pueden ser elegidos para permanecer activos a lo largo de la simulación (mostrados de la sección anterior), obviamente obedeciendo su calendario en cada trama S-MAC. En otras palabras, aún utilizando el modo 2 de S-MAC con encendido y apagado periódico, todos los nodos participan activamente de forma paralela durante las 4 horas de simulación.

Es importante resaltar que a diferencia de S-MAC básico, la opción de implementar rotaciones de CDS a través de tramas virtuales S-MAC, permitirá que solo 28 de los 372 nodos (aproximadamente el 7.5% de nodos) utilicen el modo 2 de S-MAC por periodos de tiempo menores a las 4 horas de simulación. Además de manera eficiente se eligen los nodos con mayor energía residual para integrar cada CDS, mientras que S-MAC no hace ninguna consideración de energía para programar el calendario de los nodos. Con esto se espera que el consumo de energía sea considerablemente menor al de S-MAC original.

V.4.1. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 5%

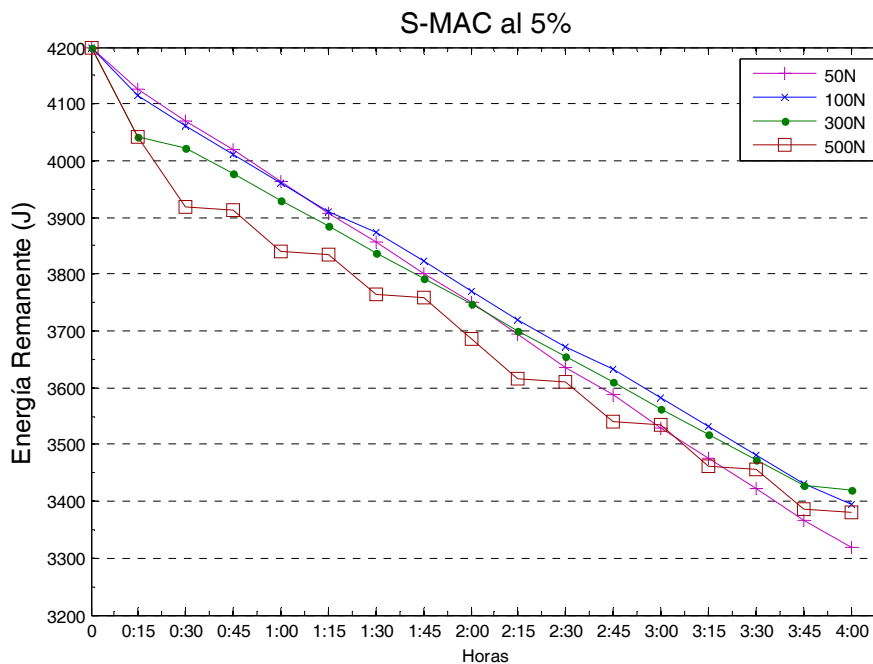


Figura 30. Consumo de energía de S-MAC al 5% con rotación de CDS.

La energía residual promedio al final de las simulaciones fue de **3420J**, **3396J**, **3380J** y **3318J** para 300N, 100N, 500N y 50N respectivamente. Se observa claramente en la Figura 30 como se realiza el consumo energético, el caso más claro de desgaste es el de 500N dado que los nodos representantes permanecen activos por más de 26 minutos (ver Tabla XXI), a medida que avanza el tiempo, se va compensando la energía con el resto de los nodos. Esta misma situación se observa en el caso de 300N donde el primer CDS está activo por más de 16 minutos.

En el caso de la Figura 30 se puede decir que para conjuntos de tramas virtuales pequeñas (50N y 100N) el consumo de energía es mayor que en los otros casos y que decrece de manera constante a lo largo de toda la simulación. Para tramas virtuales de mayor duración

(300N y 500N) el consumo tiene una pendiente menos pronunciada que el caso anterior y por lo tanto el consumo también es menor. Para el caso de S-MAC modificado con un ciclo de trabajo de 5% el conjunto virtual de 300 tramas es la opción que proporciona el mayor nivel de energía residual en la red.

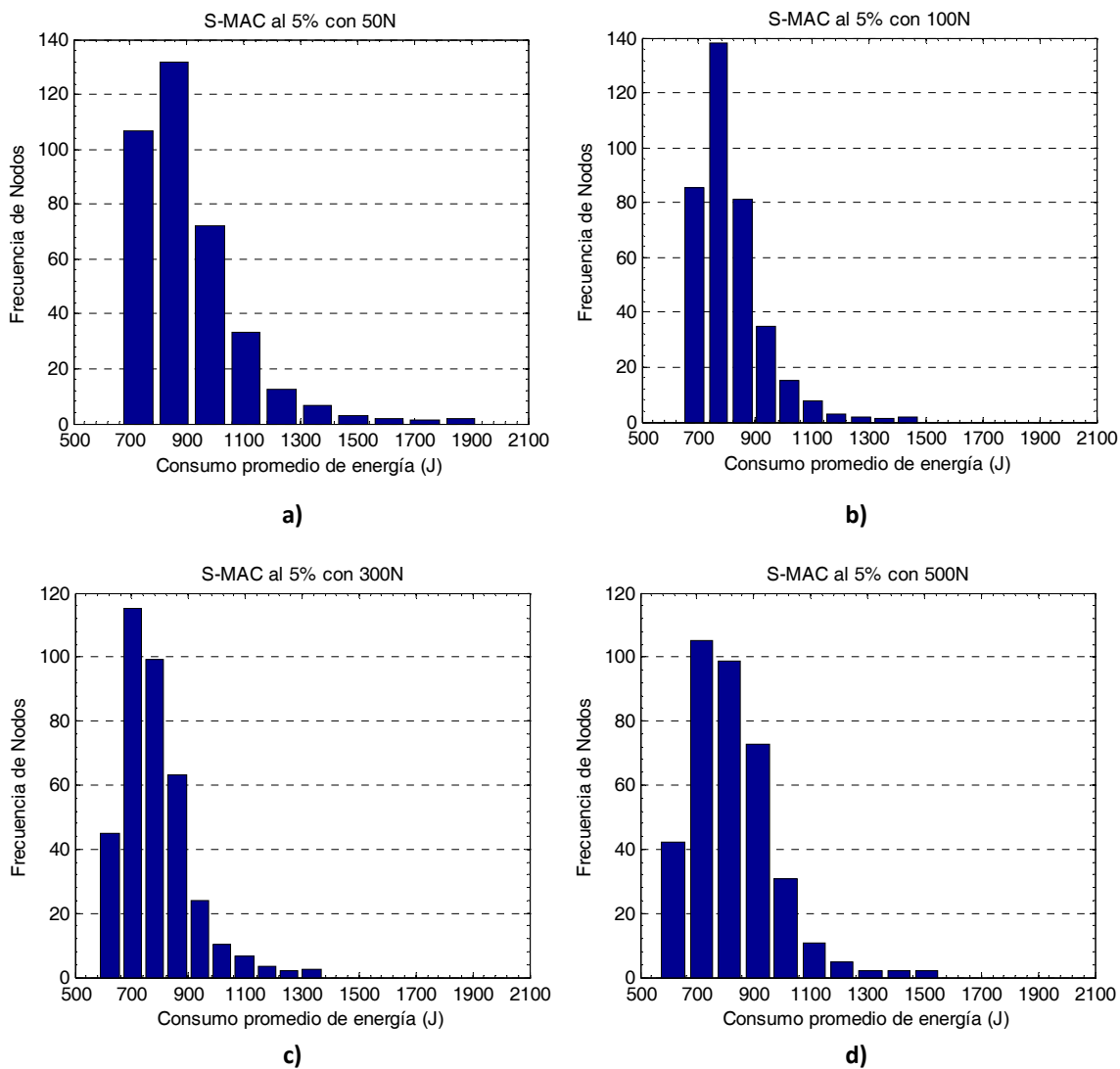


Figura 31. Histograma de consumo para S-MAC al 5% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.

Parecería que el consumo mayormente homogéneo fue el de 100N (Figura 31 b) al tener 138 nodos, sin embargo, el pico se sitúa en aproximadamente 770J de consumo de energía, a diferencia de la trama virtual de 300N donde el pico con 115 nodos se sitúa en 702 Joules. Esto reafirma que en el escenario de S-MAC modificado con un ciclo de trabajo del 5%, la opción de 300N presenta mejor desempeño.

Además algunos nodos de la (Figura 31 b) pueden llegar a consumir hasta 1400J, y en el caso de S-MAC modificado con un ciclo de trabajo del 5% con 50N (Figura 31 a) algunos nodos pueden consumir hasta 1900J, esto puede suceder al tener celdas virtuales con un número menor a los 5 nodos y pueden ser constantes representantes del CDS.

V.4.2. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 10%

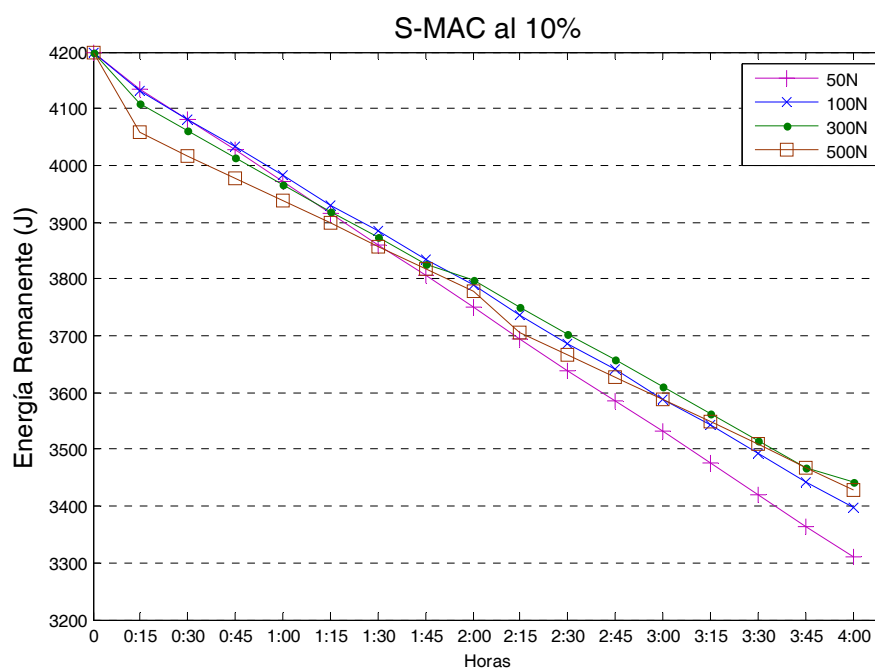


Figura 32. Consumo de energía de S-MAC al 10% con rotación de CDS.

La energía residual al final de la simulación fue de **3441J**, **3429J**, **3396J** y **3311J** para 300N, 500N, 100N y 50N respectivamente (ver Figura 32). Se observa un desempeño parecido a la de la sección anterior (para S-MAC modificado con un ciclo de trabajo de 5%) donde para los conjuntos de tramas virtuales mayores (300N y 500N) se obtiene un menor consumo de energía al término de la simulación.

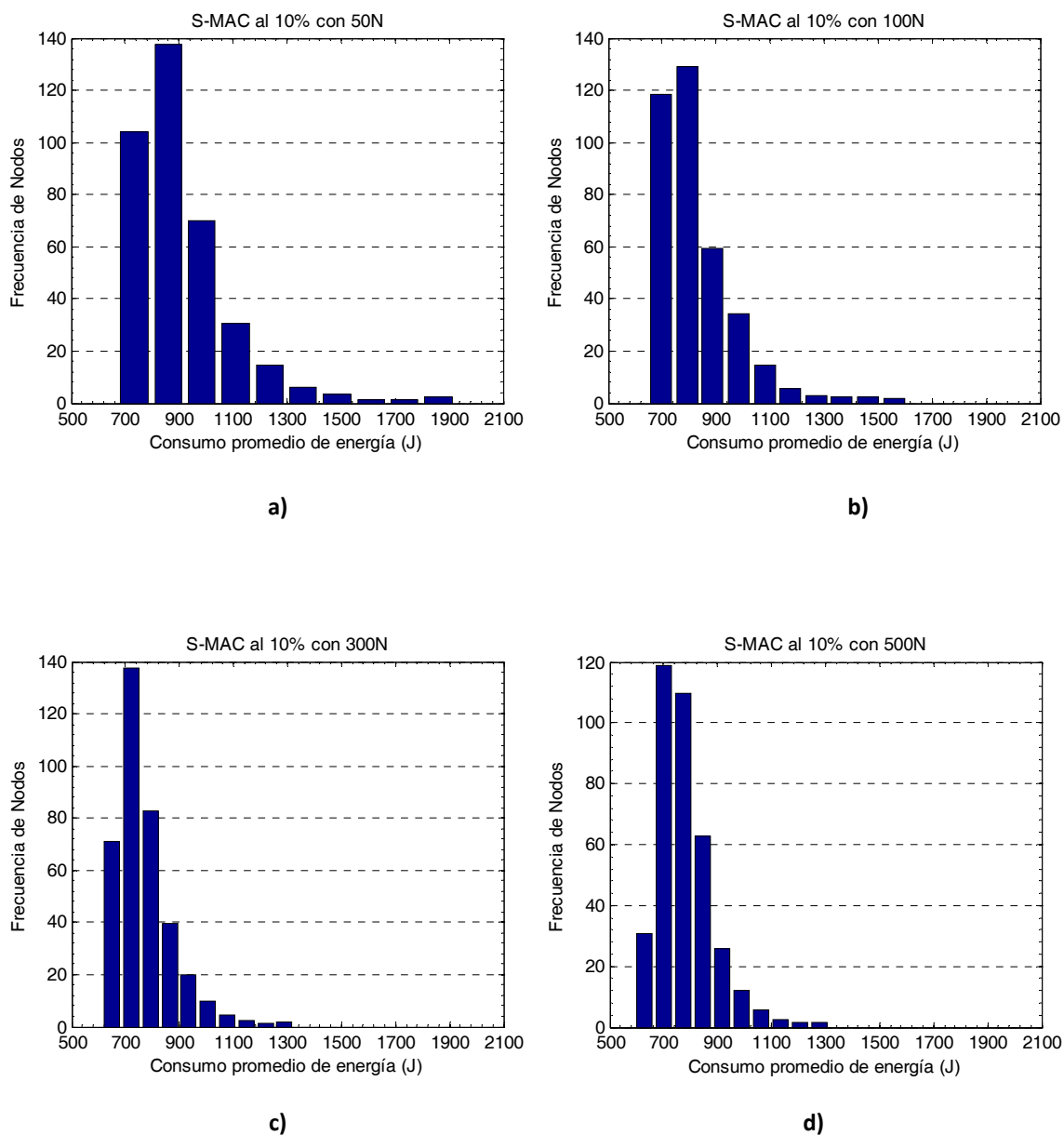


Figura 33. Histograma de consumo para S-MAC al 10% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.

De nuevo se presenta la situación de que algunos nodos consuman mayor energía en conjuntos de tramas virtuales menores como el compuesto por 50N (Figura 33 a) el pico se encuentra en 137 nodos con 859 Joules. Por otra parte, la configuración de 300N que es la que presentó mejor desempeño en 10%, en la Figura 33c se observa que 137 nodos consumen alrededor de 721 Joules cada uno, lo que representan un consumo mayormente homogéneo y con menor consumo por nodo.

V.4.3. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 25%

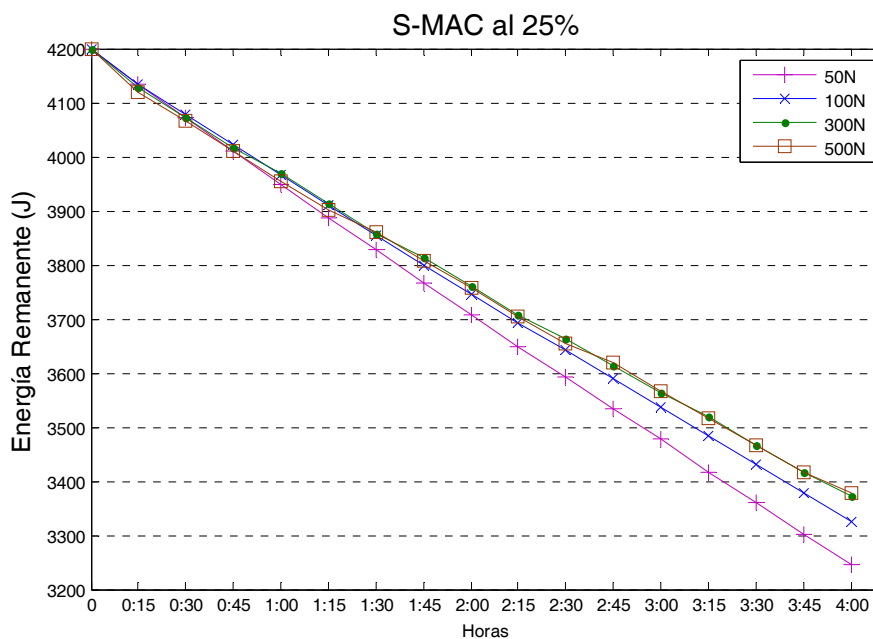


Figura 34. Consumo de energía de S-MAC al 25% con rotación de CDS.

La energía residual al final de la simulación para el escenario de S-MAC modificado con 25% de ciclo de trabajo (ver Figura 34) fue de **3378J**, **3373J**, **3326J** y **3244J** para 500N, 300N, 100N y 50N respectivamente.

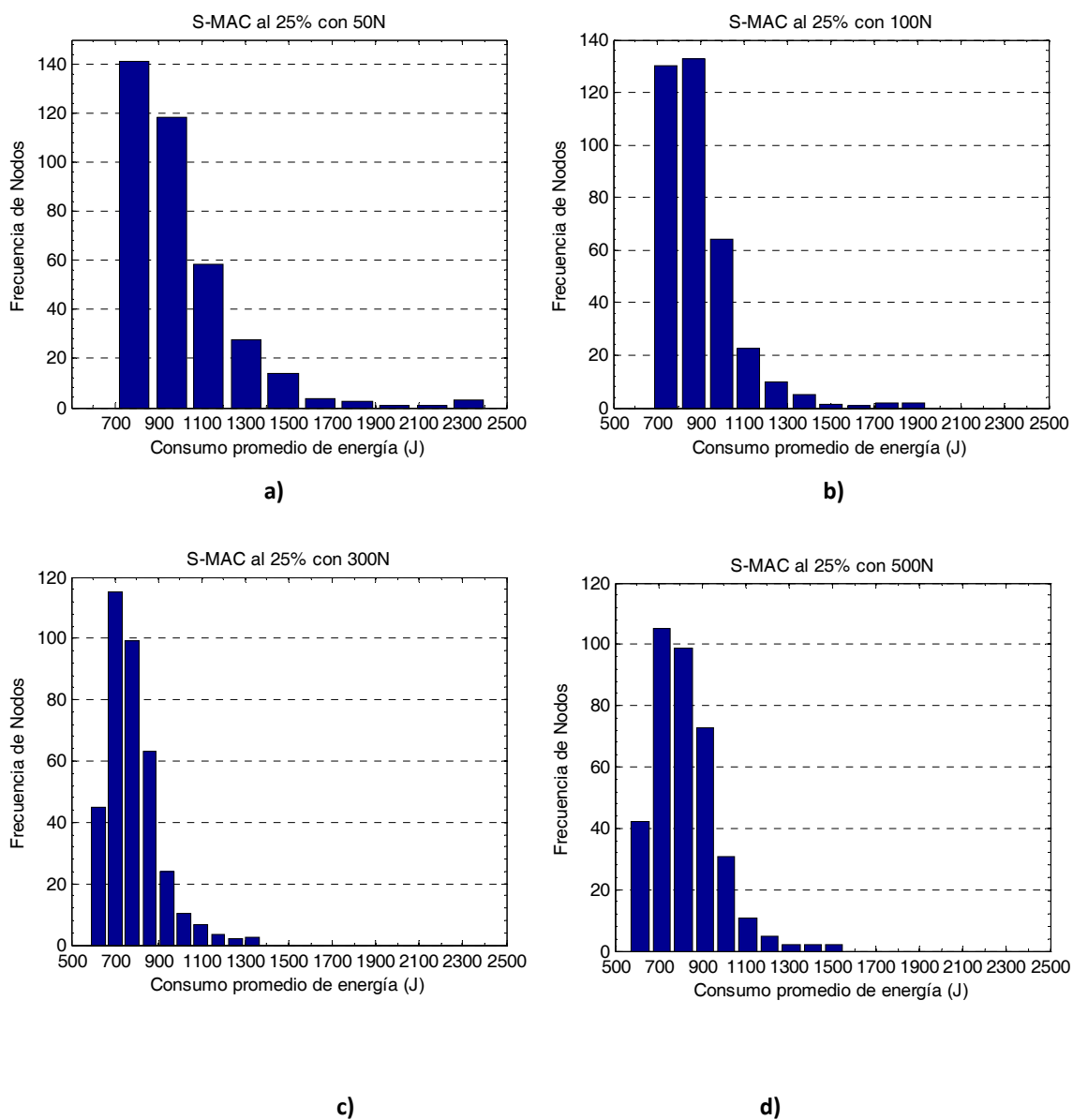


Figura 35. Histograma de consumo para S-MAC al 25% con a) 50N, b) 100N, c) 300N y d) 500N.

Aunque el consumo es más homogéneo para 50N y 100N, en el caso de S-MAC modificado con un ciclo de trabajo de 25%, las rotaciones de 300N y 500N presentan menor consumo de energía al finalizar la simulación.

V.4.4. S-MAC modificado con ciclo de trabajo de 50%

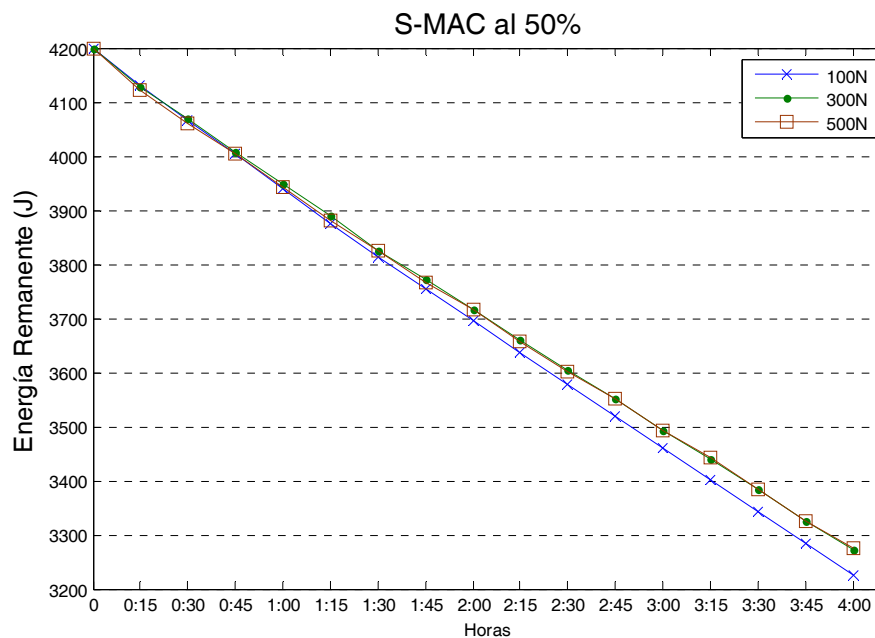


Figura 36. Consumo de energía de S-MAC al 50% con rotación de CDS.

La energía promedio residual al final de la simulación fue de **3275J**, **3271J**, y **3226J** para 500N, 300N y 100N respectivamente (ver Figura 36).

En la Figura 37, nuevamente se da el caso que para tramas virtuales mayores se obtiene un menor consumo de energía; para S-MAC modificado con un ciclo de trabajo de 50% se obtiene un consumo de energía mayormente homogéneo por los nodos, aunque no el mejor de todas las simulaciones. Como era de esperarse un ciclo de trabajo de 50% consume mayor energía que los ciclos de trabajo anteriores.

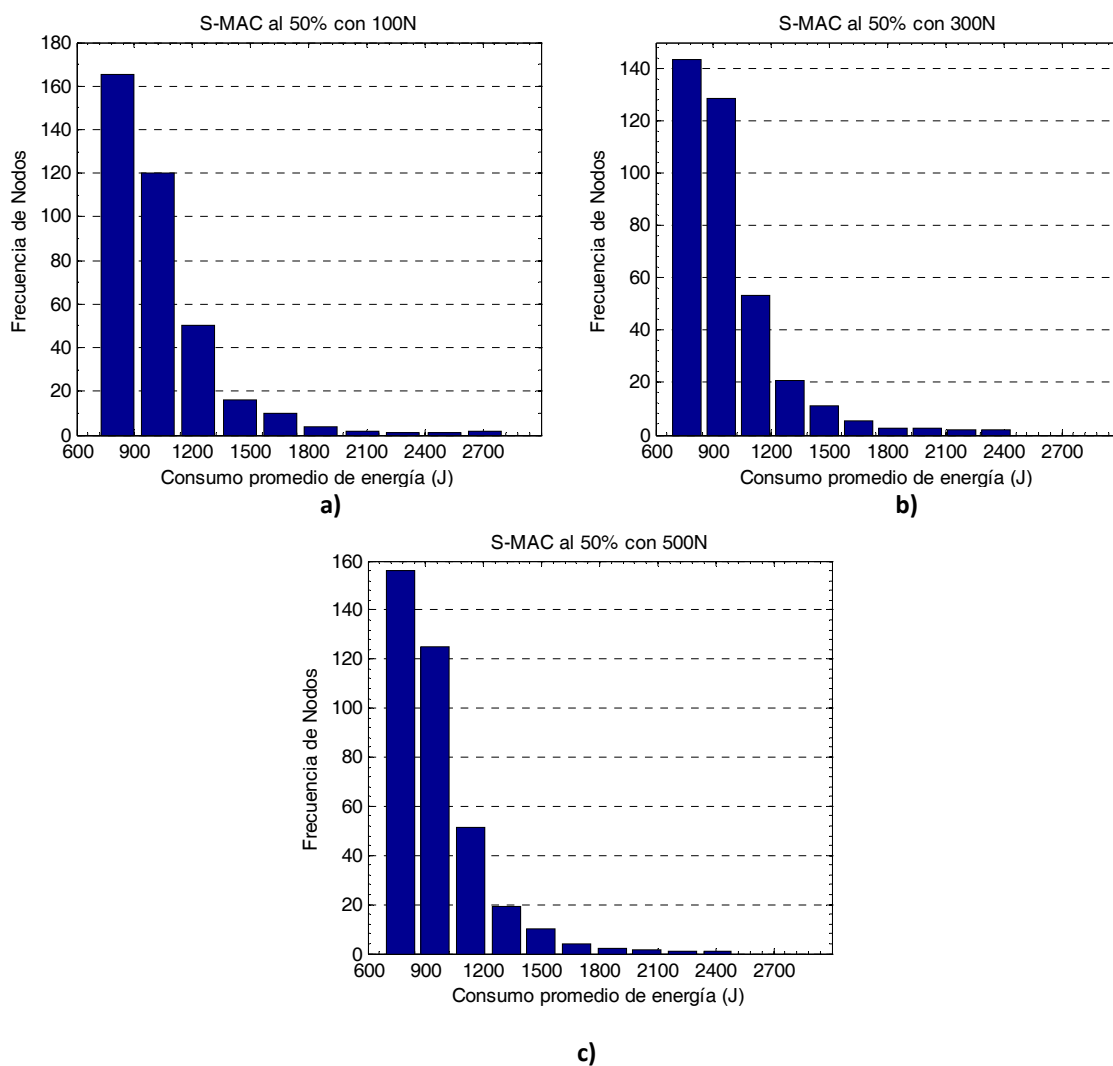


Figura 37. Histograma de consumo para S-MAC al 50% con a) 100N, b) 300N y c) 500N.

V.5. Análisis de Resultados

Para realizar el análisis de resultados, se han elegido los escenarios de simulación que presentaron un consumo de energía menor al finalizar la simulación. Para éste análisis se hace la comparación entre los resultados de las simulaciones realizadas para los distintos ciclos de trabajo de S-MAC modificado (sección V.4) con la versión original de S-MAC (sección V.3).

En la Tabla XXII se calcula un porcentaje de ahorro de energía para S-MAC modificado, resultado de la diferencia que existe entre el porcentaje de consumo entre S-MAC original y S-MAC modificado al finalizar las simulaciones, donde 4200J representa el 100% de energía.

Tabla XXII. Comparación de porcentaje de consumo de energía entre S-MAC original y S-MAC modificado.

Energía Residual al finalizar la simulación			
<i>Ciclo de Trabajo S-MAC</i>	<i>S-MAC original</i>	<i>S-MAC modificado</i>	<i>Porcentaje de Ahorro de energía con S-MAC modificado</i>
5%	1955.13J	3420J con 300N	34.87%
10%	1635.30J	3441J con 300N	42.98%
25%	679.88J	3378J con 500N	64.23%
50%	0J	3275J con 500N	77.97%

Como se observa en la tabla anterior, el mejor ahorro de energía para S-MAC modificado se realizó con el ciclo de trabajo de 50% con 500N ahorrando hasta un 77.97% de energía comparado con S-MAC original. Esto demuestra que la elección de nodos representantes, junto con la rotación de CDS proporcionan un consumo de energía eficiente lo que incrementará el tiempo de vida útil de la red.

El ahorro en el consumo de energía aumenta conforme se elige un ciclo de trabajo mayor, sin embargo, en el caso del monitoreo de bosques no es necesario un ciclo de trabajo tan grande (como se mencionó en la sección V.1.3), por lo que nos enfocaremos en los ciclos de trabajo pequeños que consuman la menor cantidad de energía, solo para S-MAC modificado.

V.5.1. Ciclos de trabajo distintos con igual duración

En general, el ciclo de trabajo de 10% con el conjunto de 300 tramas virtuales fue la que arrojó mejores resultados para los distintos ciclos de trabajo de S-MAC modificado. En este punto consideremos una N mayor para observar el desempeño de los nodos, por lo que se presentan 2 configuraciones más para el ciclo de 10% con 600N y 1000N.

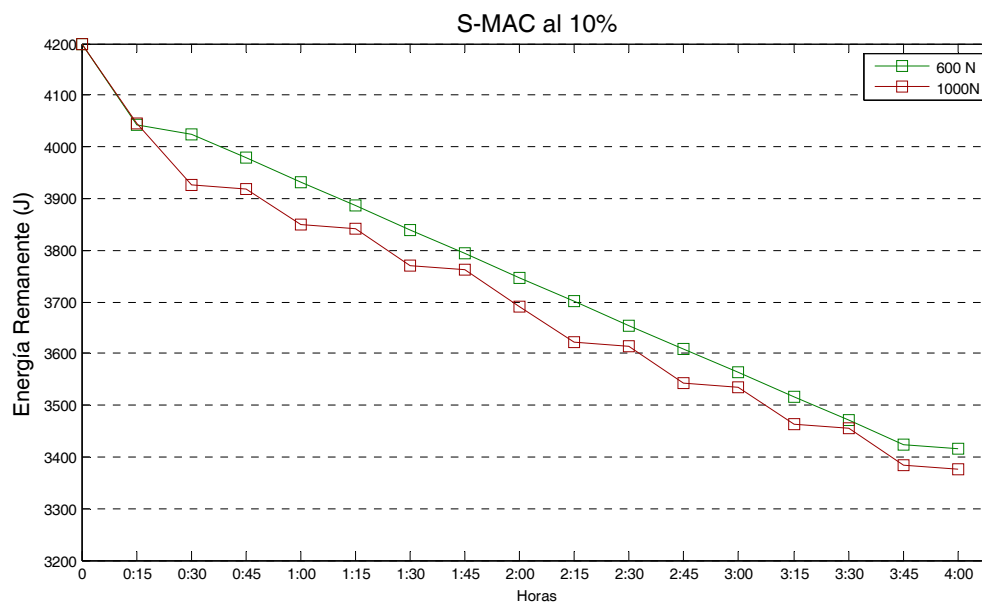


Figura 38. Consumo de energía de S-MAC al 10% con rotación de CDS de 600N y 1000N.

La energía residual promedio al final de las simulaciones fue de **3417J** y **3376J** para 600N y 1000N respectivamente. Estas dos nuevas configuraciones son casi idénticas a las realizadas con S-MAC modificado con 5% de ciclo de trabajo con 300N y 500N (ver Figura 31), en principio se debe a que la duración de las tramas virtuales empleadas para cada ciclo de trabajo S-MAC modificado es muy parecido (ver Tabla XXI). En cuestiones de energía, para el 5% de ciclo de trabajo se obtuvo 3420J y 3380J de energía residual con 300N y 500N, como se observa en la Figura 38 es mínima la diferencia de energía comparada con el ciclo de trabajo del 5%.

La pregunta ahora es, ¿Qué sucede con el consumo de energía de los nodos, para tramas con igual duración?

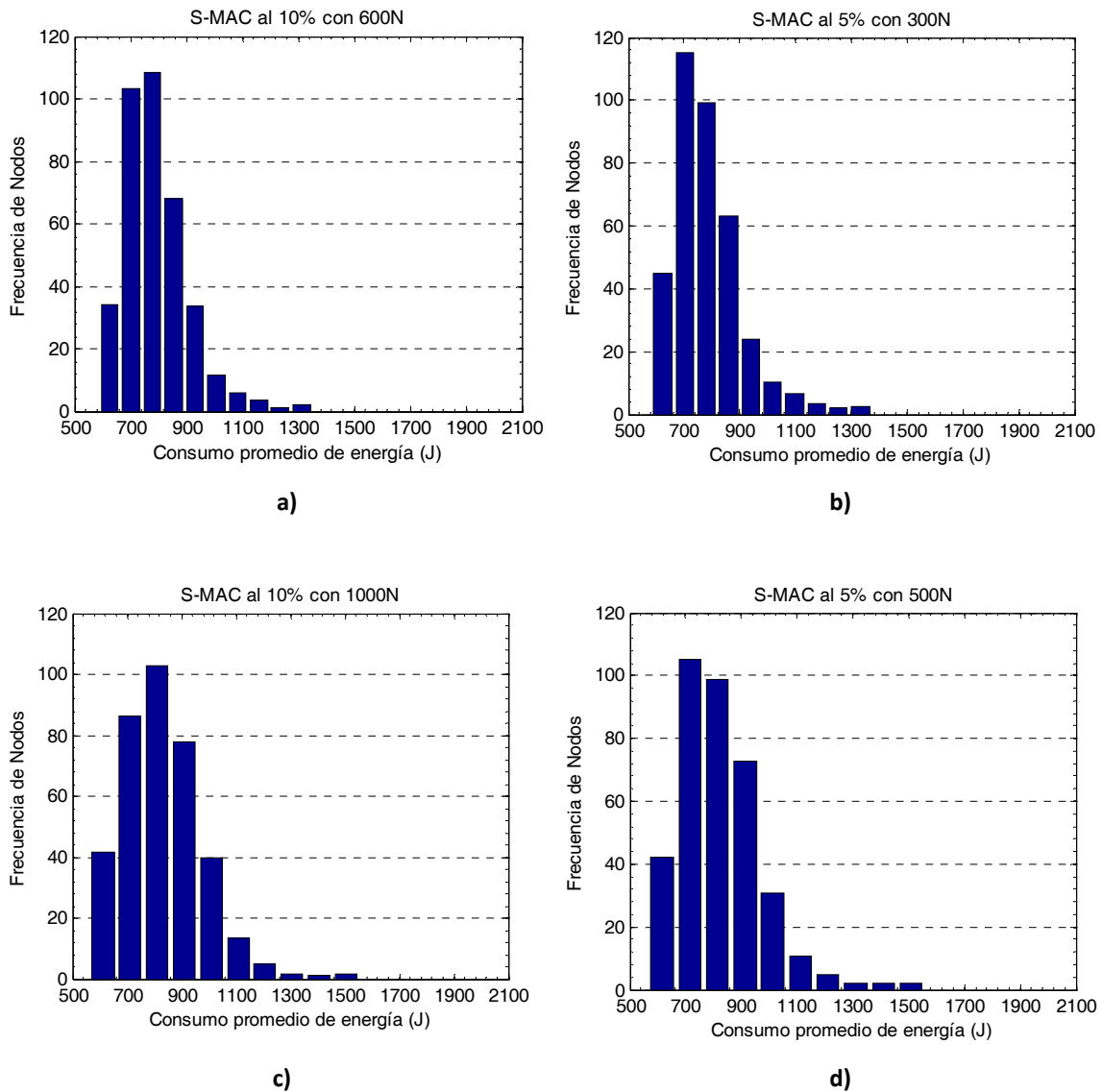


Figura 39. Histograma de consumo para S-MAC al a) 10% con 600N, b) 5% con 300N, c) 10% con 1000N y d) 5% con 500N.

A grandes rasgos, el consumo de energía de las dos nuevas configuraciones (600N y 1000 para el 10%) son muy parecidas a las del 5% (300N y 500N), la diferencia es que el consumo mayormente homogéneo con un corrimiento de 100 Joules más por la cantidad de

nodos. Esta diferencia se debe al tiempo que duermen los nodos, para todas las configuraciones el tiempo que permanecen activos es el mismo (ver Figura 39). Veamos estas dos comparaciones en tiempo en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. Comparación en tiempo de rotación de CDS para 5% (300N y 500N) y 10% con (600N y 1000N).

	5% con 300N	10 % con 600 N
<i>Duración de CDS</i>	961.5000s	961.8000s
<i>Tiempo de Escucha</i>	48.0600s	96.1200s
<i>Tiempo Dormido</i>	913.4400s	865.6800s
	5 % con 500 N	10% con 1000N
<i>Duración de CDS</i>	1602.5s	1603s
<i>Tiempo de Escucha</i>	80.1000s	160.2000s
<i>Tiempo Dormido</i>	1522.4s	1442.8s

Como se puede observar en la Tabla XXIII, la duración de las tramas virtuales es casi idéntica para cuando se utiliza una configuración de S-MAC modificado al doble, por ejemplo en lugar de utilizar un ciclo de trabajo de 5% con 300N se utiliza el doble, un ciclo de trabajo del 10% con 600N. Por lo tanto, el tiempo que durará la rotación de cada CDS es el mismo para ambos ciclos de trabajo.

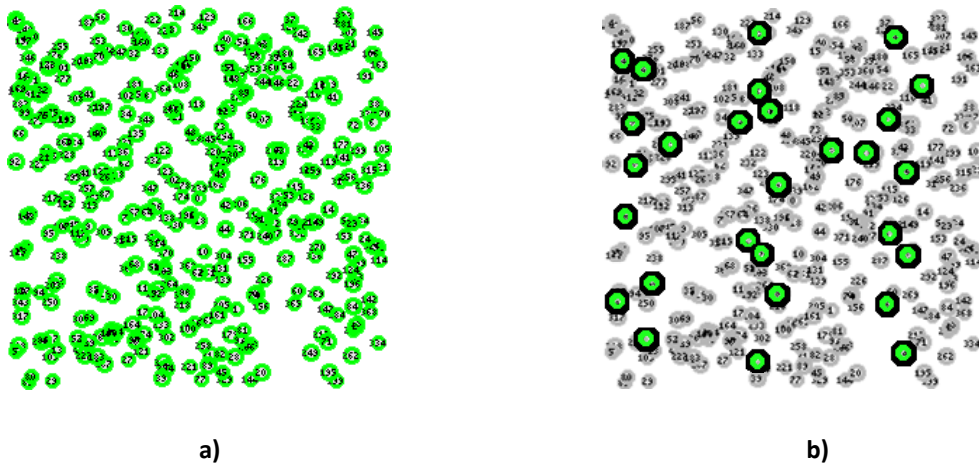


Figura 40. a) Despliegue aleatorio uniforme de 372 nodos. b) Selección de nodos representantes en CDS 1.

Para un escenario como el de la Figura 40a con 372 nodos desplegados de una forma aleatoria uniforme, en el primer CDS (Figura 40b), los nodos con el 5% con 300N cada representante esta activo por 48.06 segundos, mientras que con 10% con 600N cada nodo representante del CDS estará activo por 96.12 segundos. Lo mismo para el 2do, 3er y 4to CDS. La diferencia es que en la siguiente ronda, cuando de nuevo sea la oportunidad del CDS 1, ahora serán otros los nodos representantes, elegidos por su nivel de energía.

La potencia en el estado activo que se consume al utilizar S-MAC modificado con un ciclo de trabajo del 10% es el doble (al encender y apagar el doble de veces) de la necesaria para el caso del ciclo de trabajo del 5%, no obstante, el consumo total de energía en cada rotación de CDS no es el doble para el ciclo de trabajo del 10% en comparación con el ciclo de trabajo del 5%.

La potencia utilizada en el estado dormido es pequeña (0.042J), por lo que la diferencia en la potencia necesaria en estado dormido para las configuraciones de ciclos y rotación de CDS al doble es pequeña también. Lo que finalmente indica que en lugar de consumir el doble, necesita un 33% más de energía en cada CDS según lo arrojado por las simulaciones. Ese porcentaje de consumo es solo para aproximadamente los 28 nodos representantes (7.5% del total de nodos), por lo que no se refleja claramente en el consumo medio total de todos los nodos.

Esto es lo que se aprecia en los histogramas para el ciclo de trabajo de 5% con 300N el pico se sitúa en 702.59J con 115 nodos y en el caso del ciclo de 10% con 600N, el pico está en 778.45J con 108 nodos. Haciendo los cálculos en el pico de los histogramas, para 5% con 300N se consumen 80.79kJ y para 10% con 600N, son 84.07 kJ, lo que representa una diferencia de 3274.75 Joules en total de consumo. Para los valores normalizados de la Figura 30 (Referente al ciclo de trabajo de 5% con 300N) y la Figura 38 (para el ciclo de trabajo de 10% con 600N), esta diferencia representa un **0.20%** del total por lo que es casi imperceptible en la energía residual.

El 0.2% será entonces el porcentaje de consumo de energía que se va acumulando cada 4 horas de simulación. La ventaja principal es que con el doble del ciclo de trabajo y el doble de tramas virtuales, también se está alerta el doble de tiempo y la diferencia en el consumo de energía para este caso es mínima. De igual manera se observa para el 5% con 500N y 10% con 1000N.

V.5.2. S-MAC al 20% con 600N

Observemos ahora que sucede en la mejor configuración, que es la de S-MAC modificado con un ciclo de trabajo de 10% con 300N, en este caso, se realizó una nueva simulación pero ahora al con S-MAC modificado con 20% de ciclo de trabajo con 600N. La comparación entre ambas se observa en la Figura 41.

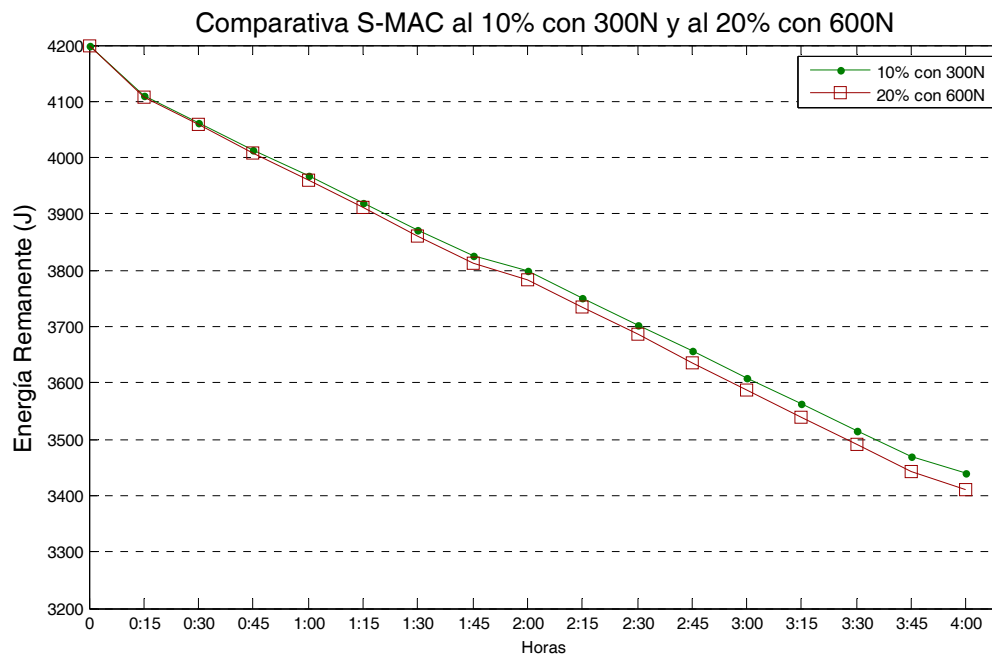


Figura 41. Consumo de energía de S-MAC al 10% con 300N y al 20% con 600N.

La energía residual promedio al final de la simulación fue de **3441J** y **3412J** para 10% con 300N y 20% con 600N respectivamente. En este caso la diferencia de consumo al finalizar la simulación ya no es tan parecida como con ciclos de trabajo menores.

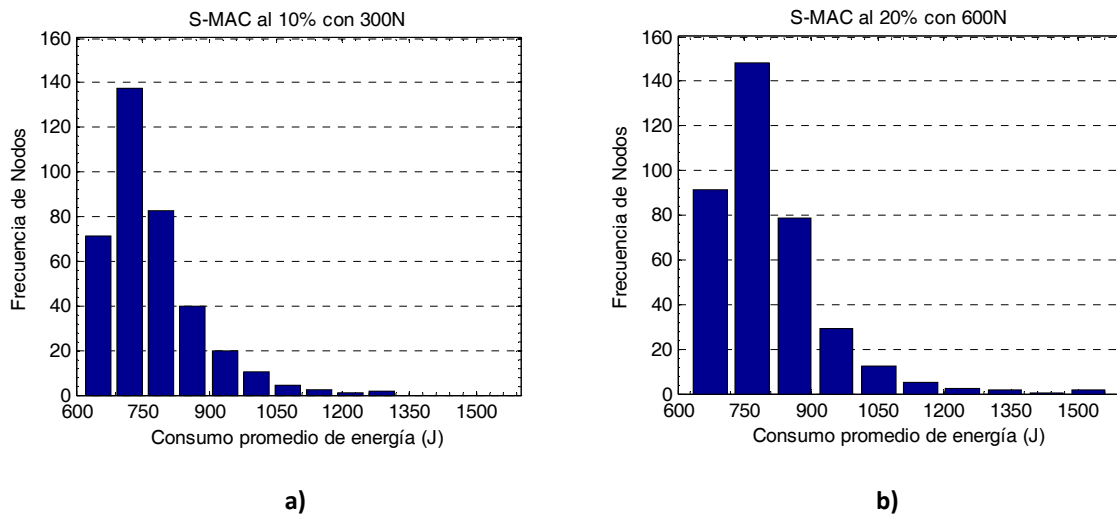


Figura 42. a) Histograma de consumo para 10% con 300N. b) Histograma de consumo para 20% con 600N.

Según los resultados obtenidos de las simulaciones en cada CDS se consume un 41% más de energía con S-MAC al 20% con 600N, de nuevo se recuerda que esto es solo para los 28 nodos representantes. El tiempo por cada ciclo de trabajo se presenta en la Tabla XXIV.

Tabla XXIV. Comparación en tiempo de rotación de CDS para 10% con 300N y 20% con 600N.

	10% con 300N	20 % con 600 N
<i>Duración de CDS</i>	480.9000s	481.2000s
<i>Tiempo de Escucha</i>	48.0600s	96.1200s
<i>Tiempo Dormido</i>	432.8400s	385.0800s

En la Figura 42, se observa que el consumo de energía promedio es parecido entre ambas, y para el caso del 20% con 600N es mayormente homogéneo contando con 148 nodos que consumen 768.57 Joules cada nodo; para el caso del 10% con 300 N son 137 nodos que

consumen 721.33 Joules en promedio. La diferencia entre ambas es de 14,925kJ lo que puede generar un **0.95%** de consumo extra por cada 4 horas de simulación.

V.6. Resumen de capítulo

Las simulaciones se realizaron con los parámetros de una interfaz de red (WaveLAN 915MHz) para PC, la cual requiere un mayor nivel de potencia que los motes comunes. Otro dato importante es que en los estudios realizados por (Pearlman, et al., 2002) se requiere de dos baterías AAA nuevas, equivalente a 8400J, en este caso se utilizó la mitad de la capacidad (4200J) para observar el comportamiento de consumo de energía principalmente por S-MAC original.

Se propusieron distintos escenarios de simulación para S-MAC, la diferencia entre ellos principalmente es el porcentaje de ciclos de trabajo. Se optó por no realizar pruebas mayores del 50% de ciclo de trabajo, considerando que eventos causantes de daños en los bosques son eventos esporádicos donde no es necesario que el subsistema de radio este activo todo el tiempo tal como menciona (Wei et al. 2002). Además el ciclo de trabajo de 50% para S-MAC original agotó la energía almacenada de todos los nodos, por lo que esta opción no es óptima para una implementación en un ambiente de monitoreo en bosques, en el caso del ciclo de trabajo de 25% de S-MAC original se sobrepasó el nivel mínimo de energía requerida para cumplir con las especificaciones del tiempo de vida útil de la red.

El desempeño de la propuesta para el subsistema eficiente en energía arrojó buenos resultados al repartir el gasto energético entre los nodos de las celdas virtuales, al ser una red redundante el consumo se realiza de forma homogénea dependiendo al porcentaje de los ciclos de trabajo de S-MAC y a la rotación de los conjuntos dominantes conectados. En todos los casos experimentales, no se percibe un nivel de energía residual como los observados en S-MAC original, es decir, el consumo promedio de energía solo sobrepasa

algunos Joules por debajo de la *mitad* de la energía total, y en ningún caso hubo muerte de nodos.

En los histogramas se llegaron a observar algunos nodos que podían llegar a tener un nivel muy bajo de energía al final de la simulación, esto sucede solo con los nodos que de cierta manera permanecieron aislados en su celda virtual, y eran los encargados de ser el representante de esa celda por cada CDS al que pertenecieran.

A grandes rasgos, se demostró que el consumo de energía para ciclos de trabajo al doble y con el doble de tramas virtuales, no significa que el consumo total al finalizar la simulación sea del doble de energía, por ejemplo, para ciclos de trabajo pequeños como 5% y 10% llegó a ser muy similar. Obviamente a medida que se incrementa el ciclo de trabajo de S-MAC, desde 20% en adelante, esta diferencia será más pronunciada porque el tiempo en que los nodos representantes duermen es menor, por lo tanto consumen mayor energía.

Para este proyecto se puede considerar adecuado un ciclo de trabajo de 10% con 300N, un ciclo de trabajo de 10% con 600N o incluso un ciclo de 20% con 600N. Se considera adecuado, dado que estos escenarios de simulación fueron los que presentaron un mejor consumo de energía, lo que hace posible extender el tiempo de vida de la red al repartir el gasto energético de manera homogénea entre todos los nodos, en un ambiente no controlado con largos periodos de inactividad. Para otro tipo de aplicaciones dependerá del tiempo que se desee que el nodo permanezca activo, por ejemplo, aplicaciones con requerimientos de calidad de servicio.

Capítulo VI

Conclusiones y Trabajo Futuro

VI.1. Conclusiones y Aportaciones

El objetivo de este trabajo de investigación se relaciona con la propuesta de un subsistema de comunicación eficiente en energía con aplicación en un escenario de monitoreo de bosques. Como parte de las actividades, se realizó un estudio exhaustivo de protocolos de comunicación con el propósito de identificar aquellos que se adecuen a los requerimientos del escenario bajo consideración. En este sentido, se analizaron algunos factores que se reportan en la literatura para la buena elección de un protocolo de subcapa de control de acceso al medio y capa de red, además de mostrar la topología y dispositivos que pueden ser utilizados para el monitoreo de bosques.

A partir del estudio de los protocolos de comunicación, se han identificado tres protocolos en los cuales el consumo eficiente de energía desempeña un papel importante en su diseño. Los protocolos S-MAC, GAF y PMP se utilizaron como base para integrar la propuesta que brinde solución al problema planteado en el capítulo I. La elección de dichos protocolos se hizo en favor del cumplimiento de los objetivos particulares (descritos en el capítulo I), en relación a éstos, se destacan los siguientes puntos:

- En el capítulo II se presenta una descripción de algunos protocolos para capa MAC que se consideraron relevantes; algunos de éstos han sido propuestos para redes inalámbricas de sensores exclusivamente, mientras que otros son de tipo genérico para redes inalámbricas. Se prestó un interés particular a los protocolos en los cuales se pudiera manipular el estado del nodo sensor para controlar el encendido y

apagado del subsistema de radio. En este sentido se eligió el protocolo S-MAC (Ye et al., 2002 y 2003) diseñado para WSN. El protocolo S-MAC tiene entre sus características que es de fácil adaptación y ha servido como base para el desarrollo de otros protocolos para redes inalámbricas de sensores. S-MAC propone periodos de actividad y periodos de hibernación en los cuales es posible que el nodo entre en un estado de bajo consumo (estado dormido) para lograr un consumo eficiente de energía.

- En el capítulo III se presentó una propuesta para la implementación de una topología para una red inalámbrica de sensores tomando como principal consideración el escenario de monitoreo de bosques. Una de las principales características de la topología sugerida es que presenta una estructura jerárquica donde el área a monitorear está dividida en grupos (o clusters) de nodos, bajo el control de un dispositivo de mayor capacidad conocido como cabeza de grupo (o Cluster Head). Para cada uno de los grupos se define un conjunto mínimo de nodos que garantizan conectividad con alta probabilidad (Santi y Blough, 2002) para el reporte de eventos. Para determinar la cantidad de nodos se utilizó como base la teoría de la ocupación (Anexo B) junto con el protocolo GAF (Xu et al. 2001) para la formación de celdas virtuales y así elegir nodos representantes de celda para repartir el gasto energético.
- En el capítulo III se realizaron las consideraciones necesarias para hacer una adaptación al protocolo administrador de energía para redes inalámbricas de sensores regulares (Liao et al. 2005) para funcionar con una red irregular donde los nodos no han sido desplegados en cierto orden. Este protocolo se incluyó como parte del diseño para proveer una ruta predeterminada con la posibilidad de alternar su trayectoria. Cada ruta se elige en base a CDS, que son conjuntos dominantes conectados de los nodos representantes, con lo que se logra el envío de información en cualquier instante de tiempo de la simulación. La rotación de los CDS se hace en periodos de tiempo formados por tramas virtuales S-MAC.

A través de la simulación fue posible comparar el diseño propuesto (resultado de la integración de los protocolos S-MAC, GAF, PMP junto con el análisis de conectividad de Santi y Blough, 2003) con el esquema básico de S-MAC, que se utilizó como protocolo de comunicación para simular un escenario para el monitoreo de bosques. El diseño propuesto mostró un ahorro de energía de 42.98% para la mejor configuración y de hasta 77.97% para ciclos de trabajo relativamente grandes como el de 50%.

Se resalta que la elección del ciclo de trabajo de S-MAC junto con el número de tramas virtuales para hacer la rotación de rutas, son dos elementos clave para lograr un consumo eficiente de energía. Por lo que este trabajo de investigación puede servir como base para otro tipo de aplicaciones. Al final del capítulo V se demostró que a partir de un ciclo de trabajo pequeño de S-MAC con rotación de CDS compuesto por N tramas virtuales, es posible aumentar al doble estas opciones (ciclo de trabajo y conjunto de tramas virtuales) para hacer rotaciones de CDS con la misma duración de tiempo, con lo que los nodos representantes del CDS podrán estar el doble de tiempo activos aumentando un consumo de energía menor del 1% para cada 4 horas de simulación como en el caso del ciclo de trabajo del 20% con $600N$ (sección V.5.2).

VI.2. Trabajo Futuro

El diseño propuesto se presentó para redes poco congestionadas, considerando solo el intercambio de mensajes de control y sincronización, por lo que para otro tipo de aplicaciones o para una implementación en bosques más realista, se recomienda hacer un estudio sobre fuentes de tráfico de datos e implementar alguna de ellas.

Se recomienda también, evaluar el desempeño del subsistema de comunicación propuesto para la implementación de topologías con más de un clúster. En este mismo punto, se recomienda ahondar en el tema de la integración de un nodo cabeza de grupo y de cómo

será posible la interacción y correlación de la información recopilada por los nodos sensores, para su envío posterior del reporte de eventos a la estación base.

Aunque se considera que el trabajo de investigación fue pensado para monitoreo en bosques, se recomienda ahondar en los dispositivos de mayor alcance de transmisión, en simulaciones o implementaciones físicas con parámetros reales como la altura y ganancia de la antena, radio de alcance, suministro energético y en modelos de propagación (como los propuestos en Tamir, 1977) que sean conscientes del ambiente de bosque y las atenuaciones que representa.

Este proyecto fue realizado para redes inalámbricas de sensores, y en parte fundamental fue desarrollado con el protocolo S-MAC, así que otro aspecto interesante por tratar, sería la inclusión de otro protocolo de control de acceso al medio como el estándar IEEE 802.15.4 para analizar el funcionamiento de esta propuesta con otro tipo de tecnologías.

Referencias

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. y Cayirci, E. 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks Journal*. 38(4): 393-422 p.
- Al-Karaki, J. N. y Kamal, A. E. 2004. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless Communications, IEEE*. 11(6): 6-28 p.
- Antoniu, Anthony. 2007. Congestion Problem and Congestion Control In Wireless Sensor Networks. Tesis de maestría en ciencias de la computación. Computer Science Department. University of Cyprus. 132 pp.
- Awang, A. y Suhaimi, M. H. 2007. RIMBAMON©: A forest monitoring system using wireless sensor networks. En *International Conference on Intelligent and Advanced Systems: ICIAS 2007*. Kuala Lumpur, Malaysia. 25-28 de Noviembre, 2007. 1101-1106 p.
- Bachir, A., Dohler, M., Watteyne, T. y Leung, K. 2010. MAC essentials for wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 12(2): 222-248 p.
- Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., y Zhang, L. 1994. MACAW: a media access protocol for wireless LAN's. En *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*. Londres, Inglaterra. 31 de Agosto – 2 Septiembre, 1994. SIGCOMM '94, ACM. 24(4): 212-225 p.
- Blough, D. M. y Santi, P. 2002. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. En *Proceedings of the 8th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking*. Atlanta, Georgia, USA. 23-28 de Septiembre, 2002. MobiCom '02, ACM. 183-192 p.
- Bulusu, N., Heidemann, J., y Estrin, D. 2000. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine*. 7(5): 28-34 p.
- Coleri, S. 2002. PEDAMACS: power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks. Tesis de maestría. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley. 85 pp.

- Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H., y Morris, R. 2002. Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. *Wireless Network*. 8(5): 481-494 p.
- Chen, F. 2005. Simulation of Wireless Sensor Nodes Using S-MAC. Tesis de maestría, University of Erlangen-Nuremberg. 83pp.
- Chen, F., Dressler, F., y Heindl, A. 2006. End-to-end performance characteristics in energy-aware wireless sensor networks. En *Proceedings of the 3rd ACM international Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks*. Terremolinos, España. 06 de Octubre, 2006. PE-WASUN '06, ACM. 41-47p.
- Di Bacco, G., Melodia, T., y Cuomo, F. 2004. A MAC protocol for Delay-Bounded Applications in Wireless Sensor Networks. En *proceedings of the 3rd Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MedHocNet)*. Bodrum, Turkey. 27-30 de Junio de 2004. 208-220 p.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. y Balakrishnan, H. 2000. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks. En *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference System Sciences*. 04-07 de Enero, 2000. HICSS, IEEE. 8: 1-10 p.
- Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D., y Pister, K. 2000. System architecture directions for networked sensors. *SIGPLAN*. 35(11): 93-104 p.
- Ilyas, M. y Mahgoub, I. 2005. *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press. Primera Edición. Boca Ratón, Florida, EUA. 672 pp.
- Jawad Ali, S. y Roy, P. 2008. Energy Saving Methods in Wireless Sensor Networks (Based on 802.15.4). Tesis de maestría, School of Information Science, Computer and Electrical Engineering. Halmstad University, Suecia. 71 pp.
- Karn, P. 1990. MACA - A new channel access method for packet radio networks. En *Proceedings of the 9th ARRL Computer Networking Conference*. Ontario, Canada. Septiembre, 1990. 134-140 p.
- Kim, B. y Kim, Iksoo. 2006. Energy Aware Routing Protocol in Wireless Sensor Networks. *IJCSNS. International Journal of Computer Science and Network Security*. 6(1): 201-207 p.
- Kleinrock, L. y Tobagi, F. 1975. Packet switching in radio channels: Part I - carrier sense multiple access modes and their throughput delay characteristics. *IEEE Transactions on Communications*. 23(12): 1400-1416 p.

- Kulik, J., Heinzelman, W., y Balakrishnan, H. 2002. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*. 8(2): 169-185 p.
- Kulkarni, S. S. y Arumugam, M. 2004. TDMA Service for Sensor Networks. En *Proceedings of the 24th international Conference on Distributed Computing Systems Workshops - W7. EC (ICDCSW'04)*. Washington, DC. 23-24 de Marzo, 2004. IEEE Computer Society. 7: 604-609 p.
- Liao, C.-P., Sheu, J.-P. y Hsu, C.-S. 2005. Power Management Protocol for Regular Wireless Sensor Networks. En Lorenz P. y Dini P. (eds.). *Networking – ICN 2005*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 577-584 p.
- McDysan, D. E. y Spohn, D. L. 1998. *ATM: Theory and Application*. McGraw-Hill, Inc. McGraw-Hill Series on Computer Communications. Primera edición. 1011 pp.
- Michail, A. y Ephremides, A. 2003. Energy-efficient routing for connection-oriented traffic in wireless ad-hoc networks. *Mobile Networks and Applications*. 8(5): 517-533 p.
- Navarro Murillo, E. 2005. Diseño e implementación de una red de comunicación inalámbrica para protección ambiental en el bosque. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 142 pp.
- Pan, J., Hou, Y. T., Cai, L., Shi, Y., y Shen, S. X. 2003. Topology control for wireless sensor networks. En *Proceedings of the 9th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking*. San Diego, CA, USA. 14-19 de Septiembre, 2003. *MobiCom '03*. ACM 286 - 299 p.
- Pearlman, M. R., Deng, J., Liang, B. y Haas, Z. J. 2002. Elective participation in ad hoc networks based on energy consumption. En *Global Telecommunications Conference*. Taipei, Taiwan. 17-21 de Noviembre, 2002. *GLOBECOM '02*. IEEE. 1: 26-31 p.
- Pérez Ramos, A. E. 2008. *Protocolos De Enrutamiento Para Una Red Inalámbrica De Sensores De Área Amplia*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, México. 146 pp.
- Redondo Galván, A. 2006. Seguridad en redes de sensores inalámbricas. Protocolo de propuesta doctoral. Centro de investigación y estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México. 28 pp.
- Romer, K. y Mattern, F. 2004. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications*. IEEE. 11(6): 54- 61 p.

- Santi, P. y Blough, D. M. 2003. The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2(1): 25-39 p.
- Santi, P., Blough, D. M., y Vainstein, F. 2001. A probabilistic analysis for the range assignment problem in ad hoc networks. En *Proceedings of the 2nd ACM international Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. Long Beach, CA, USA. 04-05 de Octubre, 2001. *MobiHoc '01*. ACM. 212-220 p.
- Shreedhar, M. y Varghese, G. 1996. Efficient fair queueing using deficit round-robin. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 4(3): 375-385 p.
- Singh, S. y Raghavendra, C. S. 1998. PAMAS - power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks. *ACM Computer Communication Review*. SIGCOMM. 28(3): 5-26 p.
- Sivalingam, K. M., Chen, J.-C., Agrawal, P. y Srivastava, M. B. 2000. Design and analysis of low-power access protocols for wireless and mobile ATM networks. *Wireless Networks*. 6(1): 73-87 p.
- Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V. y Pottie, G. 2000. Protocols for self-organization of a wireless sensor network, *IEEE Personal Communication Magazine*. 7(5): 16-27 p.
- Sohraby, K., Minoli, D., y Znati, T. 2007. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. Wiley-Interscience. Primera Edición. Hoboken, New Jersey. 328 pp.
- Stemm, M. y Katz, R. H. 1997. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices. *IEICE (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) Transactions on Communications*, special Issue on Mobile Computing. E80-B(8): 1125-1131 p.
- Tamir, T. 1977. Radio Wave Propagation Along Mixed Paths in Forest Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 25 (4): 471-477 p.
- The Network Simulator – NS. Página oficial. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Consultada en agosto, 2010.
- Van Dam, T. y Langendoen, K. 2003. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. En *Proceedings of the 1st international Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. SenSys'03. Los Angeles, California, USA. 05-07 de Noviembre, 2003. 171-180 p.

- Wang, Y.-H., Yu, C.-Y., y Fu, P.-F. 2007. A Coverage and Connectivity Method to Cluster Topology in Wireless Sensor Networks. En Proceedings of the 21st international Conference on Advanced information Networking and Applications Workshops. Washington, DC. 21-23 de Mayo, 2007. AINAW '07. IEEE Computer Society. 1: 97-102 p.
- Woo, A. y Culler, D. E. 2001. A transmission control scheme for media access in sensor networks. En Proceedings of the 7th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy. 16-21 de Julio, 2001. MobiCom '01. ACM. 221-235 p.
- Xu, Y., Heidemann, J., and Estrin, D. 2001. Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing. En Proceedings of the 7th Annual international Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy. 16-21 de Julio, 2001. MobiCom '01. ACM. 70-84 p.
- Ye, W., Heidemann, J. y Estrin, D. 2002. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. En Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York, USA. 23-27 de Junio, 2002. INFOCOM 2002. IEEE. 3: 1567-1576 p.
- Ye, W., Heidemann, J. y Estrin, D. 2004. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 12(3): 493-506 p.
- Younis, O. y Fahmy, S. 2004. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach. En proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Hong Kong, China. 7-11 de Marzo, 2004. INFOCOM 2004. IEEE. 1: 7-11 p.
- Zeng, M. y Xu, B. 2007. A Three-tiered Topology Control Model for Large Scale Wireless Sensor Networks. En Control and Automation International Conference. Guangzhou, China. 30 de Mayo – 01 de Junio, 2007. ICCA. IEEE. 3250-3253 p.
- Zhao, F. y Guibas L. 2004. Wireless Sensor Networks: an information processing approach. Morgan Kaufmann. Primera edición. San Francisco. 358 pp.

ANEXO A

Factores Críticos de Diseño de un Protocolo de subcapa MAC para WSN

Retardo: el retardo se refiere a la cantidad de tiempo utilizado por un paquete de datos en la capa MAC antes de ser transmitido satisfactoriamente. El retardo no solo depende de la carga de tráfico de datos en la red, sino de las opciones del protocolo MAC. Para aplicaciones sensibles al retardo, se requiere establecer un límite de retardo, por lo que el protocolo MAC deberá ajustarse a las necesidades de Calidad de Servicio si así lo requiere. (Di Bacco, et al., 2004).

Tasa de transferencia: básicamente se define como la tasa promedio de mensajes entregados satisfactoriamente sobre un canal de comunicación. Usualmente se mide en mensajes por segundo o bits por segundo. En ambientes inalámbricos representa la fracción de la capacidad del canal utilizada para la transmisión de datos. Un objetivo importante de un protocolo MAC es maximizar la tasa de transferencia del canal y a la vez minimizar el retardo del mensaje.

Robustez: se define como la combinación de fiabilidad, disponibilidad y requerimientos de rendimiento, refleja el grado al que el protocolo es insensible a errores y desinformación. La robustez es complicada de lograr en una red variante en tiempo, como es el caso de una WSN, dado que depende fuertemente de las fallas en los nodos de enlace y comunicación.

Escalabilidad: se refiere a la habilidad de los sistemas de comunicación para satisfacer sus requerimientos de desempeño sin importar el tamaño de la red o el número de nodos. En las

WSN el número de nodos puede ser muy grande, llegando a ser de miles o millones de nodos, por lo tanto la escalabilidad es un factor crítico. Un enfoque interesante es el identificar las interacciones de los nodos de comunicación, a través del desarrollo de estructuras jerárquicas y estrategias de agregación de datos.

El agrupamiento de nodos en un clúster permite el diseño de protocolos de acceso al medio de forma compartida, los cuales son altamente escalables. De manera similar, la agregación de la información de varios nodos permite detectar patrones de tráfico con los cuales se puede escalar el protocolo MAC, cuando se trabaja con una gran cantidad de nodos sensores en la red.

Estabilidad: se refiere a la capacidad del sistema de comunicación para manejar fluctuaciones en la carga de tráfico en periodos sustanciales de tiempo. La estabilidad de un protocolo MAC típicamente se observa en base al retardo o la tasa de datos. Respecto al retardo, un protocolo MAC se considera estable si el tiempo de espera del mensaje es reducido. Mientras que a la tasa de datos, un protocolo MAC se considera estable si el sistema no colapsa al momento de incrementar la carga de datos. El protocolo MAC debe adaptarse a las altas fluctuaciones en la carga de tráfico utilizando posiblemente una calendarización meticulosa o tráfico en ráfagas.

Justicia: un protocolo MAC se considera justo cuando reserva la capacidad del canal equitativamente para todos los nodos participantes, sin reducir excesivamente la tasa de transferencia de la red. La justicia se utiliza frecuentemente cuando se habla de calidad de servicio, donde se trata de evitar que unos nodos consuman más recursos que otros.

Eficiencia de Energía: los nodos sensores son alimentados por baterías de pequeña capacidad, y en algunos casos, los nodos son desplegados en ambientes desatendidos dificultado el cambio de baterías; el utilizar baterías recargables resulta poco práctico y complicado según (Ilyas y Mahgoub, 2005). El consumo de energía es un factor limitante que tiene un impacto directo al tiempo de vida útil del nodo sensor; una posible solución

podría ser el utilizar dispositivos sensores de baja potencia electrónica. Aún utilizando dispositivos que consuman poca energía, existen otros factores que influyen en el consumo eficiente de la energía, estos son:

Colisiones: estas ocurren cuando dos o más nodos sensores que estén dentro del mismo radio de alcance intentan transmitir al simultáneamente. La retransmisión de paquetes puede degradar el desempeño de la red, dado que se agrega tráfico de datos adicional con la posibilidad de volver a colisionar y según Van Dam y Langendoen (2003) en el peor de los casos, llegar a colapsar la red.

Escucha ociosa: un nodo sensor entra en modo inactivo cuando mantiene encendida la unidad de radio a la escucha de potenciales paquetes de datos. Usualmente, las aplicaciones de redes de sensores generan poca carga de datos por lo que el canal permanece en silencio o inactivo la mayor parte del tiempo. Se recomienda que los nodos sensores permanezcan en modo dormido por largos periodos de tiempo en vez de estar en modo activo o despierto permanentemente.

Sobre escucha: sucede cuando un nodo gasta energía en la recepción de señales o paquetes irrelevantes. Ejemplo de paquetes irrelevantes, es cuando un nodo recibe datos que no están destinados hacia él, esto puede generar redundancias que finalmente refleja un consumo de energía innecesario.

Overhead: los encabezados MAC y especialmente los mensajes de control son considerados *overhead* porque no contienen información útil para la aplicación, aún así, consumen energía. En el caso del tráfico de una WLAN este costo puede ser amortizado, pero las pequeñas cargas de una WSN modifican este límite considerablemente. Por ejemplo, el intercambio de mensajes de control RTS/CTS derivan en el uso del 40% a 75% de la capacidad del canal (Woo y Culler, 2001), precisamente porque el tamaño de la trama de datos para las redes inalámbricas de sensores es muy pequeño. (Sohraby et al., 2007).

ANEXO B

Teoría de Ocupación

Es un enfoque aplicado en la teoría de probabilidad que ha resultado útil para el análisis de las propiedades fundamentales para redes ad hoc y de sensores (Kolchin et al., 1978).

La teoría de la ocupación asume que se lanzan de manera independiente y aleatoria n pelotas en C urnas (o celdas), donde una pelota tiene la misma probabilidad de caer en cualquier celda. Las variables C y n son interdependientes: generalmente se asume que el número de celdas C es la variable independiente, y n se expresa en función de C .

Dadas estas condiciones, la distribución asintótica de algunas variables aleatorias con C como el objeto de interés, del tipo $n(C) \rightarrow \infty$ se pueden caracterizar para calcular:

- *El número de celdas vacías* después de lanzar todas las pelotas;
- *El número de intentos* antes de que k urnas se llenen con por lo menos una pelota.
- *El número mínimo y máximo número de pelotas* que se encuentren en una celda después de haber lanzado todas las pelotas.

La teoría de la ocupación se ha implementado en el contexto de redes inalámbricas ad hoc y de sensores para caracterizar el CTR (critical transmitting range) el alcance crítico de transmisión para conectividad (Santi y Blough 2002, 2003), para obtener los límites del tiempo de vida de la red (Blough y Santi 2002), y para estudiar las propiedades del algoritmo de agrupamiento (Younis y Fahmy, 2004).

Para comprender de mejor manera como es que la caracterización asintótica del número de celdas puede ser utilizada para brindar condiciones suficientes de conectividad

asintóticamente casi segura (a.c.s²¹) en un grafo de comunicación, se presenta esta breve explicación. Asumimos que n nodos son desplegados en cierta región bidimensional R . Ahora, supongamos que R esta dividida en C celdas del mismo tamaño, y asumimos que todos los nodos tienen el mismo radio de transmisión r . Si además asumimos que los nodos están distribuidos de manera uniforme aleatoria en R , el problema de determinar el mínimo numero de nodos a ser desplegados y generar un grafo de comunicación conectado con alta probabilidad puede ser catalogado como un problema de ocupación donde la elección del tamaño de la celda debe ser elegida apropiadamente.

Consideremos una cuadrícula de celdas como la mostrada en la Figura 43, es fácil notar que una vez definido el lado de la celda y teniendo por lo menos un nodo en cada celda es condición suficiente para generar un grafo de comunicación conectado. Dado que la condición suficiente para conectividad puede obtenerse de los resultados de la teoría de la ocupación que determina la distribución asintótica de celdas vacías, es por esto que autores como (Santi y Blough 2002, 2003) se interesaron en el estudio de esta teoría.

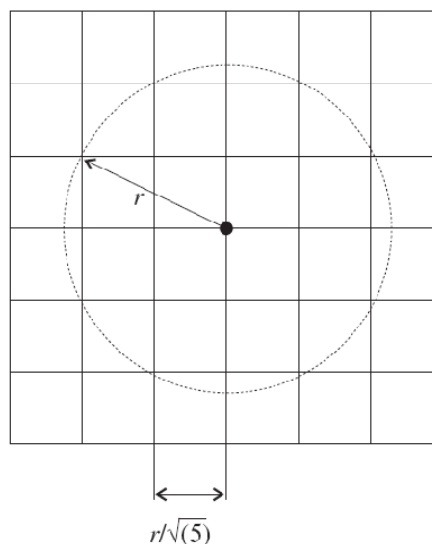


Figura 43. Distribución de celdas basada en la teoría de ocupación para garantizar condiciones suficientes de conectividad. El tamaño de lado de cada celda se determina en función de r , y es igual a $r/\sqrt{5}$.

²¹ Del análisis asintótico. Significa Asintóticamente Casi Seguro, del inglés a.a.s.: Asymptotically Almost Sure.

ANEXO C

Algoritmo para procesamiento de paquetes SYNC

Tabla XXV. Algoritmo General para procesamiento de paquetes SYNC. Basado en (Feng, 2005).

	Condición	Acción
1	V es un vecino conocido en mi lista de vecinos y no ha cambiado su calendario primario desde que recibí su último paquete SYNC	Actualizo C en mi tabla calendarizadora, re calendarizando el tiempo de calendarización con el valor de 'sleepTime' del paquete SYNC. Esto puede eliminar el desfasamiento de reloj entre dos nodos.
2	V es un vecino conocido en mi lista de vecinos, pero su calendario primario cambio a C, el cual es nuevo para mí, desde que recibí su último paquete SYNC.	<p>Paso 1: Procesar el calendario que tenía V anteriormente. El número de nodos en esta calendarización debe decrementarse en uno. Si el número llega a 0 después del decremento, este calendario debe ser removido de mi tabla de calendarización. Si sucede que tengo una petición de envío de DATA, debo aplazar el cambio hasta que el envío finalice.</p> <p>Paso 2: Procesar el nuevo calendario C al que cambió V. Si mi tabla de calendarización no está llena, agrego C y asigno un temporizador para el nuevo calendario. De otra forma tengo que remover a V de mi lista de vecinos.</p> <p>Paso 3: Si la calendarización que tenía V es mi calendario primario, necesito ejecutar el procedimiento 'check_my_schedule', con el cual verifico si soy el único que posee ese calendario primario. Si es así, tengo que elegir el siguiente calendario disponible en mi tabla de calendarización y establecerlo como mi calendario primario (eliminar el</p>

		antiguo). Pero si ocurre que tengo que hacer una petición de envío de DATA, debo aplazar el procedimiento 'check_my_schedule' hasta que el envío actual finalice.
3	V es un vecino conocido en mi lista de vecinos, pero ha cambiado su calendario primario a C, el cual ya existe en mi tabla calendarizadora, desde que recibí su último paquete SYNC.	<p>Paso 1: Procesar el calendario que tenía V anteriormente. El número de nodos que utilizan el calendario de V utilizaba debe decrementarse en uno. Si el número llega a 0 después del decremento, este calendario debe ser removido de mi tabla de calendarización. Si sucede que tengo una petición de envío de DATA, debo aplazar el cambio hasta que el envío finalice.</p> <p>Paso 2: Procesar el calendario C al que cambió V. Actualizo C en mi tabla calendarizadora, re calendarizando el tiempo de calendarización con el valor de 'sleepTime' del paquete SYNC. Y el número de nodos en C aumenta en uno.</p>
4	V es un vecino desconocido para mí y además C es nuevo para mí.	Si mi tabla calendarizadora y mi lista de vecinos no están llenas, agrego C a mi tabla calendarizadora y asigno un temporizador al nuevo calendario C. Después agrego V a mi lista de vecinos.
5	V es un vecino desconocido para mí, pero C es conocido en mi tabla calendarizadora.	Actualizo C en mi tabla calendarizadora, re calendarizando el tiempo de calendarización con el valor de 'sleepTime' del paquete SYNC. Si mi lista de vecinos no está llena, agrego V. Y el número de nodos en C aumenta en uno.