



01170
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN INGENIERÍA

“ESTUDIO DE MOVILIDAD Y LOCALIZACIÓN EN REDES
DE SENSORES INALÁMBRICOS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
(OPCIÓN: TELECOMUNICACIONES)

P R E S E N T A:

ING. MICHAEL PASCOE CHALKE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F.

MAYO, 2005

344076



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

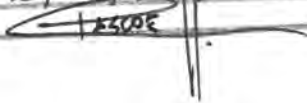
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

DEDICATORIA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recopilation.

NOMBRE: Michael Pascoe Chalke

FECHA: 16/05/2005

FIRMA: 

A mi madre:

*Patricia Lesley Chalke Kelsall
(1928 – 2004)*

Gracias por el ejemplo de vida, la enseñanza, la paciencia, la comprensión y el amor...

Sin todo eso y mucho más que me diste, no hubiera tenido la entereza de culminar este trabajo...

A ti te dedico mi vida, mi esfuerzo, mi existir...

Te agradezco todo lo que me obsequiaste mientras estuve junto a ti...

Tú siempre has sido y serás la persona más importante en mi vida...

Nunca te olvidaré...

Siempre vivirás en mi corazón y en mi pensamiento...

AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México...
Por abrirme la puerta al conocimiento...*

*A La Facultad de Ingeniería...
Por compartir una infinidad de experiencias que nunca olvidaré...*

*Al Posgrado en Ingeniería y a sus académicos...
Por permitirme formar parte de esta comunidad y brindarme su enseñanza...*

*A la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEPE)
Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)
Por el apoyo otorgado a través de sus programas de becarios*

*Al Dr. Javier Gómez Castellanos...
Por la dirección de este trabajo, por compartir sus conocimientos, por su apoyo y paciencia...*

A los Doctores:

*Dr. Víctor García Garduño
Dr. Salvador Landeros Ayala
Dr. Miguel López Guerrero
Dr. Víctor Rangel Licea*

Por su apoyo y observaciones que permitieron mejorar este trabajo...

*A mi familia y amigos
Por permanecer siempre a mi lado y hacerme saber que siempre podré contar con ustedes...*

Gracias...

TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVOS	1
------------------	---

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	2
---------------------	---

1.1 INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	2
---	---

1.2 SISTEMA MODELO PARA REDES INALÁMBRICAS AD – HOC	6
---	---

1.2.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA RED	7
--	---

1.2.1.1 <i>Conectividad</i>	7
-----------------------------	---

1.2.1.2 <i>Diámetro</i>	9
-------------------------	---

1.2.1.3 <i>Cobertura</i>	10
--------------------------	----

1.2.1.4 <i>Grado Nodal</i>	11
----------------------------	----

1.3 EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN EL CANAL INALÁMBRICO	12
--	----

1.3.1 MODELO DE PÉRDIDAS DE TRAYECTORIA POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE	13
---	----

1.3.2 MODELO DE PÉRDIDAS POR TRAYECTORIA DE DOS RAYOS	15
---	----

1.3.3 FLUCTUACIONES LENTAS	18
----------------------------	----

1.3.4 FLUCTUACIONES RÁPIDAS	20
-----------------------------	----

1.3.5 EFECTO DOPPLER	25
----------------------	----

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN	27
--------------------------------	----

2.1 INTRODUCCIÓN	27
------------------	----

2.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA POSICIÓN DE NODOS SENSORES	27
--	----

2.2.1 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN POR RADIOFRECUENCIA	28
--	----

2.2.2 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN POR MÉTODOS ACÚSTICOS	35
--	----

2.2.3 MÉTODOS Y ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN	37
--	----

CAPÍTULO III

PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO Y CONTROL DE ACCESO AL MEDIO	40
3.1 INTRODUCCIÓN	40
3.2 PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN REDES MULTIPUNTO	42
3.2.1 PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN REDES Ad – Hoc	42
3.2.2 PROPIEDADES DESEABLES EN LOS PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO	43
3.2.3 ESTRATEGIAS DE LOS PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO	44
3.2.4 PROCOLOS DE ENCAMINAMIENTO MÁS COMUNES	46
3.3 PROCOLOS DE LA CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO	51

CAPÍTULO IV

MODELO ANALÍTICO DE MOVILIDAD	62
4.1 INTRODUCCIÓN	62
4.2 ANÁLISIS DE MOVILIDAD	63
4.3 DESCUBRIMIENTO DE RUTA	68
4.4 MANTENIMIENTO DE RUTA	71
4.5 RETARDO EN LA TRANSMISIÓN DE UN PAQUETE EN UNA RED INALÁMBRICA	75

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN	89
5.1 INTRODUCCIÓN	89
5.1.1 NETWORK SIMULATOR VERSIÓN 2 (NS – 2)	89
5.1.2 SIMULACIÓN DE REDES MÓVILES (INALÁMBRICAS) MEDIANTE EL PROGRAMA NS – 2	89
5.2 EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO DE MOVILIDAD	93

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	105
6.1 INTRODUCCIÓN	105
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	105
6.3 CONCLUSIONES	105

BIBLIOGRAFÍA	108
---------------------	-----

APÉNDICE	109
-----------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA I – 1	Diagrama de una red de sensores inalámbricos.	2
FIGURA I – 2	Grafo característico de una red inalámbrica.	8
FIGURA I – 3	Secciones de la región de transmisión para el análisis de la cobertura.	11
FIGURA I – 4	Modelo de pérdidas por trayectoria de dos rayos.	15
FIGURA I – 5	Efectos de propagación a gran escala en una transmisión inalámbrica.	25
FIGURA I – 6	Influencia del Efecto Doppler sobre una transmisión inalámbrica.	26
FIGURA II – 1	Diagrama esquemático de un sistema de localización ultrasónico.	35
FIGURA II – 2	Diagrama de operación del sistema Active Bat.	36
FIGURA II – 3	Métodos para la estimación de la posición de nodos sensores.	37
FIGURA III – 1	Diagrama del establecimiento de ruta en una red de sensores inalámbricos.	41
FIGURA III – 2	Diagrama del Método de Acceso Básico.	56
FIGURA III – 3	Diagrama del Método de Acceso con Intercambio de Paquetes (RTS/CTS).	61
FIGURA IV – 1	Ruta del nodo fuente (F) al destino (D) con varias estaciones intermedias.	65
FIGURA IV – 2	Región de traslape de las áreas de cobertura de dos nodos adyacentes.	66
FIGURA IV – 3	Proceso de descubrimiento de ruta.	68
FIGURA IV – 4	Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.	74
FIGURA IV – 5	Gráfica del retardo promedio de un paquete contra el número de estaciones.	79
FIGURA IV – 6	Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.	81
FIGURA IV – 7	Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.	81
FIGURA IV – 8	Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.	82
FIGURA IV – 9	Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.	83
FIGURA IV – 10	Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.	83
FIGURA IV – 11	Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.	84
FIGURA IV – 12	Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.	85
FIGURA IV – 13	Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.	85
FIGURA IV – 14	Gráfica de la velocidad contra saltos de la TABLA IV – 2.	88
FIGURA V – 1	Diagrama esquemático de un nodo móvil en el simulador NS – 2.	90
FIGURA V – 2	Diagrama general del experimento de simulación.	93
FIGURA V – 3	Escenario al inicio de la simulación.	99
FIGURA V – 4	Inicio de la transmisión, el nodo fuente envía solicitud de nueva transmisión.	100
FIGURA V – 5	Respuesta, el nodo destino envía confirmación de transmisión.	100
FIGURA V – 6	Inicio de la transmisión de datos entre los nodos fuente y destino.	101
FIGURA V – 7	Gráficas de Δt_{F-D} y Δt_R contra s_{F-D} para $v = 5$ [m/s].	102
FIGURA V – 8	Gráficas de Δt_{F-D} y Δt_R contra s_{F-D} para $v = 20$ [m/s].	103
FIGURA VI – 1	Distribución característica del tráfico en una red multipunto.	106

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA II – 1	MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE NODOS SENSORES.	39
TABLA IV – 1	LONGITUD Y TIEMPO DE TRANSMISIÓN DE PAQUETES.	78
TABLA IV – 2	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA DE LOS NODOS EN UNA RED DE SENSORES.	87

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL:

REALIZAR UN ESTUDIO DE MOVILIDAD EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS MÓVILES, QUE PERMITA ESTIMAR EL LÍMITE EN LA VELOCIDAD MÁXIMA QUE GARANTICE LA CONECTIVIDAD EN LA RED. SE ESTUDIARÁ UN MODELO TEÓRICO Y LA FACTIBILIDAD DE SU APLICACIÓN PARA ANALIZAR ESTE PROBLEMA. ADEMÁS, SE LLEVARAN A CABO UNA SERIE DE EXPERIMENTOS CON UN SIMULADOR DE REDES PARA LA VERIFICACIÓN DEL MODELO TEÓRICO PROPUESTO.

OBJETIVOS:

- ❏ APLICAR UN MODELO ANALÍTICO DE MOVILIDAD QUE PERMITA ESTUDIAR Y DETERMINAR EL LÍMITE MÁXIMO DE LA VELOCIDAD A LA QUE PUEDEN MOVERSE LOS NODOS QUE CONFORMAN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS, GARANTIZANDO LA CONECTIVIDAD EN LA RED DE COMUNICACIÓN.

- ❏ COMPROBAR EL ANÁLISIS TEÓRICO MEDIANTE LA ASISTENCIA DE ALGÚN PROGRAMA DE DE SIMULACIÓN DE REDES DE COMUNICACIÓN.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Una red móvil *ad – hoc* es un sistema autónomo formado por nodos en movimiento conectados por medio de enlaces inalámbricos empleando señales de radiofrecuencia. En este tipo de configuración, no existe infraestructura estática como son las estaciones base. Si dos elementos de la red no se encuentran dentro del alcance de las señales de radiofrecuencia que emiten, entonces todos los mensajes de comunicación entre éstos deben pasar a través de nodos intermedios que funcionen como dispositivos de encaminamiento. Los elementos poseen la libertad de moverse en el entorno de manera aleatoria, por lo que la topología de la red cambia dinámicamente. La FIGURA I – 1, muestra un diagrama de una red de sensores inalámbricos.

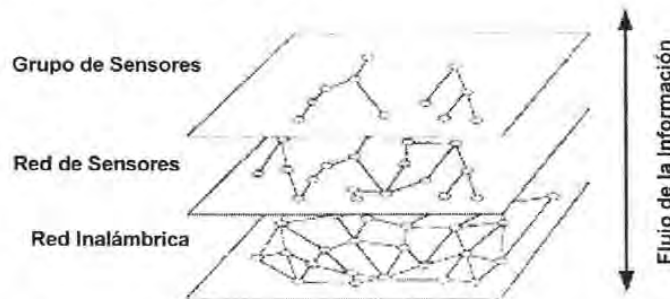


FIGURA I – 1 Diagrama de una red de sensores inalámbricos.

Las redes de sensores son un tipo particular de red inalámbrica *ad – hoc* en las cuales sus elementos o nodos poseen Sistemas Micro – Electrónico – Mecánicos (**MEMS *Micro – Electronic – Mechanical Systems***) que incluyen una serie de componentes como sensores, actuadores así como los dispositivos electrónicos que permiten establecer los enlaces de comunicación de radiofrecuencia. Por lo regular, los nodos sensores se dispersan en forma aleatoria sobre el área de interés y poseen la capacidad de establecer el enlace de comunicación de radiofrecuencia de corto alcance (30 m) y los dispositivos electrónicos necesarios para desarrollar el procesamiento de señales para administrar los protocolos de comunicación y procesar los datos obtenidos por los sensores.

Cada nodo tiene una capacidad de procesamiento limitada, pero son capaces de desarrollar grandes tareas a través de la contribución coordinada que aportan los elementos de la red, los cuales pueden alcanzar una cantidad de cientos e incluso miles de nodos. Normalmente, los sensores poseen fuentes de energía eléctrica constituidas por baterías y, debido a que su reemplazo o recarga por lo regular resulta una tarea difícil, la reducción del consumo de energía es una consideración importante en el diseño de las redes de sensores. Dado que el alcance en la transmisión de un nodo es proporcional a su potencia de transmisión, entonces el alcance de cada nodo sensor se encuentra restringido en la mayoría de las aplicaciones.

En gran variedad de aplicaciones de redes inalámbricas *ad – hoc*, sus elementos poseen la capacidad de movilidad lo cual complica el análisis de las características de la red dado que la topología de la misma cambia constantemente. Asimismo, la tasa de falla de los nodos puede ser bastante alta debido, principalmente a la capacidad relativamente limitada de la vida útil de sus baterías. Por lo regular, la batería debe ser reemplazada manualmente y el tiempo de recuperación tiende a ser bastante alto (en el orden de varias horas), por tanto este tipo de falla se considera permanente en la mayoría de los casos.

Además, se contemplan fallas transitorias en los nodos. La principal causa de este tipo de fallas es ocasionada por la interferencia electromagnética inherentemente presente en los canales de comunicación y que inhabilita temporalmente a los nodos de la red. Para las fallas transitorias no existe un patrón que pueda definir su comportamiento, además que dependen del tipo de método de comunicación establecido entre los nodos y la topología de los mismos.

Las fallas transitorias en el enlace de comunicación son función del movimiento relativo entre nodos y de la distancia de separación entre los extremos del enlace de comunicación. Ambos factores hacen que el análisis de las características sea una tarea complicada y que está en función del tiempo.

Para controlar la potencia de transmisión de un gran número de nodos sensores, utilizados en aplicaciones prácticas que involucran una red inalámbrica, se requiere de una arquitectura compleja que provea de un alto nivel de instrucciones primitivas, tales como solicitudes de agrupamiento, cuestionamiento y monitoreo entre los sensores.

Existen diversas propuestas para coordinar las redes de sensores *ad – hoc* y que intentan proveer de un alto nivel de operatividad para estas arquitecturas, tales como la Arquitectura de Información de Sensores en Red (*Sensor Information Networking Architecture (SINA)*) o la Difusión Dirigida.

Los protocolos distribuidos de alto nivel se ejecutan en estas arquitecturas con el fin de proveer una gran capacidad de funcionalidad. Estos protocolos se pueden catalogar en dos categorías principales, (I) los protocolos del tipo de acumulación en los cuales los nodos envían la información a un nodo líder elegido, el cual desarrolla la acumulación de los datos y su procesamiento; (II) los protocolos del tipo homogéneo en los que cada nodo desempeña una función idéntica, tal y como sucede en un proceso de agrupamiento de los nodos sensores basado en su proximidad. La seguridad, perdurabilidad y desempeño de estos protocolos depende de las características de la red.

Existen estudios teóricos que analizan algunos parámetros de desempeño en ambientes de redes inalámbricas estáticas. Sin embargo, estos estudios no han considerado los efectos de la movilidad o sólo se han contemplado para ciertos casos que involucran un número limitado de nodos participantes; tampoco se han contemplado la influencia de las fallas transitorias y permanentes sobre las características de la red. Se puede contemplar el empleo de patrones de movilidad con el fin de mejorar el análisis de las características de la red.

Se han realizado una gran cantidad de proyectos de investigación enfocados a los protocolos de encaminamiento de bajo nivel empleados en las redes inalámbricas *ad – hoc*. La premisa fundamental que utilizan los protocolos de encaminamiento, tales como el protocolo **OSPF** (*Open Shortest Path First*) y el protocolo **RIP** (*Routing Information Protocol*), es encontrar la distancia más corta entre cualquier par de nodos.

Las características propias de las redes inalámbricas *ad – hoc* (capacidad dinámica, intolerabilidad al procesamiento excesivo de encabezados para el cálculo de rutas) han motivado el desarrollo de nuevos protocolos de encaminamiento, tales como el protocolo **DSR** (*Dynamic Source Routing*), el protocolo **DSDV** (*Destination-Sequenced Distance Vector*) y el protocolo **TORA** (*Temporally – Ordered Routing Algorithm*).

El protocolo **DSR** establece que cada paquete a ser encaminado debe portar en su encabezado la lista ordenada y completa de los nodos a través de los cuales el mensaje debe pasar. El protocolo **DSDV** utiliza un índice de refrescamiento que filtra las rutas fuera de vigencia. El protocolo **TORA** mantiene rutas múltiples y efectúa el cálculo de una nueva ruta sólo cuando todas las rutas se vuelven inútiles debido al movimiento del nodo o a las fallas.

Otra área de estudio ha sido la capacidad de los protocolos de encaminamiento para reducir el consumo de energía por parte de los nodos, aunque esto puede no ser óptimo para mantener la conectividad y la capacidad operativa de la red a largo plazo.

En el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis, se aplicará un modelo de movilidad a una red de sensores inalámbricos para poder estimar la velocidad máxima a la que pueden moverse las estaciones o nodos de la red en cuestión, pero que consiga mantenerse la conectividad de la red de comunicación.

Para realizar el estudio sobre la capacidad de movilidad en una red de sensores inalámbricos se requiere que la estación fuente conozca, en cierto grado, la posición que ocupa la estación destino en la red de sensores.

Además, es necesario determinar el tiempo promedio de establecimiento de la ruta, es decir el lapso que debe transcurrir para que se establezca una ruta de comunicación que enlace el nodo fuente con el nodo destino y el tiempo promedio de permanencia de la ruta, es decir el intervalo de tiempo que transcurre desde el instante en que se ha establecido la ruta entre los nodos fuente y destino hasta que se interrumpe el enlace de comunicación entre alguno de los nodos intermedios que forman parte de la ruta.

1.2 SISTEMA MODELO PARA REDES INALÁMBRICAS AD – HOC

Para el estudio que se realizará en este trabajo de investigación, se considerará el siguiente modelo de red *ad – hoc* de sensores inalámbricos:

1. Cada nodo se encuentra limitado en su alcance de transmisión, el cual es constante mientras la estación se encuentre operando.
2. Los nodos poseen la capacidad de moverse en cualquier dirección en un espacio bidimensional.
3. Existe una limitante en la velocidad máxima en el movimiento de los nodos para mantener la conectividad de la red de comunicación. El objetivo primordial de este trabajo de investigación es encontrar el valor limitante de esa velocidad.
4. Los nodos móviles poseen una capacidad limitada de cálculo. Cada nodo sensor puede contar con los siguientes componentes – unidad de procesamiento central (CPU), equipo de comunicación inalámbrica de radiofrecuencia, módulos de memoria, sensores, impulsores (dispositivos de movilidad) y fuentes de suministro de energía eléctrica (baterías). Asimismo, cada nodo posee su sistema operativo y su programa a nivel de aplicación, el cual puede estar ejecutando un protocolo que permita determinar su ubicación.
5. El nodo sensor puede presentar fallas permanentes debidas al agotamiento de su fuente de suministro de energía eléctrica o problemas en los componentes de los circuitos electrónicos, o presentar fallas temporales ocasionadas por bloqueo en los enlaces de comunicación entre nodos o errores transitorios del equipo electrónico que posee el nodo sensor.
6. El nodo puede responder a mensajes de control que le indican la dirección y velocidad de su movimiento. Esto permite al sistema desarrollar un monitoreo del movimiento de sus nodos sensores que permite realizar un estudio sobre las mediciones de los parámetros de salida. Una característica común a todos los componentes se relaciona con el suministro limitado de energía eléctrica, ya que la vida útil de las baterías es un factor crítico en la capacidad operativa de los nodos sensores.

Los nodos sensores conforman una red en donde cada nodo es responsable de desarrollar tareas de medición y procesamiento locales, así como funciones de encaminamiento. Debido a las limitaciones en el alcance de transmisión de cada nodo, la comunicación entre dos nodos de la red puede requerir de múltiples enlaces intermedios.

Bajo las condiciones anteriores, los nodos intermediarios actúan como dispositivos de encaminamiento, ejecutando un protocolo de encaminamiento a nivel de red con limitaciones en la energía. Los nodos sensores transmiten en forma omni-direccional y la distancia de separación entre nodos (d_{ij}) debe ser menor al radio del alcance de transmisión de los mismos (r) para asegurar el establecimiento del enlace de comunicación. La red considerada es bidimensional y se organiza de forma similar a una retícula en la que los nodos se ubican en cada uno de los puntos de intersección de la misma.

1.2.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA RED

Para conseguir los objetivos planteados en este trabajo de investigación, es importante considerar algunas características de la red, tales como la conectividad, el diámetro, la cobertura y el grado nodal, con la finalidad de evaluar una combinación de estas características de la red e investigar el efecto de la movilidad y las fallas de los elementos de la red sobre el comportamiento de una red inalámbrica *ad-hoc*. En este análisis se asume que el sistema posee el protocolo de encaminamiento más apropiado para la red en cuestión. Otro parámetro importante a considerar es la cobertura como una fracción del área total en la que los nodos se encuentran localizados.

1.2.1.1 Conectividad

La conectividad de la red es una de sus características a analizar, un nivel de conectividad completo en una red implica que es posible establecer la comunicación entre cualquier par de nodos. Existen estudios previos que han analizado la conectividad en una red inalámbrica *ad-hoc* con capacidad de movilidad bidimensional. Una de las propiedades de una red más relevantes y ampliamente estudiadas es la conectividad. Se considera el establecimiento de un grafo de comunicación no dirigido que representa la red de sensores.

Sea n la cantidad de nodos sensores contenidos en el grafo que representa a la red, existe una frontera entre el nodo i y el nodo j en la que la distancia entre dichos nodos (d_{ij}) es menor que el alcance de transmisión r , esto es: ($d_{ij} < r$), al cumplirse la condición anterior implica que existe comunicación directa entre los nodos i y j .

Una característica deseable de una red es que el grafo de comunicación se encuentre ampliamente interconectado, es decir que para cada par de nodos exista, por lo menos, un enlace entre ellos. La FIGURA I – 2 que se muestra a continuación, representa el grafo característico de una red inalámbrica.

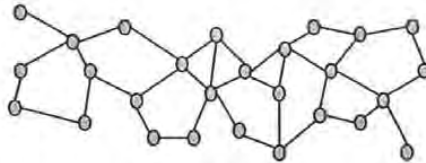


FIGURA I – 2 Grafo característico de una red inalámbrica.

Se necesita definir una medida cuantificable para la conectividad con el fin de poder analizar las características de la red. La conectividad de una red se define como sigue. Considere que el grafo posee varios componentes ampliamente interconectados, un componente ampliamente interconectado se define como un sub-grafo del grafo original que está ampliamente interconectado. Los componentes ampliamente interconectados se ordenan en orden decreciente dependiendo del número de nodos que posee cada componente. La lista ordenada es C_1, C_2, \dots, C_k y su tamaño respectivo es G_1, G_2, \dots, G_k . La definición de conectividad (C) es:

$$C = G_1/n \quad (I-1)$$

En esta definición, sólo es relevante el componente de la red más ampliamente interconectado. En ciertas aplicaciones se contemplan tareas útiles que pueden ser realizadas por múltiples componentes que deben cumplir con un cierto requerimiento mínimo o máximo de conectividad establecido por un umbral definido por el número de nodos presentes. Un ejemplo práctico de este escenario es una aplicación de base de datos tolerante a fallas que soporta un límite de procesos de lectura y de escritura. Si el número de nodos de un componente conectado se encuentra dentro de este límite, entonces la aplicación será ejecutada por el grupo.

Bajo las condiciones anteriores, los nodos intermediarios actúan como dispositivos de encaminamiento, ejecutando un protocolo de encaminamiento a nivel de red con limitaciones en la energía. Los nodos sensores transmiten en forma omni-direccional y la distancia de separación entre nodos (d_{ij}) debe ser menor al radio del alcance de transmisión de los mismos (R) para asegurar el establecimiento del enlace de comunicación. La red considerada es bidimensional y se organiza de forma similar a una retícula en la que los nodos se ubican en cada uno de los puntos de intersección de la misma.

1.2.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA RED

Para conseguir los objetivos planteados en este trabajo de investigación, es importante considerar algunas características de la red, tales como la conectividad, el diámetro, la cobertura y el grado nodal, con la finalidad de evaluar una combinación de estas características de la red e investigar el efecto de la movilidad y las fallas de los elementos de la red sobre el comportamiento de una red inalámbrica *ad-hoc*. En este análisis se asume que el sistema posee el protocolo de encaminamiento más apropiado para la red en cuestión. Otro parámetro importante a considerar es la cobertura como una fracción del área total en la que los nodos se encuentran localizados.

1.2.1.1 Conectividad

La conectividad de la red es una de sus características a analizar, un nivel de conectividad completo en una red implica que es posible establecer la comunicación entre cualquier par de nodos. Existen estudios previos que han analizado la conectividad en una red inalámbrica *ad-hoc* con capacidad de movilidad bidimensional. Una de las propiedades de una red más relevantes y ampliamente estudiadas es la conectividad. Se considera el establecimiento de un grafo de comunicación no dirigido que representa la red de sensores.

Sea n la cantidad de nodos sensores contenidos en el grafo que representa a la red, existe una frontera entre el nodo i y el nodo j en la que la distancia entre dichos nodos (d_{ij}) es menor que el alcance de transmisión R , esto es: ($d_{ij} < R$), al cumplirse la condición anterior implica que existe comunicación directa entre los nodos i y j .

Para que una red de sensores sea útil para desarrollar una aplicación, se requiere conocer varias propiedades de la red. El grado de un nodo es una propiedad que ha sido estudiada en el contexto de redes estáticas ya que es una medida de la resistencia del enlace del nodo a fallar.

Sin embargo, el modelo de fallas predominante que se utiliza en la mayoría de los modelos de redes de sensores contempla fallas de todos los enlaces de la red y no de un enlace individual. La tasa de fallas está en función del movimiento relativo entre nodos contiguos pero si las velocidades son reducidas y la transmisión es omni-direccional, no se presenta un problema mayor. Sin embargo, la conectividad no contempla todo el impacto sobre el desempeño general de un protocolo de alto nivel. Para eso, es importante conocer el número de enlaces intermedios (saltos) que existen entre el nodo fuente y el nodo destino. Para poder medir este parámetro, normalmente se propone emplear el diámetro de la red.

1.2.2.2 Diámetro

El diámetro de la red es otro parámetro importante, el cual es el diámetro del grafo de comunicación y está definido como la longitud del mayor enlace entre cualquier par de nodos en el grafo. El diámetro de la red está dado por el número máximo de enlaces intermedios (saltos) entre cualquier par de nodos. Al considerar el valor promedio del retardo en la comunicación entre dos nodos contiguos como $(\Delta\tau)$, entonces el retardo entre dos nodos cualesquiera de la red (τ_{ij}) que los separa un número de enlaces intermedios o saltos (s_{ij}) establece el límite superior del retardo en cualquier enlace de comunicación de la red, el cual está dado por el producto del número de saltos por el retardo promedio, esto es:

$$\tau_{ij} = \Delta\tau \cdot s_{ij} \quad (\text{I} - 2)$$

El conocimiento del diámetro de la red permite establecer un límite superior en el retardo de comunicación en la red. Este es un parámetro de particular interés en aplicaciones que poseen requerimientos especiales porque se desarrollan en *tiempo real*. El diámetro sólo tiene significado para los nodos que están en el mismo componente interconectado y por tanto, están dentro de su alcance mutuo.

1.2.2.3 Cobertura

El tercer parámetro a contemplar es la cobertura, la cual se define como el porcentaje del campo total de sensores que está cubierto por lo menos por un nodo. Un punto cubierto implica que el punto está en el alcance de transmisión de al menos un nodo del sistema.

Una relación que es importante considerar en la cobertura es la que existe entre los alcances de transmisión (R) y de medición del sensor (r) y que está dada por $\kappa = \frac{R}{r}$, por lo regular $R > r$.

El campo de sensores se considera como una región de reconocimiento que la red utiliza para ubicar al nodo destino. Una mayor cobertura en la red incrementa la probabilidad de una detección exitosa. Para esto se calcula un límite inferior de la cobertura ya que para un análisis exacto que contemple un campo rectangular y una región circular de transmisión resulta ineficiente en relación a la cantidad y complejidad de los cálculos necesarios para ubicar un nodo localizado arbitrariamente y no es viable su uso en una simulación que conste de múltiples pasos iterativos.

En varios modelos se considera el círculo de radio R , que representa la región de transmisión de un nodo. La FIGURA I – 3a muestra un cuadrado inscrito en la región de transmisión de un nodo, cuyos lados tienen una longitud $L_{STR} = \sqrt{2}R$, y se encuentra completamente cubierto por la región transmisión de dicho nodo. A esta zona se le denomina cuadrado en alcance de transmisión del nodo (*Square Transmission Range STR*).

Para estimar la cobertura del campo del sensor, al cuadrado inscrito en la región de transmisión se le divide en celdas cuadradas cuyos lados miden $L_c = (\sqrt{2}/4)R$, tal y como muestra la FIGURA I – 3b. Cada celda estará cubierta si existe un nodo en dicha celda o en alguna de las ocho celdas circundantes.

La FIGURA I – 3c muestra un nodo ubicado en el punto de intersección de la retícula. A este nodo lo cubre completamente una región cuadrada cuyo lado es $L_R = (\sqrt{2}/2)R$ que

corresponde a un cuadrante de la región cuadrada de transmisión (L_{STR}). De esta forma, la celda completa (i, j) está cubierta por este nodo. Para comprender lo anterior, considérese la FIGURA I – 3 que muestra cada una de las secciones en las que se divide la región de transmisión para el análisis de la cobertura.

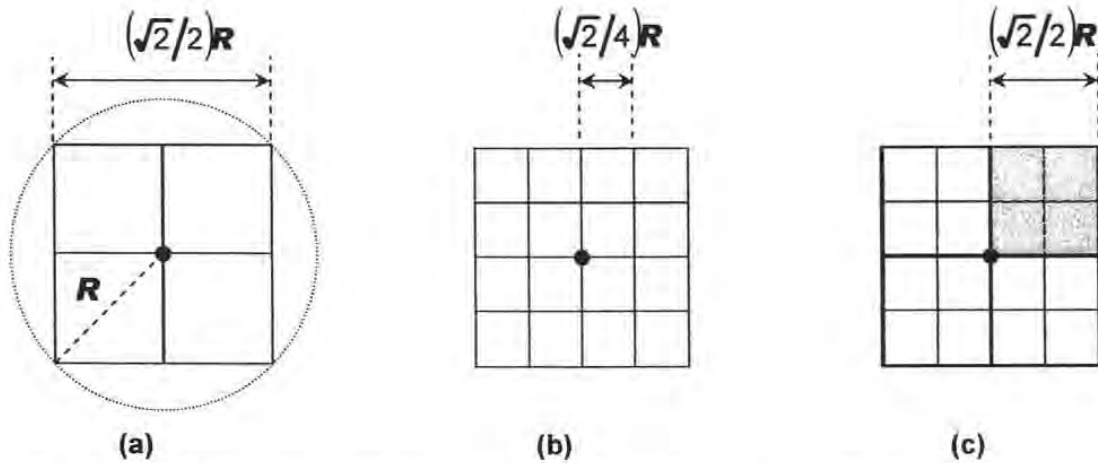


FIGURA I – 3 Secciones de la región de transmisión para el análisis de la cobertura.

1.2.2.4 Grado Nodal

El grado nodal de la red es una propiedad que ha sido estudiada dentro del contexto de una red estática ya que corresponde a la medida de la resistencia del nodo respecto a las fallas en el enlace de comunicación con los nodos circundantes. Un alto grado nodal indica que el nodo es tolerante a un alto número de fallas en el enlace de comunicación entre sus nodos circundantes, permitiéndole permanecer conectado a la red.

El grado nodal en torno a un nodo en particular (nodo u), definido como $d(u)$, es el número de nodos que se encuentran dentro del alcance de transmisión del nodo analizado. El grado nodal promedio $\bar{d}(u)$ para n nodos está dado por:

$$\bar{d}(u) = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n d(u) \quad (I-3)$$

Para una red estática bidimensional con n nodos cada uno con un radio de transmisión R y dispersos en un área A la densidad de nodos está dada por $\rho = n/A$. La probabilidad de que se presente un grado nodal de cero es $P(d(u) = 0) = e^{-\rho\pi R^2}$ para un alto número de nodos n distribuidos en el área A . La probabilidad de que la red no presente un nodo aislado es igual a la probabilidad de que cada nodo tenga por lo menos un nodo circundante (vecino), y puede determinarse mediante $P(d(u) \geq 0) = (1 - P(d(u) = 0))^n = (1 - e^{-\rho\pi R^2})^n$.

1.3 EFECTOS DE PROPAGACIÓN EN EL CANAL INALÁMBRICO

El término general *fluctuación* se utiliza para describir las variaciones en la envolvente de la señal de radiofrecuencia transmitida por el canal inalámbrico. Sin embargo, es necesario diferenciar dos tipos de fenómenos que explican dichas fluctuaciones, que dependen del intervalo de observación (a pequeña o gran escala). Las fluctuaciones a pequeña escala muestran fluctuaciones abruptas en la envolvente de la señal y las fluctuaciones a gran escala ocasionan variaciones promedio más lentas.

La potencia recibida de la señal o las pérdidas por trayectoria son el parámetro más importante a predecir por los modelos de propagación en escenarios de gran escala. Los factores más importantes que determinan y describen las pérdidas por trayectoria son los siguientes:

Reflexión sucede cuando una señal de radiofrecuencia incide sobre un objeto cuyas dimensiones son relativamente grandes respecto a la longitud de onda de la señal que se propaga. El fenómeno de reflexión es ocasionado, principalmente, por la superficie terrestre y la de edificios, muros y otras obstrucciones similares.

Difracción ocurre cuando la trayectoria seguida por una señal de radiofrecuencia entre el transmisor y el receptor se ve obstruida por una superficie con extremos afilados. Esto ocasiona que ondas secundarias surjan (en cualquier dirección) desde la superficie obstructora.

Existe la posibilidad de que las ondas secundarias puedan rodear al obstáculo y provean de una línea de vista artificial entre el transmisor y el receptor. Al igual que el fenómeno de reflexión, la difracción depende de la frecuencia, amplitud, fase y el ángulo de arribo de la onda electromagnética incidente.

Dispersión sucede cuando las ondas electromagnéticas se propagan a través de un medio que presenta objetos con dimensiones inferiores comparadas con la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia. En estos casos, el número de partículas por unidad de volumen resulta relativamente alto. Comúnmente, las ondas dispersas se presentan cuando la señal de radiofrecuencia incide sobre superficies rugosas o pequeños objetos presentes en el canal.

1.3.1 MODELO DE PÉRDIDAS DE TRAYECTORIA POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

El caso más simple es el modelo de pérdidas de trayectoria por propagación en el espacio libre, dado que se ignora la influencia de cualquier obstáculo presente en el medio. Se considera una antena transmisora isotrópica en la que la densidad de flujo de potencia que radia se distribuye uniformemente en todas direcciones. El modelo de pérdidas de trayectoria por propagación en el espacio libre describe la cantidad de potencia disponible en la antena receptora que se encuentra a una distancia d de la antena transmisora que se considera situada en el centro de una esfera de radio R ($0 \leq R \leq d$).

La densidad de potencia distribuida (P_d) en la superficie de la esfera de radio d es:

$$P_d = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{I-4})$$

donde:

P_T : Potencia promedio de transmisión [W]

En este modelo, la potencia captada por la antena receptora solo está en función de la potencia transmitida, la distancia entre el transmisor y receptor, así como de las características de las antenas, esto es:

$$P_r = P_d A_e = \frac{P_t A_e}{4\pi d^2} \quad [\text{W}] \quad (\text{I-5})$$

donde:

A_e : Apertura efectiva de la combinación de la antena receptora y la transmisora [m²]

La relación entre el área efectiva y las ganancias de transmisión y recepción es:

$$G = G_T G_R = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad [-] \quad (\text{I-6})$$

Al sustituir la apertura efectiva por su relación con las ganancias de las antenas receptora y transmisora se obtiene la ecuación de Friis, dada por:

$$P_R(d) = \eta G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_T = \frac{K}{d^2} P_T \quad [\text{W}] \quad (\text{I-7})$$

donde:

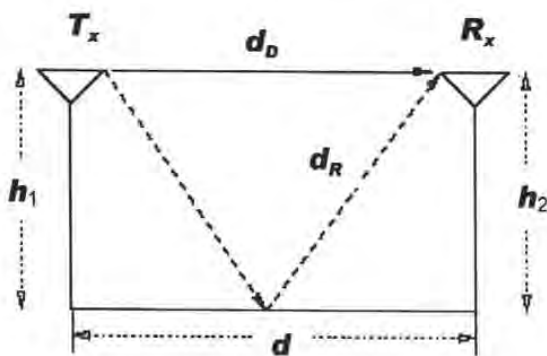
- P_T : Potencia promedio de transmisión [W]
- G_T : Ganancia de la antena transmisora [-]
- $P_R(d)$: Potencia de recepción [W]
- G_R : Ganancia de la antena receptora [-]
- λ : Longitud de onda de la señal portadora [m]
- d : Distancia entre el transmisor y el receptor. Válida sólo para distancias dentro de la región de Fraunhofer $d > d_f$ (región de campo lejano): el área alrededor de una antena en la cual la radiación aparenta provenir de un solo punto.
- $d_f = \frac{2D^2}{\lambda}$, donde D es la mayor dimensión de la antena [m]
- η : Factor de eficiencia del enlace (contempla las pérdidas de acoplamiento de las antenas transmisora y receptora y otros factores) [-]
- K : Factor de proporcionalidad, dado por: $K = \eta G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2$ [m²]

1.3.2 MODELO DE PÉRDIDAS POR TRAYECTORIA DE DOS RAYOS

El modelo de pérdidas por trayectoria de dos rayos es más realista, ya que considera una onda electromagnética que incide directamente sobre la antena y otra componente que resulta de una onda electromagnética reflejada por la superficie terrestre. Para este modelo se asume que no existen ondas electromagnéticas propagándose cerca de la superficie terrestre debido a que la altura de la antena es relativamente superior respecto a la longitud de la señal transmitida y, además, se considera que la superficie terrestre es *plana* ya que la distancia que separa a las antenas no es lo suficientemente grande como para que pueda influir la curvatura terrestre. La señal recibida por la antena en el modelo de dos rayos ($s_R(t)$) se representa mediante:

$$s_R(t) = E_0 \cos(2\pi f_c t) + \alpha E_0 \cos(2\pi f_c (t - \tau) + \phi) \quad (I-8)$$

La FIGURA I – 4 muestra el diagrama utilizado para el análisis del modelo de pérdidas por trayectoria de dos rayos.



$$d_R = \sqrt{d^2 + (h_2 + h_1)^2}$$

$$d_D = \sqrt{d^2 + (h_2 - h_1)^2}$$

$$d_R \approx d \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_2 + h_1}{d} \right)^2 \right)$$

$$d_D \approx d \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right)^2 \right)$$

FIGURA I – 4 Modelo de pérdidas por trayectoria de dos rayos.

donde:

- f_c : Frecuencia de la señal portadora de la onda electromagnética.
- α : Factor de atenuación de la señal reflejada.
- τ : Retardo en el tiempo del arribo de la señal reflejada respecto al de la señal directa.
- ϕ : Diferencia de fase entre la señal reflejada y la señal que incide directamente.

Si se considera que $d \gg |d_R - d_D|$ y $d \gg \sqrt{h_1 h_2}$ entonces: $\alpha \approx 1$ y $\phi \approx \pi$ (condiciones de reflexión perfecta). Entonces, la señal recibida por la antena en el modelo de dos rayos ($s_r(t)$) puede ser representada por:

$$s_r(t) = 2E_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi f_c \tau}{2}\right) \cos(2\pi f_c t + \psi) \quad (\text{I-9})$$

Su amplitud está dada por:

$$|s_r(t)| = 2E_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi f_c \tau}{2}\right) \quad (\text{I-10})$$

Como $d \gg \sqrt{h_1 h_2}$; entonces: $|d_R - d_D| \approx \frac{2h_1 h_2}{d}$ (I-11)

El retardo en el arribo de la señal reflejada respecto al de la señal directa es:

$$\tau = \frac{|d_R - d_D|}{c} = \frac{|d_R - d_D|}{\lambda f_c} = \frac{2h_1 h_2}{\lambda f_c d} \quad (\text{I-12})$$

Entonces, la amplitud de la señal recibida es:

$$|s_r(t)| = 2E_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d}\right) \quad (\text{I-13})$$

La potencia de la señal recibida es:

$$P_R = |s_r(t)|^2 = 4E_0^2 \text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d}\right) \quad (\text{I-14})$$

Como $\lambda d \gg 2\pi h_1 h_2$ entonces:

$$\text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d}\right) \approx \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d}\right)^2 \quad (\text{I-15})$$

Al igualar $E_0^2 = \frac{P_T G_T A_e}{4\pi d^2}$, se obtiene que la potencia de recepción está dada por:

$$P_R \approx 4 \frac{P_T G_T A_e}{4\pi d^2} \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right)^2 \approx 4\pi G_T A_e \left(\frac{h_1 h_2}{\lambda d^2} \right)^2 P_T \approx \frac{\tilde{\kappa}}{d^4} P_T \quad (I-16)$$

donde:

$$\tilde{\kappa} = 4\pi G_T A_e \left(\frac{h_1 h_2}{\lambda} \right)^2 \quad (I-17)$$

Algunos investigadores han desarrollado varios modelos empíricos y semi – empíricos para poder estimar las pérdidas por trayectoria entre un transmisor y un receptor a cierta distancia de separación en ambientes específicos y operando a diferentes frecuencias. En general, dichos modelos pueden representarse mediante una expresión de la forma:

$$P_R(d) \approx \frac{K}{d^n} P_T \quad (I-18)$$

Las constantes K y n se ajustan según los resultados de las mediciones realizadas en el área de operación que ha de considerarse. Usualmente, el factor K depende de la frecuencia de operación, así como de la altura entre el transmisor y el receptor, debiendo definirse junto con el exponente n . Por lo regular, la potencia recibida a la distancia d está referida a una potencia recibida a la distancia de referencia (d_0), esto es:

$$P_R(d) \approx P_R(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (I-19) \quad \text{donde:} \quad d > d_0 \geq d_r \quad \text{y} \quad d_r = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Generalmente, en estos modelos se contemplan medidas promedio que consideran ambientes en donde se tienen condiciones en las que los enlaces están en línea de vista y otras en las que los enlaces están cercanos a la línea de vista, por lo que los diferentes efectos de estas condiciones sobre el fenómeno de propagación se engloban en el parámetro n del modelo.

1.3.3 FLUCTUACIONES LENTAS

En los modelos de pérdidas por trayectoria se intenta realizar un cálculo determinístico de las pérdidas que se presentan para una determinada posición entre el transmisor y el receptor. En realidad, la posición de un receptor involucra la presencia de objetos en el ambiente circundante, en la trayectoria de transmisión y el terreno. Se han efectuado una gran variedad de mediciones bajo diferentes condiciones, observándose variaciones estadísticas en dichas mediciones.

Para una frecuencia de operación y una distancia dadas, se han medido diferentes valores de la potencia de recepción. Por tanto, aunque la frecuencia, la distancia y la potencia de transmisión se mantengan constantes, la potencia de la señal recibida posee un comportamiento no determinístico, ya que varía dependiendo de los objetos presentes en el entorno. Estas variaciones son estocásticas y dependientes de la ubicación y se les denomina efectos por bloqueo (*shadowing*) denotados por $a_s(\mathbf{f})$. Dichas variaciones permanecerán constantes, siempre y cuando el receptor y su entorno se mantengan estáticos.

Los efectos por bloqueo reflejan las diferencias en la potencia de la señal recibida en relación al valor teórico que proporcionan las fórmulas de los distintos modelos de pérdidas por trayectoria. Pero se ha encontrado que el valor promedio de varios de los niveles de potencia de la señal recibida en el transcurso del tiempo para una misma distancia, se acerca al valor dado por los modelos de pérdidas por trayectoria.

Los efectos por bloqueo son una abstracción que describe el resultado de la suma de varios fenómenos de propagación que ocurren cuando una onda electromagnética se propaga en un ambiente, tales como la reflexión (sobre edificios y el suelo), difracción (en torno a los edificios), refracción (a través de muros o ventanas), dispersión (sobre estructuras, árboles o el suelo) y absorción (árboles de bosques o parques).

El cálculo de los efectos de cada uno de los fenómenos para cada ubicación no es confiable (en algunos casos resulta incluso imposible) debido a la complejidad de los mismos y a limitaciones en el tiempo de medición. Los efectos de bloqueo describen la influencia agregada de todos estos fenómenos. Los objetos que ocasionan estas variaciones son de tales dimensiones que un receptor que se mueve siguiendo una trayectoria en línea recta a una distancia constante del transmisor se demorará varios milisegundos para cambiar a un área con diferentes características.

A partir de mediciones de las pérdidas por trayectoria para una gran variedad de ambientes y distancias, se han calculado las variaciones de los niveles de potencia de la señal recibida respecto al valor promedio que predicen los modelos de pérdidas por trayectoria. La función de densidad de probabilidad es normal con valor medio 0 [dB], la cual implica una distribución log-normal de la potencia recibida en torno al valor medio correspondiente dado por las pérdidas por trayectoria. La teoría básica de la distribución log-normal indica que diferentes señales experimentan efectos de reflexión y difracción aleatorios al ir atravesando el medio de propagación en el que se encuentran objetos en el ambiente circundante.

Las pérdidas adicionales, expresadas en decibeles, corresponden a un factor aleatorio que se obtiene al substrair el valor estimado por las pérdidas por trayectoria. Como las trayectorias de propagación son diferentes, la suma de todas las pérdidas (en decibeles) para un gran número de trayectorias de propagación consideradas converge a una variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad normalmente distribuida. Al pasar a unidades naturales, ésta se convierte en una variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad log-normal. La probabilidad de que sucedan variaciones en las pérdidas por trayectoria, debidas a los efectos por bloqueo, puede calcularse mediante la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$p(\mathbf{a}_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\left(\frac{\mathbf{a}_s^2}{2\sigma_s^2}\right)} \quad (\text{I} - 20)$$

donde:

σ_s : Variabilidad de la señal que describe los efectos por bloqueo $\mathbf{a}_s(\mathbf{t})$

1.3.4 FLUCTUACIONES RÁPIDAS

Las fluctuaciones rápidas o fluctuaciones a pequeña escala son provocadas, principalmente, por la recepción de réplicas de la señal transmitida que son el resultado de la reflexión de esta señal al incidir sobre los objetos presentes en el ambiente circundante.

Cuando el ancho de banda de la señal transmitida es bastante extenso, la diferencia en el tiempo de llegada de la señal al receptor debida al tiempo de la propagación es un factor que debe ser considerado, en especial cuando la duración de este tiempo se aproxima a la duración de un símbolo de la información transmitida. Sea la señal transmitida $\mathbf{s}_T(\mathbf{t})$ descrita por:

$$\mathbf{s}_T(\mathbf{t}) = \mathbf{Re}\{\mathbf{m}(\mathbf{t})e^{j2\pi f_c \mathbf{t}}\} \quad (\text{I-21})$$

En el receptor se captan un conjunto de señales que han seguido diferentes trayectorias (trayectorias múltiples) al reflejarse en los objetos presentes en el ambiente circundante. El conjunto de señales recibidas $\mathbf{s}_R(\mathbf{t})$ estarán dadas por:

$$\mathbf{s}_R(\mathbf{t}) = \mathbf{Re}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{A}_{ki} \mathbf{m}(\mathbf{t} - \tau_i) e^{j2\pi(f_c + f_d \cos \theta_{ki})\mathbf{t} + \phi_{ki}}\right\} \quad (\text{I-22})$$

$$\mathbf{s}_R(\mathbf{t}) = \mathbf{Re}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{c}_i(\mathbf{t}) \delta(\mathbf{t} - \tau_i) \otimes \mathbf{m}(\mathbf{t}) e^{j2\pi f_c \mathbf{t}}\right\} = \mathbf{Re}\left\{[\mathbf{c}(\mathbf{t}; \tau) \otimes \mathbf{m}(\mathbf{t})] e^{j2\pi f_c \mathbf{t}}\right\} \quad (\text{I-23})$$

$$\text{donde:} \quad \mathbf{c}_i(\mathbf{t}) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_{ki} e^{j2\pi f_d \cos \theta_{ki} \mathbf{t} + \phi_{ki}} \quad ; \quad \mathbf{c}(\mathbf{t}; \tau) = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{c}_i(\mathbf{t}) \delta(\mathbf{t} - \tau_i) \quad (\text{I-24})$$

- $\mathbf{c}(\mathbf{t}; \tau)$: Perfil de retardo instantáneo, donde $\mathbf{c}_i(\mathbf{t})$ son variables aleatorias que poseen una función de densidad de probabilidad *gaussiana*.
- \mathbf{A}_{ki} : Amplitud de la señal recibida que ha seguido la *i*-ésima trayectoria
- ϕ_{ki} : Fase de la señal recibida que ha seguido la *i*-ésima trayectoria
- θ_{ki} : Ángulo de incidencia respecto al receptor de la señal recibida que ha seguido la *i*-ésima trayectoria
- τ_i : Retardo en el tiempo debido a la propagación de la señal recibida que ha seguido la *i*-ésima trayectoria

La densidad espectral de potencia $\mathbf{S}_i(f)$ y la potencia promedio \mathbf{P}_{0i} de cada señal $\mathbf{c}_i(\mathbf{t})$ están dadas por:

$$\mathbf{S}_i(f) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{P}_{0i} \delta(f - f_d \cos \theta_{ki}) \quad (\text{I-25})$$

$$\mathbf{P}_{0i} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_{ki}^2 \quad (\text{I-26})$$

La potencia total de las señales recibidas \mathbf{P}_0 estará dada por:

$$\mathbf{P}_0 = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{P}_{0i} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mathbf{A}_{ki}^2}{2} \quad (\text{I-27})$$

La densidad espectral de potencia $\mathbf{S}_{dB}(f)$ define una función espectral, en términos del retardo en el tiempo y del cambio en frecuencia debido al efecto Doppler, mediante:

$$\mathbf{S}_{dB}(f) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mathbf{A}_{ki}^2}{2} \delta(f - f_d \cos \theta_{ki}) \delta(\tau - \tau_i) \quad (\text{I-28})$$

Para la función $\mathbf{S}_{dB}(f)$ se utiliza la siguiente expresión que se utiliza para evaluar varias de las técnicas que contrarrestan el desvanecimiento selectivo en frecuencia.

$$\mathbf{S}_{dB}(f) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\mathbf{P}_{0i}}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}} \delta(\tau - \tau_i) \quad (\text{I-29})$$

La densidad espectral de potencia $\mathbf{S}_{dB}(f)$ del modelo de Rayleigh es:

$$\mathbf{S}_{dB}(f) = \frac{\mathbf{P}_{00}}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}} \delta(\tau) + \frac{\mathbf{P}_{01}}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}} \delta(\tau - \tau_1) \quad (\text{I-30})$$

$$\mathbf{c}(\mathbf{t}; \tau) = \mathbf{c}_0(\mathbf{t}) \delta(\tau) + \mathbf{c}_1(\mathbf{t}) \delta(\tau - \tau_1)$$

Este modelo es válido cuando la duración de un símbolo de información es mayor al máximo tiempo de retardo experimentado por la señal retrasada. Una de las más importantes ventajas de este modelo está relacionada con la simplicidad y eficiencia que proporciona para analizar la operación básica de algunas técnicas que contrarrestan las fluctuaciones selectivas en frecuencia.

Un modelo simple de propagación de ondas electromagnéticas siguiendo condiciones de trayectorias múltiples en exteriores es el que involucra el ángulo de incidencia al receptor de la señal recibida que ha seguido la i -ésima trayectoria θ_i con respecto al movimiento del receptor. Este movimiento produce una variación en frecuencia f_i , dada por la siguiente expresión:

$$f_i = f_d \cos \theta_i \quad (\text{I-31})$$

$$f_d = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}} f_c = \frac{\mathbf{v}}{\lambda} \quad (\text{I-32})$$

donde:

- f_d : Máxima variación en frecuencia debida al efecto Doppler
- \mathbf{v} : Velocidad relativa entre el receptor y el transmisor
- \mathbf{c} : Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas
- f_c : Frecuencia de la señal portadora de las ondas electromagnéticas
- λ : Longitud de onda de la señal portadora de las ondas electromagnéticas

Para este caso, si la señal transmitida $\mathbf{s}_T(\mathbf{t})$ puede ser descrita por:

$$\mathbf{s}_T(\mathbf{t}) = \mathbf{Re}\{m(\mathbf{t})e^{j2\pi f_c \mathbf{t}}\} \quad (\text{I-33})$$

Entonces, el conjunto de señales con trayectorias múltiples recibidas $\mathbf{s}_R(\mathbf{t})$ son:

$$\mathbf{s}_R(\mathbf{t}) = \mathbf{Re}\left\{\sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{A}_i m(\mathbf{t}) e^{j2\pi(f_c + f_d \cos \theta_i)\mathbf{t} + \phi_i}\right\} = \mathbf{Re}\{c(\mathbf{t})m(\mathbf{t})e^{j2\pi f_c \mathbf{t}}\} \quad (\text{I-34})$$

$$c(\mathbf{t}) = c_i(\mathbf{t}) + j c_q(\mathbf{t}) \quad (\text{I-35})$$

$$c_i(\mathbf{t}) = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{A}_i \cos(2\pi(f_c + f_d \cos \theta_i)\mathbf{t} + \phi_i) \quad (\text{I-36})$$

$$c_q(\mathbf{t}) = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{A}_i \sen(2\pi(f_c + f_d \cos \theta_i)\mathbf{t} + \phi_i) \quad (\text{I-37})$$

donde:

- \mathbf{A}_i : Amplitud de la señal recibida que ha seguido la i -ésima trayectoria
- ϕ_i : Fase de la señal recibida que ha seguido la i -ésima trayectoria
- θ_i : Ángulo de incidencia al receptor de la señal recibida que ha seguido la i -ésima trayectoria

La potencia promedio \mathbf{P}_0 de la señal recibida es:

$$\mathbf{P}_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_i^2 \quad (\text{I-38})$$

La densidad espectral de potencia de la señal compuesta $\mathbf{c}(\mathbf{t})$ es:

$$\mathbf{S}(f) = \frac{\mathbf{P}_0}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_d}\right)^2}} \quad (\text{I-39})$$

Se considera que la cantidad de señales con trayectorias múltiples es grande, las componentes en fase $\mathbf{c}_i(\mathbf{t})$ y en cuadratura $\mathbf{c}_q(\mathbf{t})$ son variables aleatorias conjuntas con función de densidad de probabilidad del tipo *gaussiana* con valor medio cero, estadísticamente independientes entre si y uniformemente distribuidas. La función de densidad de probabilidad conjunta puede ser definida por:

$$\mathbf{p}(\mathbf{c}_i, \mathbf{c}_q) = \frac{1}{2\pi\mathbf{P}_0} e^{-\left(\frac{\mathbf{c}_i^2 + \mathbf{c}_q^2}{2\mathbf{P}_0}\right)} \quad (\text{I-40})$$

Convirtiendo la señal compuesta $\mathbf{c}(\mathbf{t})$ a coordenadas polares, esto es:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}(\mathbf{t}) &= \mathbf{c}_i(\mathbf{t}) + j\mathbf{c}_q(\mathbf{t}) = \mathbf{r}(\mathbf{t})e^{j\theta(\mathbf{t})} \\ \mathbf{r}(\mathbf{t}) &= \sqrt{\mathbf{c}_i^2(\mathbf{t}) + \mathbf{c}_q^2(\mathbf{t})} \\ \theta(\mathbf{t}) &= \tan^{-1}\left(\frac{\mathbf{c}_q(\mathbf{t})}{\mathbf{c}_i(\mathbf{t})}\right) \end{aligned} \quad (\text{I-41})$$

La función de densidad de probabilidad se transforma en:

$$\begin{aligned}
 p(\mathbf{r}, \theta) &= p(\mathbf{r})p(\theta) \\
 p(\mathbf{r}) &= \frac{\mathbf{r}}{P_0^2} e^{-\left(\frac{\mathbf{r}^2}{2P_0^2}\right)} \\
 p(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \\
 p(\mathbf{r}, \theta) &= \frac{\mathbf{r}}{2\pi P_0^2} e^{-\left(\frac{\mathbf{r}^2}{2P_0^2}\right)}
 \end{aligned} \tag{I-42}$$

La envolvente de esta función de densidad de probabilidad posee una distribución Rayleigh, y la fase θ posee una distribución uniforme en el intervalo $\theta \in (-\pi, \pi)$.

Las fluctuaciones rápidas pueden ser analizadas con el Modelo de Rayleigh cuando:

- El canal de radiofrecuencia móvil es de banda angosta o con fluctuaciones planas (*flat fading*)
- El ancho de banda utilizado por la señal es más angosto que el ancho de banda del canal
- El transmisor o el receptor se encuentran inmersos en un ambiente saturado de objetos, por lo que no existe una componente de la señal que arribe en línea de vista desde el transmisor al receptor
- La función de densidad de probabilidad Rayleigh de la señal recibida es:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{\mathbf{r}^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{I-43} \quad \text{para: } 0 \leq \mathbf{r} < \infty$$

Las fluctuaciones rápidas pueden ser analizadas con el Modelo de Rice cuando:

- Existe una componente dominante de la señal que arriba en línea de vista del transmisor al receptor
- Las componentes aleatorias de la señal que arriban en diferentes ángulos se superponen sobre una señal estacionaria
- La función de densidad de probabilidad de Rice de la señal recibida es:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r}}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{\mathbf{r}^2 + \mathbf{A}^2}{2\sigma^2}\right)} I_0\left(\frac{\mathbf{A}\mathbf{r}}{\sigma^2}\right) \tag{I-44} \quad \text{para: } 0 \leq \mathbf{r} < \infty \quad ; \quad \mathbf{A} \geq 0$$

- Las fluctuaciones pueden ser descritas por un solo parámetro, denominado K , que es la relación entre la potencia de la señal determinística y la varianza de las señales con trayectorias múltiples, es decir:

$$K = 10 \log(\mathbf{A}^2/2\sigma^2) \tag{I-45}$$

La FIGURA I-5 muestra los efectos de propagación a gran escala (pérdidas por trayectoria, fluctuaciones lentas y rápidas) que afectan a una transmisión inalámbrica.

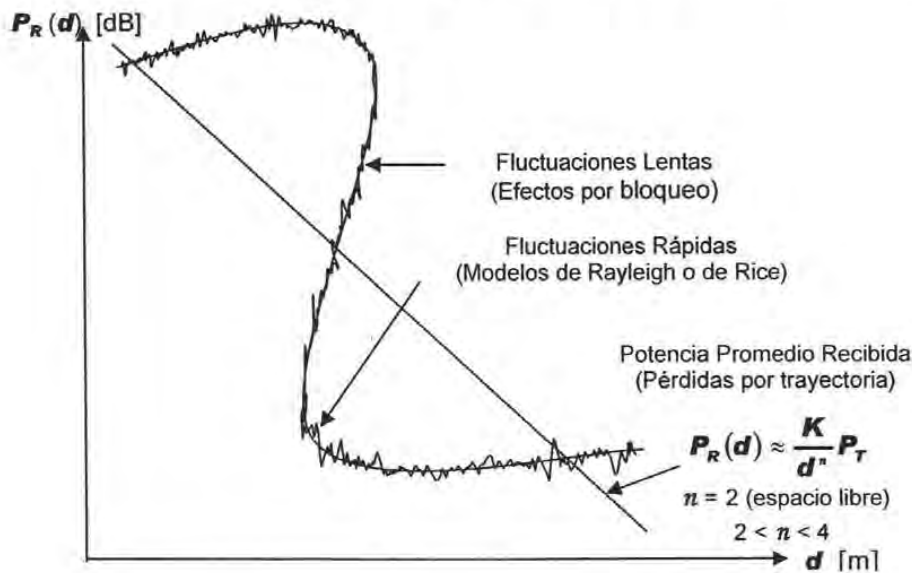


FIGURA I - 5 Efectos de propagación a gran escala en una transmisión inalámbrica.

1.3.5 EFECTO DOPPLER

La rapidez de propagación de las ondas electromagnéticas (c) se mantiene constante sin importar la velocidad relativa entre el emisor (v_T) y la del receptor (v_R). Sin embargo, por el movimiento relativo entre ambos, la longitud de onda de las ondas electromagnéticas (λ) resulta afectada y su frecuencia (f) debe cambiar para mantener su producto, que es la velocidad de propagación ($c = \lambda f$), siempre constante. A estas variaciones en frecuencia se les denomina corrimientos por efecto Doppler, ya que el físico austriaco Christian Doppler (1803 – 1853) las predijo por primera vez. Las ecuaciones que explican el efecto Doppler con base en la teoría clásica son:

$$f_D = f_c \frac{c \pm v_R}{c \mp v_T} = f_c \left(1 \pm \frac{v_T + v_R}{c \mp v_T} \right) = f_c \pm f_d \quad (I-46)$$

$$f_d = f_c \left(\frac{v_T + v_R}{c \mp v_T} \right) \approx f_c \left(\frac{v_T + v_R}{c} \right) ; \quad c \gg v_T \quad (I-47)$$

$$f_d \approx f_c \frac{v}{c} \approx \frac{v}{\lambda} \quad (I-48)$$

donde:

- c : Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas [m/s]
- $v = v_T + v_R$: Velocidad relativa del emisor y receptor en la línea que los une [m/s]
- f_c : Frecuencia de la señal portadora de las ondas electromagnéticas [Hz]
- $f_D = f_c \pm f_d$: Frecuencia producida por el efecto Doppler [Hz]
- f_d : Corrimiento en frecuencia producido por el efecto Doppler [Hz]

NOTA: Los signos superiores se aplican cuando el movimiento relativo entre el emisor y el receptor los acerca, mientras que los signos inferiores cuando el emisor y el receptor se alejan.

La FIGURA I-6 presenta la influencia del corrimiento en frecuencia debida al efecto Doppler sobre una transmisión inalámbrica móvil.

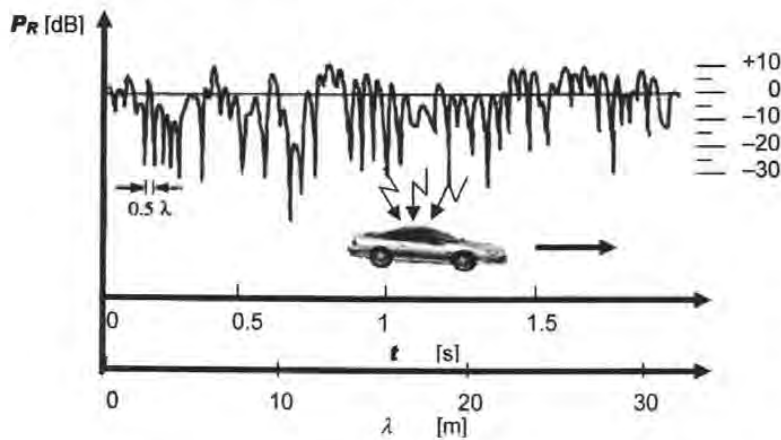


FIGURA I - 6 Influencia del Efecto Doppler sobre una transmisión inalámbrica.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar un estudio sobre la capacidad de movilidad en una red de sensores inalámbricos, así como para poder analizar los procesos que se involucran en las fases de descubrimiento, establecimiento, mantenimiento y validación del enlace de comunicación (ruta) entre cualquier par de nodos fuente y destino se requiere, en cierto grado, de algún método para estimar la localización de la estación destino por parte de la estación fuente.

2.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA POSICIÓN DE NODOS SENSORES

De manera general, los métodos para localizar los nodos en una red de sensores se basan en la determinación de distancias cartesianas entre los nodos. La entrada a considerar en estos métodos es un conjunto de nodos con posición conocida y un conjunto de distancias estimadas entre nodos. La salida es un conjunto de posiciones estimadas para todos los nodos del sistema. Además, la mayoría de estos métodos producen fronteras rectangulares alrededor de las posiciones estimadas. Al reducirse los límites del problema de localización, el área de las fronteras rectangulares disminuye.

Generalmente, el problema de localización se intenta resolver mediante cálculos lineales iterativos. Esto puede ser representado de forma geométrica como la reducción o minimización de una función lineal sobre un poliedro. Existen varias propuestas de aplicación de estos métodos a diferentes tipos de restricciones (radiales y angulares).

Los métodos para la estimación de la posición de los nodos sensores se pueden describir como procesos formados por dos etapas o fases: la estimación de la distancia entre los sensores, y la combinación de las distancias estimadas mediante los cálculos que sirven para determinar la posición de los sensores. Los métodos para la estimación de la posición de nodos sensores se pueden clasificar, partiendo de la técnica que se emplea para determinar la distancia que los separa. En las siguientes secciones de este capítulo se describirán algunos de los métodos para la estimación de la distancia entre los nodos.

2.2.1 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN POR RADIOFRECUENCIA

Los sistemas de localización por radiofrecuencia utilizan alguno de los siguientes métodos:

- **MEDICIÓN DEL TIEMPO DE ARRIBO DE LA SEÑAL RECIBIDA (TOA)**
- **MEDICIÓN DE LA DIFERENCIA DE TIEMPO ENTRE LOS ARRIBOS DE LAS SEÑALES (TDoA)**

En ambos sistemas de localización, la estimación de la distancia entre los nodos se realiza basándose en la medición de algún parámetro de referencia de la(s) señal(es) recibida(s), tales como el Tiempo de Arribo (*Time Of Arrival (TOA)*), la Diferencia de Tiempo entre Arribos (*Time Difference of Arrivals (TDoA)*). En términos generales, la estimación de la distancia se obtiene a partir de la diferencia de tiempo entre el instante en el que se recibieron las señales de radiofrecuencia menos el instante en el que se inició la transmisión. Esta diferencia de tiempo corresponde al tiempo de propagación de la señal de radiofrecuencia, por tanto, la distancia de separación se obtiene al multiplicar esta diferencia de tiempo por la velocidad de propagación de las señales electromagnéticas. Por lo general, el receptor estima el tiempo de propagación se efectúa a partir de operaciones de correlación entre señales de referencia preestablecidas y las señales captadas. Este tipo de sistemas requieren de una alta sincronización entre los equipos transmisores y receptores, lo cual se traduce en una alta complejidad y costo de los mismos.

A continuación, se describen algunas de las aplicaciones que utilizan alguno de estos dos métodos para la estimación de la distancia entre los nodos y los investigadores participantes:

GPS

Sistema de Localización Global, acrónimo de *Global Positioning System – GPS*, es un sistema de navegación por satélite de cobertura mundial desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Este sistema está conformado por un conjunto de 24 satélites y sus receptores correspondientes en la superficie terrestre.

Los 24 satélites están dispuestos en 6 planos de órbita media al rededor de la Tierra (*Middle Earth Orbit*) con una separación de 60° entre cada plano y con una inclinación de 55° del plano ecuatorial terrestre a una distancia aproximada de 20,200 [km] y con un periodo para completar una órbita de 12 horas. Los satélites del sistema **GPS** transmiten continuamente señales digitales de radiofrecuencia que contienen un conjunto de datos sobre la posición de los satélites y una base de tiempo exacta, estos datos son transmitidos a los receptores que se encuentran sobre la superficie terrestre. Los satélites están equipados con relojes atómicos que poseen una precisión que está dentro de un margen de una milmillonésima de segundo. Basados en esta información, los receptores pueden determinar el tiempo de propagación de la señal transmitida por los satélites, desde el momento que se inició su transmisión hasta el instante en que se recibió. Como las señales se propagan a la velocidad de la luz, es posible determinar la distancia que separa al receptor de cada satélite.

El receptor puede calcular su posición al conocer la distancia a la que se encuentra de los satélites que está captando. Si el receptor capta las señales de, por lo menos, cuatro satélites entonces puede determinar, con gran precisión, su ubicación en términos de su longitud, latitud y altitud.

El sistema **GPS** fue desarrollado y es operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Originalmente fue denominado Sistema de Navegación, Sincronización y Alcance **NAVSTAR** (*NAVigation System with Timing and Ranging*). Antes del desarrollo de las aplicaciones civiles, el sistema **GPS** fue utilizado para proveer de capacidades de navegación y sincronía, ante cualquier condición climática, a las fuerzas militares por tierra, mar y aire.

Las aplicaciones del sistema **GPS** van más allá de la navegación y determinación de localización. El sistema **GPS** puede ser empleado para los estudios cartográficos, forestales, exploración mineral, manejo del hábitat de animales salvajes, rastreo del movimiento de gente y objetos y sincronización de alta precisión a nivel mundial.

PinPoint Local Positioning System

El Sistema de Ubicación Local (*Local Positioning System – LPS*) es una tecnología emergente diseñada para alcanzar nuevos niveles de eficiencia y eficacia en los costos de almacenes y empresas de manufactura al permitirles un control instantáneo sobre el rastreo, localización y seguridad del inventario de su equipo, así como de su personal

El sistema **LPS** se basa en los conceptos operacionales del sistema **GPS**. Sin embargo, las señales del sistema **GPS** poseen un nivel de potencia tan bajo que presentan problemas de penetración a lugares confinados entre muros y otros obstáculos y la resolución para aplicaciones comerciales resulta insuficiente para establecer la ubicación de objetos en el interior de edificios. Esta tecnología emplea *etiquetas electrónicas (tags)*, controladores de celdas, arreglos de antenas discretas, señales de radiofrecuencia de baja potencia y algunos métodos para poder localizar, rastrear y controlar instantáneamente el inventario del equipo móvil o fijo de una compañía, así como de su personal. Las etiquetas electrónicas se comunican de manera inalámbrica con las antenas y los controladores de celdas. Los controladores de celdas calculan la posición del equipo y personal rastreado y proporcionan la información sobre la ubicación de cada uno en particular a través de la red de área local mediante una aplicación de búsqueda. Esta tecnología se puede personalizar y escalar. Este sistema ofrece rastreo de objetos con precisión, dentro de un margen de decenas de centímetros.

UWB Ranging

Este es un sistema que utiliza la tecnología de radio inalámbrica que transmite datos digitales sobre una amplia banda del espectro de frecuencia a un bajo nivel de potencia. Se puede transmitir a una alta tasa de transmisión para aplicaciones de una red de área local inalámbrica y a una baja tasa de transmisión para aplicaciones de telemetría.

Aún dentro de los límites de la potencia de transmisión, este sistema puede transmitir una gran cantidad de información a corta distancia y puede emitir señales de corta duración con un mayor alcance que pueden atravesar muros, puertas y otros obstáculos que bloquean a otro tipo de señales con anchos de banda más limitados y de mayores potencias.

Si se incrementan los niveles de potencia, las señales de este sistema pueden alcanzar coberturas más amplias. En lugar de utilizar las señales sinusoidales tradicionales, este sistema emplea pulsos digitales sincronizados con mucha precisión. El transmisor y el receptor deben estar coordinados para enviar y recibir los pulsos con una precisión dentro de un margen de billonésimas de segundo.

De esta forma, el sistema puede ser utilizado como un sistema de radiolocalización de alta resolución y precisión (en el orden de centímetros). Este sistema tiene las siguientes ventajas y características:

- Niveles de potencia extremadamente bajos
- Eficiencia espectral
- Excelente inmunidad a interferencia por canales múltiples
- Excelente características de penetración
- Relativo bajo costo

Esta tecnología tiene la capacidad de incluir comunicaciones inalámbricas, rastreo y detección. Entre las que aplicaciones de este sistema están:

- Redes inalámbricas locales
- Numerosas aplicaciones de seguridad pública que involucran la detección de movimiento a través de muros y otros obstáculos físicos.
- Rastreo de personal y equipo intramuros.
- Redes de área local de alta velocidad y redes de cobertura amplia
- Barreras de seguridad invisibles
- Sensores para la evasión de colisiones
- Sistemas de localización y rastreo de alta precisión

➤ MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA SEÑAL RECIBIDA

Estos sistemas de localización se basan en estimar la distancia de separación entre nodos mediante la medición de un Indicador de la Intensidad de la Señal Recibida (*Received Signal Strength Indicator (RSSI)*). La atenuación de una señal de radiofrecuencia está en función de la distancia que separa al nodo transmisor del nodo receptor, la relación es inversamente proporcional al cuadrado de dicha distancia (o incluso de orden mayor).

Con base en lo anterior, es posible determinar la distancia de separación entre el nodo transmisor y receptor a partir de la medición de la intensidad de la señal recibida. Esta medición es utilizada por el nodo receptor para estimar la distancia que lo separa de los demás nodos mediante el empleo de un modelo de ajuste por mínimos cuadrados para cada nivel de potencia. Una aproximación del modelo empleado se puede definir matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$P_R \approx \frac{k}{d^n} P_T \quad (\text{II} - 1)$$

Este modelo resulta inconsistente, ya que la intensidad de la señal recibida es afectada por varios factores, tales como la recepción de réplicas de la señal transmitida debida a los efectos de trayectorias múltiples, la atenuación ocasionada por los efectos de dispersión y de bloqueo de la señal de radiofrecuencia, así como la ubicación relativa que existe entre las antenas transmisora y receptora. A continuación, se describen algunas de las aplicaciones que utilizan este método para la estimación de la distancia entre los nodos y los investigadores participantes:

Microsoft RADAR

RADAR es un sistema que permite determinar la ubicación de nodos móviles conectados, mediante un enlace de radiofrecuencia, a una red de área local inalámbrica en el interior de edificios sin la necesidad de utilizar equipo especializado. La información de su localización se emplea en ciertos servicios y aplicaciones de rastreo.

El sistema consiste de una etapa de procesamiento digital de señales que combina técnicas de comparación de señales y un modelo que contempla las características del ambiente, el patrón de la movilidad y las restricciones topográficas con el fin de localizar y rastrear los nodos móviles, así como un servicio de rastreo de servicios que utiliza un esquema geográfico para ubicar posibles recursos (impresoras, digitalizadores, copiadoras, etc.) que se encuentren próximos al nodo móvil rastreado para brindarle permisos para su uso.

UW SpotON

UW SpotON es un sistema de localización que utiliza múltiples estaciones base que realizan la medición de la intensidad de la potencia de las señales presentes en el medio y proveen de una descripción de su distribución para una distancia aproximada. Un servidor central reúne estos valores para triangular la posición precisa de un objeto etiquetado electrónicamente (por medio de un código de identificación). Finalmente, las posiciones de los objetos calculadas por el servidor son publicadas para que puedan ser utilizadas por las aplicaciones del cliente.

➤ **MÉTODOS BASADOS EN TÉCNICAS DE PROXIMIDAD:**

Estos sistemas se basan en la estimación de la distancia que separa a los nodos por cálculos indirectos. Se basan en la percepción de la presencia de nodos vecinos (próximos o colindantes) y de compartir la información entre nodos. De esta forma, se puede calcular la distancia entre los nodos con el conocimiento de la posición de un cierto número de nodos de referencia.

A continuación, se describen una aplicación que utiliza este método para la estimación de la distancia entre los nodos y los investigadores participantes:

Sistema de Localización Ad – Hoc (*Ad-Hoc Positioning System (APS)*)

El Sistema de Localización Ad – Hoc (*Ad-Hoc Positioning System (APS)*) requiere, de por lo menos, 3 nodos de referencia o *semillas*, ubicados en posiciones que no estén sobre la misma línea. La distancia se estima a través de un método que utiliza protocolos basados en un Vector de Distancia (DV-based protocols). Este método se basa en el intercambio de información relacionada con la distancia entre nodos vecinos (próximos o colindantes).

La distancia se determina mediante un algoritmo que calcula la cantidad de saltos que existen entre el nodo al cual se quiere determinar su posición y los nodos de referencia (cuya posición es conocida previamente). Se utiliza un proceso de lateralización múltiple para mejorar la precisión de la posición estimada al combinar las distancias estimadas con los nodos de referencia. La función para estimar la distancia entre un nodo y los nodos de referencia es la siguiente:

$$d_{ij} = s_{ii} \frac{\sum \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{s_{ij}} \quad (\text{II} - 2)$$

donde:

- d_{ij} : Distancia que separa a cada nodo de referencia con el nodo al que se quiere estimar su distancia
- x_i, y_i : Coordenadas del nodo de referencia más cercano al nodo al que se quiere estimar su distancia
- x_j, y_j : Coordenadas de los demás nodo de referencia
- s_{ii} : Cantidad de saltos que separan al nodo de referencia más cercano del nodo al cual se desea estimar su distancia
- s_{ij} : Cantidad de saltos que separan al nodo de referencia más cercano de los demás nodos de referencia

Este método es el que se ha utilizado con mayor frecuencia en gran cantidad de trabajos de investigación, debido a que presenta una complejidad relativamente menor y una gran precisión. Por esta razón, se ha optado en considerar a este método de localización para aplicarlo en este estudio.

2.2.2 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN POR MÉTODOS ACÚSTICOS

En estos sistemas de localización, la estimación de la distancia se obtiene a partir de la diferencia de tiempo entre el instante en el que se recibió una señal ultrasónica menos el instante en el que se recibió una señal de radiofrecuencia. Esta diferencia de tiempo corresponde, prácticamente al tiempo de propagación de la señal ultrasónica, por tanto, la distancia recorrida se obtiene al multiplicar esta diferencia de tiempo por la velocidad de propagación de las señales ultrasónicas.

Este tipo de sistemas no requieren de una sincronización tan alta entre los equipos transmisores y receptores, pero si se emplean emisores y transductores ultrasónicos lo cual se traduce en un alto costo del equipo. La FIGURA II – 1 muestra un diagrama esquemático de un sistema de localización por métodos acústicos (ultrasónico).

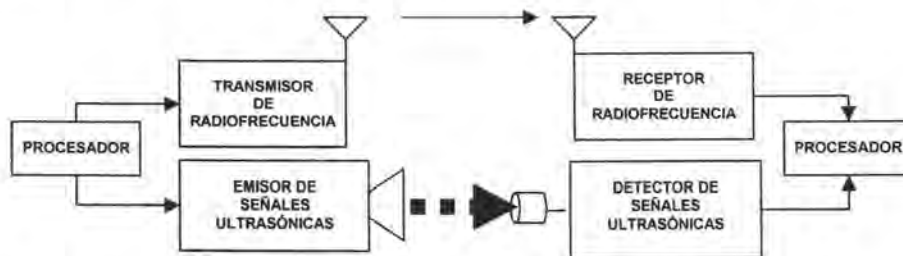


FIGURA II – 1 Diagrama esquemático de un sistema de localización ultrasónico.

$$d = ct_{RF} \quad (II - 3)$$

$$d = v_{US}t_{US} \quad (II - 4)$$

$$t_{US} - t_{RF} = \frac{d}{v_{US}} - \frac{d}{c} = \frac{(c - v_{US})d}{v_{US} \cdot c} \quad (II - 5)$$

$$d = v_{US} \cdot c \frac{t_{US} - t_{RF}}{(c - v_{US})} = v_{US} \frac{t_{US} - t_{RF}}{(1 - (v_{US}/c))} \quad (II - 6)$$

Pero, como: $c \gg v_{US}$ entonces:

$$d \approx v_{US}(t_{US} - t_{RF}) \quad (II - 7)$$

d :	Distancia que separa al transmisor del receptor	[m]
v_{US} :	Velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas	[m/s]
t_{US} :	Tiempo de propagación de las ondas ultrasónicas	[s]
c :	Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas	[m/s]
t_{RF} :	Tiempo de propagación de las ondas electromagnéticas	[s]

Active Bat

Este proyecto tiene la capacidad de localizar un nodo móvil (*insignia*) ubicado en el interior de un edificio. Las *insignias* poseen dispositivos electrónicos que transmiten señales ultrasónicas que son captadas por una serie de receptores que se encuentran alojados en el techo de cada piso del edificio y están espaciados en un cierto intervalo preestablecido, y por la baja potencia de transmisión que presentan, el alcance de las señales ultrasónicas está en un orden menor a las decenas de metros.

Cuando tres receptores captan la señal ultrasónica, pueden determinar el tiempo de propagación de esta señal, desde el nodo móvil. Luego, por técnicas de triangulación, la posición de la *insignia* puede ser determinada en tres dimensiones. Además, las *insignias* reciben información de control, a través de un enlace inalámbrico de radiofrecuencia. La FIGURA II – 2 corresponde a un diagrama del sistema *Active Bat*.

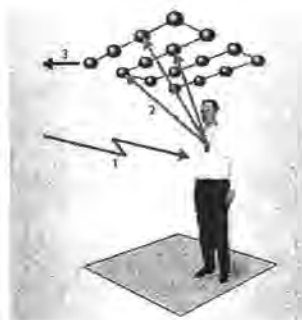


FIGURA II – 2 Diagrama de operación del sistema *Active Bat*.

Cricket

Este sistema emplea una combinación de señales de radiofrecuencia y de ultrasonidos para proveer de un servicio para el soporte de localización tanto a usuarios como a aplicaciones en lugares aislados como edificios. Sobre los muros y techos del interior del edificio se montan y distribuyen un conjunto de emisores de señales de radiofrecuencia (radiofaros o *beacons*) los cuales se encargan de transmitir información de localización (*anuncio*) a través de la señal de radiofrecuencia que emiten.

Por cada *anuncio* de radiofrecuencia que es enviado, el radiofaro transmite un pulso ultrasónico recurrente. Los receptores captan tanto las señales de radiofrecuencia como las ultrasónicas, las correlacionan entre ellas y determinan el espacio que existe entre ellos y los radiofaros. Los radiofaros utilizan un algoritmo de transmisión descentralizado y aleatorio con el fin de reducir las colisiones e interferencia entre ellos. Los receptores efectúan un algoritmo de descodificación para reducir los efectos producidos por las señales ultrasónicas de trayectorias múltiples (ecos) y la interferencia de las señales de radiofrecuencia.

2.2.3 MÉTODOS Y ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN

➤ MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE POSICIÓN

- Lateralización triple hiperbólica
- Lateralización múltiple
- Triangulación
- Estimación por Máxima Probabilidad (*Maximum Likelihood (ML)*)

La FIGURA II – 3 muestra algunos métodos para la estimación de la posición.

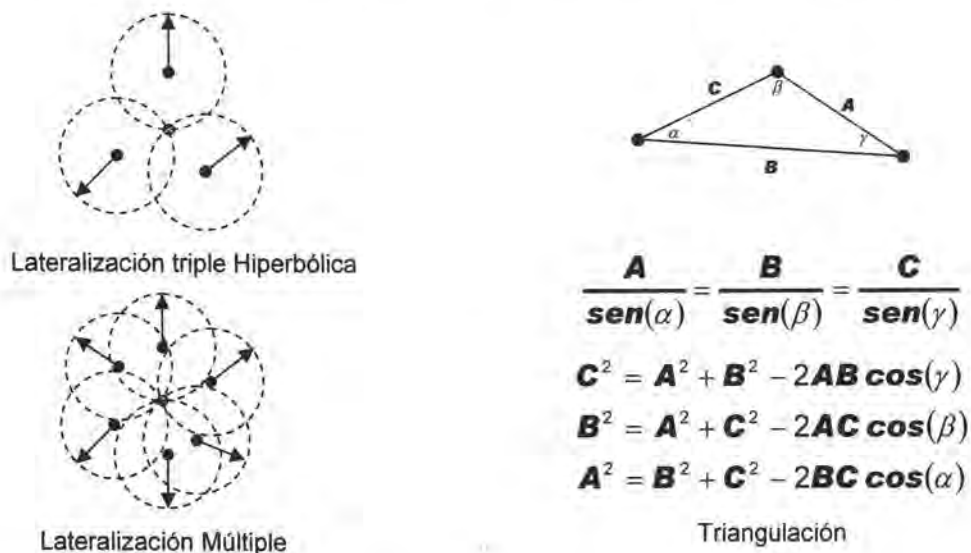


FIGURA II – 3 Métodos para la estimación de la posición de nodos sensores.

➤ **ALGORITMOS PARA LA ESTIMACIÓN DE POSICIÓN (*POSITION ESTIMATION ALGORITHMS*)**

- Optimización Convexa para la Estimación de la Posición (*Convex Optimization for Position Estimation*)
- Triangulación Iterativa (*Iterative Triangulation*)
- Lateralización Múltiple Iterativa y por Colaboración (*Collabortative Iterative Multilateration*)
- Localización del Centroide (*Centroid Localization*)
- Localización Amorfa (*Amorphous Localization*)
- Métodos por el Vector Fiedler (*Fiedler Vector methods*)
- Localización por Saltos (*DV-Hop Localization*)
- Estimación lineal por el método de Bayes
- Estimación por lateralización múltiple (*ML estimation*)
- Estimación no lineal por el método de Bayes
- Estimación por mínimos cuadrados

TABLA II – 1 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE NODOS SENSORES

MÉTODOS	PROPIEDADES							PROBLEMAS QUE DEBEN REDUCIR
	PRECISIÓN	ALCANCE [m]	CONFIABILIDAD EN LA MEDICIÓN	REQUERIMIENTOS	ERROR EN LA MEDICIÓN	COSTO	AMBIENTE	
ACÚSTICOS (ULTRASONÍCOS)	cm	1 – 10	FACILIDAD EN SU PREDICCIÓN NO influyen tanto las señales de trayectorias múltiples y sombras	Los sensores necesitan transductores y amplificadores de señales ultrasónicas	El error en línea de vista (LOS) es del tipo <i>gaussiano</i> e independiente de la distancia El error cercano a la línea de vista (NLOS) presenta una variación no gaussiana de gran magnitud	Transmisores y Receptores de Alto Costo	Tolerante a diferentes ambientes	Interferencia Obstáculos Señales de trayectorias múltiples
RADIOFRECUENCIA	m	10 – 100	DIFICULTAD EN SU PREDICCIÓN Influyen las señales de trayectorias múltiples y de las sombras	La intensidad de la señal debe estar disponible para el sensor	El error promedio y el error a largo plazo pueden ser influidos por los desvanecimientos. las señales de trayectorias múltiples en interiores causan problemas e incrementan el error	Transmisores y Receptores de Mediano Costo	Mejor comportamiento en ambientes previsibles	Grandes variaciones en la intensidad de las señales Señales de trayectorias múltiples y Sombras Efectos por desvanecimientos

CAPÍTULO III

PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO Y CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

Para alcanzar el objetivo principal de este trabajo de investigación, el cual consiste en determinar el límite máximo en la velocidad a la que pueden moverse los nodos de una red de sensores inalámbricos, es necesario encontrar o determinar los siguientes parámetros:

1. El tiempo promedio de establecimiento de la ruta. – es decir el lapso que debe transcurrir para que se establezca una ruta de comunicación que enlace el nodo fuente con el nodo destino.
2. El tiempo promedio de permanencia de la ruta. – es el intervalo desde el instante en que se ha establecido la ruta entre los nodos fuente y destino hasta que se interrumpe el enlace de comunicación entre alguno de los nodos intermedios que forman parte de la ruta cuando uno de estos abandona el área de cobertura.

Para que se mantenga la conectividad en la red de comunicación, es necesario que el tiempo que tarda en establecerse un enlace entre las estaciones fuente y destino (ruta), sea mucho menor al tiempo en que permanece siendo útil la ruta una vez creada.

Lo anterior depende directamente de la velocidad con la que se muevan tanto las estaciones fuente y destino como los nodos intermedios utilizados en la ruta, así mismo como de la longitud de la ruta establecida (cantidad de saltos requerida para enlazar a los nodos fuente y destino). A mayor velocidad de movimiento de los nodos, menor es el tiempo que permanece operando la ruta.

Para poder encontrar una ecuación que permita calcular los parámetros descritos anteriormente, primero es necesario conocer los principios básicos de operación de las redes *ad-hoc*.

En las siguientes secciones de este capítulo se describen los principios de funcionamiento de los protocolos de encaminamiento y del control de acceso al medio utilizados en este tipo de redes de comunicación.

La FIGURA III – 1 presenta un diagrama esquemático que muestra las etapas que ocurren durante el establecimiento de una ruta en una red de sensores inalámbricos.

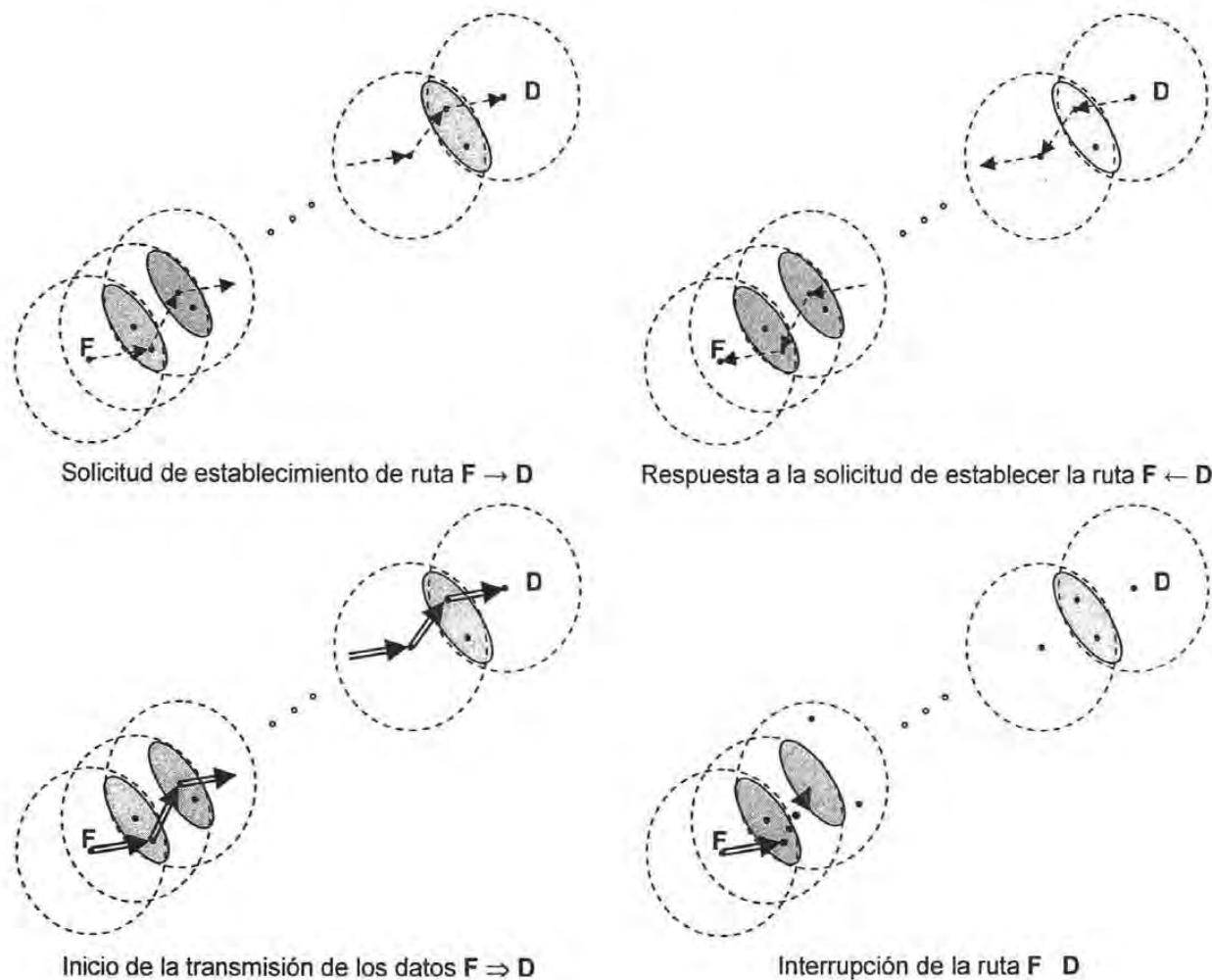


FIGURA III – 1 Diagrama del establecimiento de ruta en una red de sensores inalámbricos.

3.2 PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN REDES MULTIPUNTO

Una red *ad – hoc* es un conjunto de nodos móviles inalámbricos que conforman una red temporal en forma dinámica sin el empleo de algún tipo de infraestructura de red existente o administración central. Debido al alcance de transmisión limitado de las interfaces de red inalámbricas, se requiere de la intervención de múltiples enlaces o *saltos* entre los nodos intermedios que permitan que un nodo pueda intercambiar datos con otro nodo a través de la red.

En las áreas en las cuales existe muy poca o ninguna infraestructura de comunicación o la que existe resulta muy costosa o inconveniente para utilizarla, los usuarios móviles inalámbricos pueden ser capaces de establecer un enlace de comunicación a través de la formación de una red *ad – hoc*. En este tipo de red, cada nodo móvil no opera sólo como un equipo transmisor / receptor de datos sino como un equipo de encaminamiento de los mismos, el cual remite los paquetes desde y hacia otros nodos en la red que no se encuentren dentro del alcance de transmisión directo del enlace inalámbrico de cada uno. Cada nodo participa en un protocolo de encaminamiento *ad – hoc* que le permite descubrir una trayectoria o ruta hacia algún nodo en específico, formada por múltiples saltos (enlaces intermedios). Al tipo de red *ad – hoc* suele denominársele una red sin infraestructura, ya que los nodos móviles en la red establecen en forma dinámica el encaminamiento entre los mismos miembros de la red para construir su propia distribución topológica variable en el tiempo.

3.2.1 PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO EN REDES *Ad – Hoc*

En años recientes, se han desarrollado una gran variedad de nuevos protocolos de encaminamiento orientados específicamente a este tipo de ambientes. Algunos de los protocolos de encaminamiento que se emplean en las redes inalámbricas *ad – hoc* con saltos múltiples son los siguientes: **DSDV**, **TORA**, **DSR** y **AODV**. Cada uno de estos protocolos han sido propuestos para resolver los problemas que se presentan durante el encaminamiento por saltos múltiples en las redes *ad – hoc*, y cada uno se basa en diferentes condiciones y suposiciones. Los protocolos fueron desarrollados de acuerdo a las especificaciones y basándose en ciertos problemas descritos por sus diseñadores.

3.2.2 PROPIEDADES DESEABLES EN LOS PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO

Las diferencias entre las redes inalámbricas y las que se realizan por medio de cables obligan a que el protocolo de encaminamiento en las redes *ad – hoc* cumpla con ciertas características adicionales para resolver los problemas que comúnmente no se presentan en las redes cableadas, ya que en estas últimas la topología de la red no cambia tan drásticamente como en las redes inalámbricas móviles. La interrupción de los enlaces en una red cableada sólo ocurre cuando se presenta un problema físico (del nodo o del medio de comunicación), la mayor confiabilidad de la infraestructura de este tipo de redes permite que los protocolos de encaminamiento clásicos operen satisfactoriamente, los cuales utilizan equipos de encaminamiento que intercambian y actualizan la información de sus listas de encaminamiento enviándose mensajes en forma periódica. En caso de fallas en el enlace, las rutas se recalculan y se propagan a través de la red. Este proceso lleva cierto tiempo en completarse pero es el comportamiento normal de una red cableada.

En una red inalámbrica móvil *ad – hoc*, se esperan frecuentes cambios en los enlaces debido al movimiento constante de los nodos que interrumpe y crea nuevos enlaces de comunicación al ingresar o abandonar las diferentes áreas de cobertura de los alcances de transmisión de cada nodo, esto dificulta el cálculo y almacenaje de todas las rutas de comunicación posibles en la red. En general, los objetivos a alcanzar en el diseño de un protocolo de encaminamiento son:

- Escalabilidad respecto al crecimiento de la topología de la red
- Respuesta rápida a los cambios en la topología de la red
- Proporcionar rutas libres
- Reducir el retardo en la propagación de la información a través de la red (seleccionando las rutas más cortas)
- Presentar múltiples rutas para reducir la congestión del tráfico en la red
- Ejecución descentralizada del protocolo de encaminamiento
- Eficiencia respecto al ancho de banda empleado (reducir el exceso de paquetes para la señalización del encaminamiento)
- Utilizar enlaces unidireccionales y bidireccionales
- Reducir en lo posible el consumo de energía eléctrica

3.2.3 ESTRATEGIAS DE LOS PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO

Existen los siguientes tipos de estrategias básicas de encaminamiento en las redes *ad hoc*. La primera estrategia se le denomina proactiva, la segunda estrategia se le denomina reactiva (iniciada por fuente o solicitada por demanda). Existe una tercera estrategia, denominada híbrida que combina algunos de los métodos de funcionamiento de las anteriores.

ESTRATEGIA PROACTIVA

Corresponde al método clásico de encaminamiento que se emplea en las redes cableadas – estado del enlace, vector de distancia y encaminamiento fuente. El tipo de estrategia proactiva o convencional puede funcionar en redes inalámbricas, siempre y cuando la movilidad de los nodos no exceda un cierto límite, ya que comienzan a ser inestables cuando ocurre un frecuente cambio de rutas, pues los algoritmos no son lo suficientemente rápidos y eficientes para manejar muchos eventos recurrentes.

Además, los protocolos convencionales asumen que todos los enlaces son bidireccionales, lo cual no siempre es posible en un escenario inalámbrico ya que los nodos pueden tener diferentes alcances de transmisión. Los protocolos preactivos más comunes son los que se basan en el algoritmo de encaminamiento mediante vector de distancia.

En resumen, un encaminamiento basado en vector de distancia significa que los nodos mantienen un rastreo de alcance de sus enlaces salientes. Los valores esperados de la distancia más corta entre cada nodo en la red son transmitidos a intervalos constantes a todos los nodos vecinos para que actualicen sus tablas de encaminamiento.

ESTRATEGIA REACTIVA

La estrategia reactiva funciona en forma diferente, ya que las rutas son solicitadas cuando se requieren y es el emisor el que inicia esta solicitud de ruta (es por esto que se les denomina estrategias iniciadas por fuente o solicitadas por demanda). Si un nodo fuente desea enviar un paquete a un receptor, pero no posee una ruta hacia el destino entonces debe solicitar esta ruta a otros nodos de la red.

El nodo fuente envía un paquete de solicitud de ruta a sus nodos vecinos, preguntando por una ruta hacia el nodo destino. Esta solicitud de ruta se propaga a través de la red hasta que alcanza a un nodo que ya posee una ruta hacia el nodo destino o porque es el nodo destino en sí. Un paquete de respuesta de ruta es reenviado de regreso sobre la misma trayectoria que utilizó el mensaje de solicitud y de esta forma se puede establecer una conexión entre dos nodos.

En caso de que se interrumpa un enlace, una fase de reconstrucción de ruta debe desarrollarse con el fin de sugerir una ruta alternativa al flujo de paquetes. La ruta expirada se descartará de la estructura de ruta si no se vuelve válida después de cierto tiempo. Este esquema provee de un alto nivel de conectividad en un escenario dinámico. Mientras se incrementa la movilidad de los nodos, el número de cambio de enlaces aumentará así como la cantidad de paquetes de señalización del tráfico de encaminamiento.

ESTRATEGIA HÍBRIDA

Existen algunos protocolos que combinan ambas estrategias. Estos protocolos dividen a la red en zonas (grupos) y ejecutan un protocolo proactivo en el interior de cada zona y una estrategia reactiva al desarrollar los procedimientos de encaminamiento entre diferentes grupos. Este método se recomienda aplicarse a redes muy extensas donde el agrupamiento y la partición de la red ocurren frecuentemente.

3.2.4 PROTOCOLOS DE ENCAMINAMIENTO MÁS COMUNES

DESTINATION-SEQUENCED DISTANCE VECTOR (DSDV)

El protocolo de encaminamiento **DSDV** es un protocolo proactivo que emplea un vector de distancia que requiere que cada nodo retransmita periódicamente la actualización de encaminamiento. La ventaja clave del protocolo **DSDV** sobre los protocolos convencionales que utilizan vectores de distancia se relaciona en cuanto a que garantiza la libertad del lazo.

Principio básico de operación

Cada nodo mantiene una tabla de encaminamiento que contiene una lista con el *siguiente salto* para cada destino alcanzable. El protocolo **DSDV** etiqueta cada ruta con un número secuencial y se le considera como una ruta más favorable que otra si tiene un número secuencial mayor, o si ambas rutas tienen el mismo número secuencial se considera la que tenga una métrica menor. Cada nodo en la red anuncia un número secuencial par que se incrementa monótonamente por sí mismo. Cuando un nodo fuente decide que su ruta hacia un nodo destino se ha interrumpido, el nodo fuente solicita la ruta hacia el nodo destino con un número secuencial mayor al número secuencial que tenía la ruta interrumpida. Esto ocasiona que cualquier nodo incorpore esta trayectoria a su tabla de encaminamiento hasta que encuentre una ruta hacia el nodo destino con un número secuencial mayor.

TEMPORALLY-ORDERED ROUTING ALGORITHM (TORA)

El protocolo **TORA** es un protocolo de encaminamiento reactivo distribuido basado en un algoritmo de enlace reversible. Está diseñado para descubrir las rutas bajo demanda proveyendo múltiples trayectorias para un nodo destino, estableciendo las rutas rápidamente y reduciendo el exceso de paquetes de comunicación al efectuar una reacción algorítmica de los cambios topológicos cuando es necesario. Se considera de segunda importancia la ruta óptima (la trayectoria de encaminamiento más corta) y a menudo se emplean las rutas más largas para evitar el exceso de paquetes que ocasiona el proceso de descubrimiento de nuevas rutas.

Las acciones tomadas por el protocolo **TORA** pueden ser descritas en términos de *agua fluyendo hacia un nodo destino a través de una red de tuberías* que modela el estado de encaminamiento real de la red. Los *tubos* representan a los enlaces entre los nodos en la red, las *uniones de los tubos* representan a los nodos y el *agua* en las *tuberías* representa a los paquetes fluyendo hacia el nodo destino. Cada nodo posee una altura relativa respecto al nodo destino que es calculada por el protocolo de encaminamiento. Si un *tubo* entre dos nodos se bloquea de tal manera que el *agua* no pueda fluir a través de él, entonces la *posición* del primer nodo se sitúa en una mayor altura respecto a los nodos vecinos restantes, de tal forma que el *agua* fluirá de regreso desde ese nodo y hacia los otros nodos que le han enviado paquetes.

Principio básico de operación

En cada nodo en la red se ejecuta una copia del protocolo **TORA** separada lógicamente para cada destino. Cuando un nodo necesita una ruta hacia un destino en particular, éste envía un paquete de solicitud (**QUERY**) que contiene la dirección del nodo destino para el cual requiere una ruta. Este paquete se propaga a través de la red hasta que alcanza al nodo destino o a un nodo intermedio que ya posee una ruta hacia el nodo destino. El nodo receptor del paquete de solicitud (**QUERY**) retransmite un paquete de actualización (**UPDATE**) que indica su *altura* respecto al nodo destino. Mientras este paquete se propaga a través de la red, cada nodo que recibe el paquete de actualización (**UPDATE**) ajusta su *altura* a un valor mayor que la *altura* de su vecino desde el cual recibió el paquete de actualización (**UPDATE**). Esto tiene el efecto de crear una serie de enlaces dirigidos desde el emisor original del paquete de solicitud (**QUERY**) hasta el nodo que inicialmente generó el paquete de actualización (**UPDATE**).

Cuando un nodo descubre que una ruta a un nodo destino no sigue siendo válida, debe reajustar su *altura* para que posea un valor máximo local respecto a sus vecinos y transmite un paquete de actualización (**UPDATE**). Si el nodo no posee vecinos con altura finita respecto a su destino, entonces el nodo intenta descubrir una nueva ruta siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Cuando un nodo detecta una partición de la red, éste genera un paquete de reajuste del estado ruta (**CLEAR**) que remueve rutas inválidas de la red.

El protocolo **TORA** se encuentra en la capa superior del protocolo **IMEP** (Internet **MANET** Encapsulation Protocol), el cual es necesario para proveer un enlace confiable, con el fin de entregar todos los mensajes de control de encaminamiento de un nodo a cada uno de sus vecinos, además de notificar al protocolo de encaminamiento cada vez que un enlace con uno de sus vecinos se ha creado o interrumpido. Para reducir el exceso de paquetes de señalización, el protocolo **IMEP** intenta agregar sus mensajes de control (objetos) a cada mensaje del protocolo **TORA** formando un solo paquete (objeto bloque) antes de cada transmisión. Cada bloque transporta un número secuencial y una lista de respuestas de todos los nodos de los cuales no se ha recibido un paquete de reconocimiento (**ACK**).

El protocolo **IMEP** retransmite cada bloque con cierta periodicidad y continúa retransmitiéndolo si es necesario hasta cubrir un periodo máximo de transmisión, después del cual se solicita al protocolo **TORA** que descarte todos los enlaces hacia los nodos de los que no se ha recibido el paquete de reconocimiento (**ACK**). Además, el protocolo **IMEP** proporciona a la red de una capa de resolución de direcciones. Cada nodo ejecutando el protocolo **IMEP** periódicamente retransmite un paquete de radiofaro (**BEACON**) para detectar el estado del enlace y mantener una lista de sus nodos vecinos, cada nodo que recibe este paquete le remite otro paquete de respuesta (**HELLO**).

DYNAMIC SOURCE ROUTING (DSR)

El protocolo **DSR** es un protocolo reactivo que utiliza un encaminamiento fuente en lugar de un encaminamiento salto a salto, cada paquete a ser encaminado porta en su encabezado la lista ordenada y completa de los nodos a través de los cuales el mensaje debe pasar. La ventaja clave del encaminamiento fuente está relacionada en que no es necesario que los nodos intermedios deban mantener actualizada la información de encaminamiento con el fin de encaminar a los paquetes que deben remitir, ya que los paquetes en sí contienen de antemano todas las decisiones de encaminamiento. Este hecho, así como la naturaleza bajo demanda del protocolo, elimina la necesidad del anuncio periódico de la ruta y de la detección de paquetes por parte de los nodos vecinos que son requeridos en otros protocolos de encaminamiento.

Principio básico de operación

El protocolo **DSR** consiste en dos procedimientos: el Descubrimiento de Ruta (*Route Discovery*) y el Mantenimiento de Ruta (*Route Maintenance*).

El Descubrimiento de Ruta es el procedimiento mediante el cual el nodo fuente que desea enviar un paquete a un nodo destino obtiene una ruta fuente – destino. Para realizar un procedimiento de Descubrimiento de Ruta, el nodo fuente transmite un paquete de solicitud de ruta (**ROUTE REQUEST**) que inunda de manera controlada a la red y al cual le corresponde una respuesta mediante un paquete de respuesta de ruta (**ROUTE REPLY**) que es emitido por el nodo destino o por un nodo intermedio que conozca la ruta hacia el nodo destino. Para reducir la propagación y la frecuencia de los paquetes de solicitud de ruta, cada nodo almacena temporalmente una lista de rutas fuente.

El Mantenimiento de Ruta es el procedimiento por medio del cual un paquete del emisor fuente detecta si la topología de la red ha cambiado de tal forma que no puede utilizarse la misma ruta hacia el nodo destino porque dos nodos de la ruta se han movido fuera del alcance de transmisión mutuo. Cuando un Mantenimiento de Ruta indica que se ha interrumpido una ruta, se le notifica al nodo fuente mediante un paquete de error de ruta (**ROUTE ERROR**). El nodo fuente debe intentar utilizar otra ruta hacia el nodo destino que se encuentre almacenada en su memoria temporal o puede invocar un otro procedimiento de Descubrimiento de Ruta para encontrar una nueva ruta.

AD HOC ON-DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV)

El protocolo **AODV** es un protocolo reactivo que esencialmente utiliza una combinación de los protocolos **DSR** y **DSDV**. Utiliza los procedimientos básicos bajo demanda de Descubrimiento de Ruta y Mantenimiento de Ruta del protocolo **DSR**, además de utilizar el encaminamiento salto a salto, números en secuencia y radiofaros periódicos del protocolo **DSDV**.

Principio básico de operación

Cuando un nodo fuente necesita una ruta para comunicarse con un nodo destino, este emite un mensaje de solicitud de ruta a sus vecinos (*ROUTE REQUEST*), incluyendo el último número secuencial conocido para ese destino. El mensaje de solicitud de ruta se inunda de manera controlada a través de la red hasta que alcanza a un nodo que tiene conocimiento sobre una ruta hacia el nodo destino. Cada nodo que remite el mensaje de solicitud de ruta (*ROUTE REQUEST*) crea una ruta inversa para regresar al nodo fuente.

Cuando el mensaje de solicitud de ruta (*ROUTE REQUEST*) alcanza a un nodo intermedio con una ruta hacia el nodo destino, ese nodo genera un mensaje de respuesta de ruta (*ROUTE REPLY*) que contiene el número de saltos necesarios para alcanzar al nodo destino y el número secuencial más reciente captado por este nodo. Cada nodo que participa en la retransmisión del paquete de respuesta hacia el nodo fuente crea una ruta de remisión para el nodo destino. El estado creado en cada nodo sobre la trayectoria desde el nodo fuente al destino es un estado de salto a salto, esto es que cada nodo solo mantiene la información del siguiente salto y no de la ruta completa.

Con el fin de mantener la ruta, el protocolo **AODV** requiere normalmente que cada nodo transmita periódicamente un mensaje de bienvenida (*HELLO*) con una frecuencia de uno cada segundo. El hecho de que se presenten tres fallas consecutivas en la recepción de estos mensajes desde un nodo vecino se considera como una indicación de que el enlace con el nodo en cuestión se ha interrumpido. Alternativamente, la especificación del protocolo **AODV** sugiere que un nodo puede utilizar métodos en la capa física o en la capa de enlace para detectar interrupciones en el enlace entre los nodos que se consideran vecinos. Cuando un enlace se interrumpe, a cualquier nodo que ha remitido paquetes recientemente al nodo destino utilizando esa ruta se le notifica de la falla mediante un mensaje de respuesta de ruta sin solicitud (*UNSOLICITED ROUTE REPLY*). Una vez que se presenta este caso, un nodo debe conseguir una nueva ruta hacia el nodo destino, mediante un procedimiento de descubrimiento de ruta.

3.3 PROTOCOLOS DE LA CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

Para entender el funcionamiento del enlace de comunicación en las redes de área local inalámbricas (**WLANs**), en las redes tipo *ad - hoc* y en las redes de sensores, es necesario analizar el estándar **IEEE 802.11**, el cual provee las especificaciones detalladas sobre el protocolo operativo de la Capa de Control de Acceso al Medio (**MAC – Medium Access Control Layer**) adoptado por este tipo de redes.

La arquitectura de la capa de Control de Acceso al Medio incluye dos mecanismos de operación, denominados:

- **FUNCIÓN DE COORDINACIÓN DISTRIBUIDA (DCF – Distributed Coordination Function)**
- **FUNCIÓN DE COORDINACIÓN PUNTUAL (PCF – Point Coordination Function).**

La Función de Coordinación Distribuida (**DCF**) es el mecanismo fundamental que se utiliza para controlar el acceso al medio compartido. Consiste en un método de acceso aleatorio basado en el Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (**CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance**). La Función de Coordinación Puntual (**PCF**) es opcional y sólo opera bajo configuraciones de redes inalámbricas con infraestructura. Debido a que tanto las redes inalámbricas con infraestructura como las redes inalámbricas sin infraestructura (redes *ad - hoc*) operan utilizando la Función de Coordinación Distribuida (**DCF**), se explicará su principio de funcionamiento de forma más detallada.

El desempeño de las redes inalámbricas relacionado con el retardo que experimentan los paquetes transmitidos a través de la red se ha convertido en un tema de análisis muy importante. En este análisis es trascendental considerar el retardo debido a la contención del medio que se presenta en el protocolo de la capa de Control de Acceso al Medio (**MAC**). Debido a que todas las estaciones dentro del alcance radial mutuo comparten el recurso del canal, resulta una alta probabilidad de que se presente un retardo por contención muy elevado.

Para el análisis del desempeño en cuanto al retardo de los paquetes transmitidos por la red inalámbrica, se han realizado diversos estudios que asumen las condiciones ideales en el canal de comunicación y un número finito de estaciones. Estos estudios se han basado en el mecanismo de aplazamiento binario exponencial ranurado (*binary slotted exponential back off*) y han utilizado algunos modelos de cadenas de Markov de dos dimensiones para analizar la capacidad saturada para la actividad operativa del estándar **IEEE 802.11**, considerando el límite de retransmisión de las tramas.

FUNCIÓN DE COORDINACIÓN DISTRIBUIDA

La Función de Coordinación Distribuida (**DCF**) es el método de acceso fundamental que se emplea en el protocolo de Control de Acceso al Medio (**MAC**) del estándar **IEEE 802.11**, el cual se basa en el Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (**CSMA/CA**). La Función de Coordinación Distribuida provee acceso asíncrono a los datos a transmitir por el medio de comunicación inalámbrico.

En el protocolo de Control de Acceso al Medio en el estándar **IEEE 802.11**, la prioridad de acceso al medio de comunicación inalámbrico se controla por medio del establecimiento de intervalos de tiempo entre tramas, denominados, Espacio entre Tramas (**IFS – Inter-Frame Space**). Cada estación debe determinar si el medio se encuentra disponible a través del empleo de la función de detección de portadora para el intervalo especificado. Se definen varios Espacios entre Tramas diferentes para proveer niveles de prioridad de acceso al medio de comunicación inalámbrico. Los cuatro tipos de Espacios entre Tramas son: el **SIFS** (*Short Inter-Frame Space*), el **PIFS** (*PCF Inter-Frame Space*), el **DIFS** (*DCF Inter-Frame Space*) y el **EIFS** (*Extended Inter-Frame Space*). La mayoría de los Espacios entre Tramas son independientes de la tasa de transmisión de cada estación. La duración de cada Espacio entre Tramas se define como intervalos de tiempo en el medio y son fijos para cada tipo de capa física (aún en capas físicas que soporten diferentes velocidades de transmisión). Los Espacios entre Tramas se determinan a partir de atributos especificados en la capa física.

Cada estación que desee transmitir, debe utilizar el mecanismo para detectar la portadora y determinar el estado actual del medio (disponible / ocupado). Existen dos mecanismos para la detección de la portadora:

1. El mecanismo físico de detección de portadora se consigue cuando las estaciones analizan las señales presentes en el medio de comunicación inalámbrico y determinan el posible uso del canal a través de la medición de la intensidad relativa de las señales provenientes de otras fuentes.
2. El mecanismo virtual de detección de portadora se consigue al distribuir información de reservación que anuncia el inminente uso del medio por parte de una estación. El campo *Duración* que contienen algunas tramas pequeñas que son intercambiadas antes de realizar la transmisión de las tramas de datos difunde la información de reservación del medio a todas las estaciones que se encuentran dentro del alcance de transmisión de la estación que está solicitando la reservación del medio. El tiempo de reservación incluye el tiempo necesario para transmitir las tramas de datos así como el tiempo que se necesita para transmitir el paquete de acuse de recibo (**ACK**) de las tramas de datos por parte de la estación receptora. Al recibir la información del tiempo de reservación del medio, las demás estaciones asignan el valor contenido en el campo *Duración* a un parámetro local denominado Vector de Asignación de Red (**NAV** – *Network Allocation Vector*). El parámetro **NAV** indica la cantidad de tiempo que cada estación debe esperar hasta que la transmisión actual se complete y la estación pueda medir el nivel de señal en el medio para verificar si el canal se encuentra disponible. Mientras el valor del parámetro **NAV** no sea cero, la estación debe considerar que el estado del canal se encuentra ocupado.

Si el medio está ocupado, la estación debe esperar hasta que el medio se encuentre disponible sin interrupción por un periodo de tiempo igual a la duración del parámetro **DIFS** tomado a partir del instante en el que la última trama detectada fue recibida correctamente.

Después de que el medio permaneció disponible por un intervalo igual al **DIFS**, la estación debe generar un periodo de aplazamiento de tiempo aleatorio adicional para demorar la transmisión de sus paquetes, a menos de que el contador del tiempo de aplazamiento esté en cero, en cuyo caso lo anterior no se realiza. Este proceso reduce la ocurrencia de colisiones durante el proceso de contención entre múltiples estaciones que han tenido que esperar para poder utilizar el canal.

El intervalo de aplazamiento aleatorio es seleccionado uniformemente de entre los valores $(0, W_i - 1)$. El valor W_i denominado *ventana de contención*, que corresponde a un valor entero que se encuentra dentro del intervalo $[W_{\min}, W_{\max}]$, cuyos valores extremos los determinan las características de la capa física. El valor de la ventana de contención (W_i) se determina mediante una ecuación de aplazamiento binario exponencial ranurado (*binary slotted exponential back off*) dada por:

$$W_i = \begin{cases} 2^{i-1} W_{\min} & 1 \leq i \leq m \\ 2^m W_{\min} & i > m \end{cases} ; m = 5 \quad (\text{III} - 1)$$

$$W_{\min} = 32 \quad W_{\max} = 2^m W_{\min} = 2^5 (32) = 1024 \quad W_{\min} \leq W_i \leq W_{\max} ;$$

El tiempo de aplazamiento aleatorio (T_B) se determina mediante:

$$T_B = W_i T_\sigma \quad (\text{III} - 2)$$

T_σ : Duración de una ranura de tiempo $T_\sigma = 20$ [μs]

Un contador descendente controla el valor de i que se utilizará para el tiempo de aplazamiento. Este contador va disminuyendo conforme se detecta que el medio se encuentra disponible, se detiene cuando se detecta una transmisión presente en el medio y se reactiva el conteo cuando se detecta que el canal ha estado disponible por un intervalo de tiempo mayor al **DIFS**. La estación podrá transmitir cuando el contador alcance el valor de cero.

Cada vez que no se consigue una transmisión exitosa el valor de la ventana de contención se incrementa hasta que alcanza su valor máximo (W_{\max}) en el cual se mantendrá hasta que no ocurran errores en la transmisión y se presenten las condiciones de medio disponible. Cuando esto ocurre, el contador vuelve a descender el valor de i hasta que le permita transmitir a la estación.

La Función de Coordinación Distribuida debe aplicarse en todas las estaciones de la red inalámbrica, tanto en el Conjunto de Servicios Básicos Independientes (**IBSS – Independent Basic Service Set**) (redes inalámbricas *ad – hoc*) como en las configuraciones de red con infraestructura. La Función de Coordinación Distribuida opera utilizando uno de los siguientes métodos de acceso al canal de comunicación: Método de Acceso Básico y Método de Acceso con Intercambio de Paquetes (**RTS/CTS**).

MÉTODO DE ACCESO BÁSICO

El método de acceso básico consta del siguiente procedimiento:

Cuando una estación desea transmitir una trama de datos, debe detectar que el medio de comunicación inalámbrico se encuentre disponible durante un lapso de tiempo igual al **DIFS** sin interrupción alguna. Si esto pasa, entonces puede comenzar a transmitir y, una vez terminada la transmisión debe esperar la recepción de un paquete de acuso de recibo (**ACK**) que le indique que la trama de datos fue recibida correctamente por el nodo destino.

Cuando la estación destino recibe una trama de datos correctamente, ésta debe esperar un lapso de tiempo igual al intervalo **SIFS** para transmitir un paquete de acuso de recibo (**ACK**) a la estación transmisora que le indique la recepción satisfactoria de la trama de datos que envió. Si la estación fuente no recibe el paquete **ACK** dentro de un lapso de tiempo especificado (**T_{ACK_OUT}**), entonces debe asumir que la trama de datos se ha perdido y debe programar su futura retransmisión.

Si otra estación detecta que el medio está ocupado, ésta debe esperar hasta que el medio se encuentre disponible sin interrupción por un periodo de tiempo igual a la duración del parámetro **DIFS** tomado a partir del instante en el que la última trama detectada fue recibida correctamente.

Después de que el medio permaneció disponible por un intervalo igual al **DIFS**, la estación debe generar un periodo de aplazamiento de tiempo aleatorio adicional antes de poder transmitir, a menos de que su contador del tiempo de aplazamiento presente un valor de cero, en cuyo caso no se realiza. La **FIGURA III – 2** muestra un diagrama del principio de funcionamiento del Método de Acceso Básico.

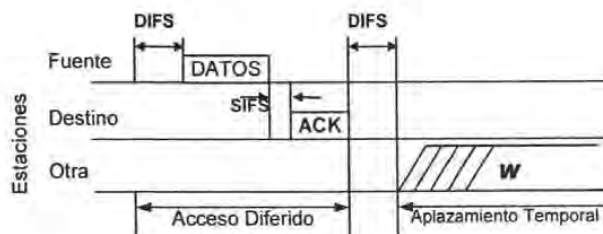


FIGURA III – 2 Diagrama del Método de Acceso Básico.

MÉTODO DE ACCESO CON INTERCAMBIO DE PAQUETES (RTS/CTS)

El método de acceso con intercambio de paquetes (**RTS/CTS**) consta del siguiente procedimiento:

Cuando una estación necesita transmitir una trama de datos, espera hasta que el canal se detecta como disponible por un intervalo de tiempo igual al **DIFS**, continúa el tiempo de aplazamiento, y luego transmite un paquete especial de longitud corta que solicita permiso para enviar el paquete de datos, denominado **RTS** (*Request To Send*) en lugar de transmitir de inmediato la trama de datos.

Cuando la estación destino recibe el paquete **RTS**, espera un instante de tiempo igual al intervalo **SIFS** y luego responde con otro paquete especial de longitud corta que acepta el envío del paquete, denominado **CTS** (*Clear To Send*). La estación fuente tendrá permiso para transmitir su trama de datos, sólo si recibe el paquete **CTS** correctamente.

Tanto el paquete **RTS** como el paquete **CTS** portan la información de la longitud de la trama de datos que será transmitida. Las otras estaciones dentro del alcance de transmisión de las estaciones fuente y destino pueden recibir los paquetes **RTS** o **CTS** y esta información les sirve para actualizar su parámetro del Vector de Asignación de Red (**NAV** – **Network Allocation Vector**) que contiene la información sobre el periodo de tiempo en el cual deben mantenerse pasivos (sin transmitir). El método de acceso con intercambio de paquetes **RTS/CTS** ayuda a combatir el problema de terminales ocultos.

La transferencia de tramas **RTS/CTS** tiene varias ventajas, entre las que se encuentran:

1. El intercambio es útil en los casos donde una estación no puede detectar las transmisiones de otras estaciones que están fuera de su alcance de recepción pero puede captar las transmisiones provenientes de las estaciones en su entorno que se están comunicando con las estaciones lejanas. Así podrá determinar la inminente presencia de paquetes en una transmisión futura.
2. Si la estación transmitiendo el paquete **RTS** no recibe el paquete **CTS**, puede repetir el proceso de transmisión de manera más rápida (respetando las reglas de acceso al medio) en contraste al caso en el que se transmite la trama de datos completa y se espera el paquete de acuso de recibo (**ACK**), proceso que resulta mas tardado y por tanto más ineficiente.

El intercambio de paquetes **RTS/CTS** en una red de área local inalámbrica que presenta una alta carga es benéfico porque si ocurren colisiones, son detectadas más rápidamente pues las tramas transmitidas son más cortas. Si una trama de datos experimenta colisiones, la trama completa debe finalizar su transmisión, ya que la estación transmisora no puede detectar las condiciones del medio. Esto resulta en un desperdicio de la capacidad de transmisión de la red (ancho de banda). Por otra parte, si la red de área local inalámbrica posee una carga baja, el empleo del intercambio de paquetes **RTS/CTS** incrementa el retardo en la comunicación entre dos nodos de la red.

El intercambio de paquetes **RTS/CTS** se controla al su aplicación dependiente de la longitud de las tramas de datos a transmitir. Si el tamaño de los paquetes es menor a un parámetro que define un cierto umbral, entonces la estación transmite una trama de datos de forma directa (después de determinar la disponibilidad del medio) sin la necesidad de transmitir primero el paquete **RTS**. Si la trama de datos es mayor a este umbral, ésta comenzará a ser transmitida después de un intercambio satisfactorio de los paquetes **RTS/CTS** entre las estaciones fuente y destino.

Algunas tramas requieren de paquetes de acuse de recibo. Las estaciones que reciben estas tramas específicas deben responder con un paquete **ACK** si el proceso de comprobación de redundancia cíclica de la trama recibida resulta correcto. Si una estación transmisora no recibe un paquete de acuse de recibo, debe asumir que la trama presentó errores y después del procedimiento de aplazamiento temporal aleatorio, intentará volver a contender por el medio para retransmitir esa trama. Este mecanismo se conoce como *reconocimiento positivo (positive acknowledgement)*.

Para el método de acceso con intercambio de paquetes (**RTS/CTS**) también existe cierta prioridad en el acceso al medio de comunicación inalámbrico que se controla mediante el empleo de los Espacios entre Tramas (**IFS – Inter-Frame Spaces**), que son intervalos de tiempo específicos que deben respetarse entre las diferentes tramas que han de transmitirse. Bajo este esquema, todas las estaciones deben permanecer pasivas (sin transmitir) por un cierto período mínimo después de que se ha completado una transmisión de forma exitosa, dicho periodo de espera está definido por uno de los distintos tipos de Espacios entre Tramas que se aplica dependiendo del tipo de trama transmitido o a transmitir. Los cuatro tipos de Espacios entre Tramas son:

- a) **SIFS** (*Short Inter-Frame Space*)
- b) **PIFS** (*PCF Inter-Frame Space*)
- c) **DIFS** (*DCF Inter-Frame Space*)
- d) **EIFS** (*Extended Inter-Frame Space*)

SIFS (Short Inter-Frame Space): es el intervalo más corto. Las estaciones que requieren una mayor prioridad deben esperar un intervalo igual al **SIFS** para acceder al medio. El período de espera definido por el **SIFS** se utiliza antes de la transmisión de los paquetes **ACK**, **CTS** y los fragmentos subsecuentes de una Unidad de Datos del Protocolo del Control de Acceso al Medio (**MPDU MAC Protocol Data Unit**). La duración de este intervalo es:

$$T_{SIFS} = \begin{cases} 10 [\mu\text{s}] & (\text{DS-SS}) \\ 28 [\mu\text{s}] & (\text{FH-SS}) \end{cases}$$

PIFS (PCF Inter-Frame Space): es el intervalo utilizado por las estaciones que operan bajo el mecanismo de la Función de Coordinación Puntual (**PCF**) para conseguir prioridad de acceso al medio al comienzo del Periodo Libre de Contención (**CFP Contention Free Period**). Una estación que utiliza la Función de Coordinación Puntual (**PCF**) puede transmitir sus tramas de datos, libres de contención, después de que su mecanismo de detección de portadora determina que el medio de comunicación está disponible. El Punto de Acceso (**AP**) o Coordinador Puntual debe esperar un intervalo igual al **PIFS** antes de controlar el medio para poder iniciar el Periodo Libre de Contención (**CFP**). El Punto de Acceso (**AP**) también debe esperar el periodo **PIFS** si durante el Periodo Libre de Contención (**CFP**) no recibió respuesta de la trama de sondeo. Esto asegura que el Punto de Acceso siempre tenga control sobre el medio. La duración del intervalo **PIFS** es:

$$T_{PIFS} = T_{SIFS} + T_{\sigma} \quad (\text{III} - 3)$$

$$T_{PIFS} = \begin{cases} 30 [\mu\text{s}] & ; T_{\sigma} = 20 [\mu\text{s}] \\ 78 [\mu\text{s}] & ; T_{\sigma} = 50 [\mu\text{s}] \end{cases}$$

T_{σ} : Duración de una ranura de tiempo

DIFS (DCF Inter-Frame Space): es el intervalo utilizado por las estaciones que operan bajo el mecanismo de la Función de Coordinación Distribuida (**DCF**) para transmitir las tramas de Unidades de Datos del Protocolo del Control de Acceso al Medio (**MPDUs MAC Protocol Data Units**) y por las tramas de Unidad de Datos de Gestión del Protocolo del Control de Acceso al Medio (**MMPDUs Management MAC Protocol Data Units**). Una estación que utiliza la Función de Coordinación Distribuida (**DCF**) puede transmitir sus tramas datos después de que su mecanismo de detección de portadora determina que el medio de comunicación está disponible y que ha expirado el intervalo de aplazamiento. Si la estación determina que el canal sigue ocupado, debe calcular un intervalo de aplazamiento aleatorio para programar el reintento de transmisión. La duración de este intervalo es:

$$T_{DIFS} = T_{SIFS} + 2T_{\sigma} \quad (\text{III} - 4)$$

$$T_{DIFS} = \begin{cases} 50 [\mu\text{s}] \\ 128 [\mu\text{s}] \end{cases}$$

EIFS (*Extended Inter-Frame Space*): es el intervalo utilizado por la Función de Coordinación Distribuida (DCF) cuando la capa física le indica a la capa de Control de Acceso al Medio que una transmisión de trama presentó un error en la recepción de la misma. El intervalo **EIFS** comienza una vez que se presenta la indicación por parte de la capa física de que se ha detectado una trama errónea. La duración de este intervalo es:

$$T_{EIFS} = T_{SIFS} + T_{DIFS} + (L_{PT} + L_{PLCP} + L_{ACK})/R_{Tx} \quad (III - 5)$$

$$T_{EIFS} = \begin{cases} 308 [\mu s] \\ 412 [\mu s] \end{cases}$$

L_{PT}: longitud del preámbulo de la trama **L_{PT}** = 144 [bits]

L_{PLCP}: longitud del encabezado PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*) de la trama
L_{PLCP} = 48 [bits] (DS-SS) **L_{PLCP}** = 64 [bits] (FH-SS)

L_{ACK}: longitud del paquete de acuse de recibo de la trama **L_{ACK}** = 304 [bits]

R_{Tx}: velocidad de transmisión de la trama **R_{Tx}** = 2 [Mbps]

Las estaciones deben mantener contadores que se incrementan cada vez que una trama se retransmite, de esta forma se lleva la cuenta de cuantas veces ha sido necesaria la retransmisión de una trama, si dicha cantidad supera un cierto valor definido por un umbral, se suspende la retransmisión de dicha trama.

Cuando la capa de Control Lógico de Enlace (**LLC – Logical Link Control**) envía una trama hacia la capa de Control de Acceso al Medio (**MAC**) el protocolo determina si es necesario fragmentar los paquetes de las Unidades de Datos de Servicio del Control de Acceso al Medio (**MSDUs MAC Service Data Units**) y las Unidades de Datos de Gestión del Protocolo del Control de Acceso al Medio (**MMPDUs Management MAC Protocol Data Units**) si éstos superan un valor definido por un umbral de fragmentación, luego la estación deberá reservar el canal por el tiempo suficiente para transmitir el total de fragmentos pertenecientes a la trama fragmentada. La **FIGURA III – 3** muestra un diagrama del principio de funcionamiento del Método de Acceso con Intercambio de Paquetes (**RTS / CTS**).

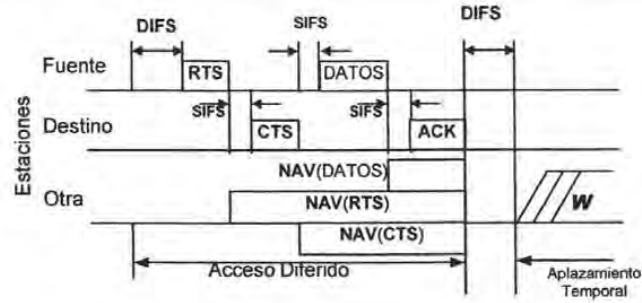


FIGURA III – 3 Diagrama del Método de Acceso con Intercambio de Paquetes (RTS/CTS).

CAPÍTULO IV

MODELO ANALÍTICO DE MOVILIDAD

4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, se utilizará un modelo analítico de movilidad que permita estimar el tiempo de permanencia de un enlace entre los nodos fuente y destino, cuando los nodos que conforman a la red de sensores inalámbricos son móviles. Primero se encontrará una expresión para determinar la superficie del área de traslape que se presenta entre las regiones de cobertura entre dos nodos que deben establecer una comunicación entre ellos pero no se encuentran dentro de su alcance de transmisión mutuo.

Lo anterior implica, que cuando estos nodos necesiten intercambiar información, será necesaria la intervención de un tercer nodo que sirva como estación de relevo para establecer el enlace entre ambos. El nodo intermedio debe ubicarse dentro del área de traslape de las regiones de cobertura de ambos nodos para que pueda servir como retransmisor de la información. Es por esto que es importante conocer la superficie del área de traslape, para poder determinar la cantidad promedio de nodos que pueda haber en dicha área, de acuerdo a la densidad de nodos presente en la red, así como la rapidez con la que se pueden mover los nodos puesto que esto dictará la velocidad con que ingresan y abandonan los nodos dicha área, pudiendo ocasionar, según el caso, el establecimiento, el reestablecimiento o la interrupción del enlace de comunicación.

En las siguientes secciones de este capítulo se describirá la forma de encontrar el área de traslape entre dos áreas de cobertura contiguas y el tiempo de permanencia de un nodo en dicha zona.

4.2 ANÁLISIS DE MOVILIDAD

Para este trabajo de investigación, se considerará el siguiente modelo de red *ad – hoc* de sensores inalámbricos:

1. Cada nodo se encuentra limitado en su alcance de transmisión, el cual es constante mientras la estación se encuentre operando.
2. Los nodos poseen la capacidad de moverse en cualquier dirección en un espacio bidimensional.
3. Existe una limitante en la velocidad máxima en el movimiento de los nodos para mantener a la red de comunicación en un estado operativo activo. El objetivo primordial de este trabajo de investigación es encontrar el valor limitante de esa velocidad.
4. Los nodos móviles poseen una capacidad limitada de cálculo. Cada nodo sensor puede contar con los siguientes componentes – unidad de procesamiento central (CPU), equipo de comunicación inalámbrica de radiofrecuencia, módulos de memoria, sensores, impulsores (dispositivos de movilidad) y fuentes de suministro de energía eléctrica (baterías). Asimismo, cada nodo posee su sistema operativo y su programa a nivel de aplicación, el cual puede estar ejecutando un protocolo que permita determinar su ubicación.
5. El nodo sensor puede presentar fallas permanentes debidas al agotamiento de su fuente de suministro de energía eléctrica o problemas en los componentes de los circuitos electrónicos, o presentar fallas temporales ocasionadas por bloqueo en los enlaces de comunicación entre nodos o errores transitorios del equipo electrónico que posee el nodo sensor.
6. El nodo puede responder a mensajes de control que le indican la dirección y velocidad de su movimiento. Esto permite al sistema desarrollar un monitoreo del movimiento de sus nodos sensores que permite realizar un estudio sobre las mediciones de los parámetros de salida. Una característica común a todos los componentes se relaciona con el suministro limitado de energía eléctrica, ya que la vida útil de las baterías es un factor crítico en la capacidad operativa de los nodos sensores.

Los nodos sensores conforman una red en donde cada nodo es responsable de desarrollar tareas de medición y procesamiento locales, así como funciones de encaminamiento. Debido a las limitaciones en el alcance de transmisión de cada nodo, la comunicación entre dos nodos de la red puede requerir de múltiples enlaces intermedios.

Bajo las condiciones anteriores, los nodos intermediarios actúan como dispositivos de encaminamiento, ejecutando un protocolo de encaminamiento a nivel de red con limitaciones en la energía. Los nodos sensores transmiten en forma omni-direccional y la distancia de separación entre nodos (d_{ij}) debe ser menor al radio del alcance de transmisión de los mismos para asegurar el establecimiento del enlace de comunicación. La red considerada es bidimensional y se organiza de forma similar a una retícula en la que los nodos se ubican en cada uno de los puntos de intersección de la misma.

El establecimiento de la conectividad física no asegura, por sí sola, la conectividad entre los nodos extremos del enlace (nodo fuente y nodo destino). Es necesario emplear un protocolo de encaminamiento que permita a los nodos fuente y destino establecer el enlace de comunicación entre ellos en un ambiente con la intervención de nodos intermedios (*ambiente de saltos múltiples*). El alcance de transmisión que se utilice afecta, significativamente, sobre la tasa de transmisión de paquetes de señalización requeridos para descubrir y mantener la ruta de conectividad a través del transcurso del tiempo cuando existe movilidad de los nodos. Por lo regular, se considera un protocolo de encaminamiento aplicado a una red de sensores inalámbricos que poseen un alcance de transmisión común, esto implica que todos los nodos de la red presentan la misma potencia de transmisión.

El utilizar una potencia de transmisión común impacta directamente sobre el número de paquetes de señalización que requiere el protocolo de encaminamiento. Al emplear una potencia de transmisión baja se incrementa la necesidad de un mayor número de nodos intermedios entre los nodos fuente y destino. Al moverse los nodos intermedios, ingresando y abandonando las rutas existentes, es necesario que el protocolo de encaminamiento efectúe acciones periódicas para que reestablezca las rutas en el enlace de comunicación con el transcurso del tiempo. Es de esperarse que, al utilizarse una potencia de transmisión menor, el protocolo de encaminamiento requerirá de un mayor número de paquetes de señalización para poder descubrir y mantener las rutas. Estos paquetes de señalización reducen parte de la capacidad del canal y consumen parte de los recursos que suministran la potencia a los nodos de la red.

Por otra parte, al seleccionar un nivel bajo en la potencia de transmisión común con el fin de aumentar la capacidad de la red, puede generar una gran cantidad de paquetes de señalización en presencia de nodos móviles. Por los problemas que produce lo anterior, podría ser deseable un nivel mayor en la potencia de transmisión, aunque debe realizarse un análisis más profundo para establecer el nivel óptimo de la potencia de transmisión que mantenga un equilibrio entre la cantidad de paquetes de señalización y la capacidad del canal de comunicación. En general, pueden existir desde ninguno hasta varios nodos intermedios entre los nodos fuente y destino.

La FIGURA IV – 1 ilustra un ejemplo de una ruta desde el nodo fuente (F) hacia el nodo destino (D) involucrando varias estaciones intermedias. Cada círculo representa el alcance de transmisión de cada nodo intermedio en la ruta. Las regiones sombreadas representan las zonas traslapadas entre dichos nodos.

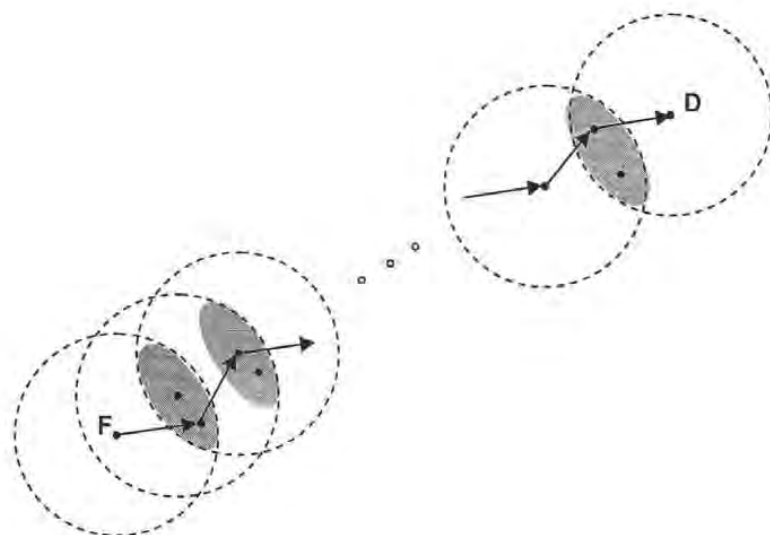


FIGURA IV – 1 Ruta del nodo fuente (F) al nodo destino (D) con varias estaciones intermedias.

Considérese un grafo M formado por un conjunto de nodos V y un conjunto de enlaces E , definidos por:

$$V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad E = \{(x_i, x_j) : 1 \leq j \leq n \quad \text{para } x_i \in \mathfrak{R}, \quad 1 \leq i \leq n$$

Los nodos se mueven a una velocidad v [m/s] en direcciones aleatorias. El alcance de transmisión de cada nodo, que se define por R , es directamente proporcional a la potencia de transmisión utilizada por las estaciones de la red (P_t). La FIGURA IV – 2 muestra la región de traslape entre las áreas de cobertura entre dos nodos adyacentes (b) – zona sombreada –.

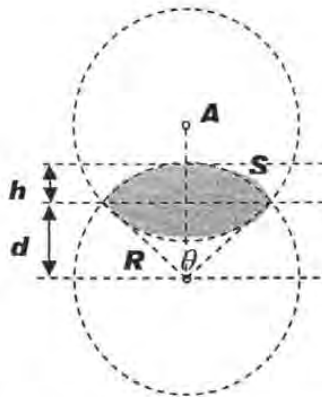


FIGURA IV – 2 Región de traslape entre las áreas de cobertura de dos nodos adyacentes (b).

La longitud del arco (S) subtendido por el ángulo θ en el círculo de radio (R) es:

$$S = R\theta \quad [\text{m}] \quad (\text{IV} - 1)$$

El área de la región traslapada (b), en función de los términos θ , d y h , está dada por:

$$\begin{aligned} b(\theta) &= R^2(\theta - \text{sen}\theta) \\ b(d) &= 2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{R}\right) - 2d\sqrt{R^2 - d^2} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV} - 2) \\ b(h) &= 2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - 2(R-h)\sqrt{2Rh - h^2} \end{aligned}$$

Esta expresión solamente es una aproximación ya que los nodos intermedios no se mantienen separados equidistantemente entre ellos en una ruta y se mueven en direcciones aleatorias con respecto a cada uno de ellos. Como resultado de lo anterior, el área de traslape puede ser mayor o menor al valor dado por b .

El término h desempeña un factor crucial en el comportamiento de los protocolos de encaminamiento para las redes inalámbricas *ad-hoc*. El valor del término h influye sobre el área de traslape entre dos nodos adyacentes. En una red real es muy difícil ajustar el valor de h , ya que en general cambia constantemente debido a que los nodos intermedios se mueven en forma aleatoria en diferentes direcciones y a diferentes velocidades. Obviamente, los valores posibles del término h fluctúan en el intervalo $0 \leq h \leq R$.

Cuando un nodo intermedio abandona la región de reenvío es necesario que otro nodo en dicha región lo reemplace para poder mantener el enlace de comunicación entre los nodos fuente y destino. A este proceso se le denomina *evento de reestablecimiento de ruta*. Si se tiene un valor del término $h = 0$, esto indica que los nodos intermedios se encuentran ubicados sobre una línea recta que une a los nodos fuente y destino y se presenta un valor mínimo de saltos (enlaces intermedios) necesarios para establecer el enlace completo. Para el caso en que $h = 0$, el movimiento de cualquier nodo intermedio produce el evento de reestablecimiento de ruta. El que se presente un valor de h pequeño sólo ocurre en una red estática.

Por otra parte, al presentarse el caso en que el factor $h \rightarrow R$ se reduce la cantidad de eventos de reestablecimiento de ruta efectuados por el protocolo de encaminamiento pero se incrementa significativamente el número de nodos intermedios por ruta.

En la mayoría de los protocolos de encaminamiento por demanda para las redes inalámbricas *ad-hoc*, existen dos fases:

- 1) Fase de descubrimiento de ruta. – la fase de descubrimiento de ruta es responsable de encontrar nuevas rutas entre el par de nodos (fuente y destino).
- 2) Fase de mantenimiento de ruta. – la fase de mantenimiento de ruta es responsable de actualizar las rutas existentes en presencia de nodos móviles.

4.3 DESCUBRIMIENTO DE RUTA

Un nodo fuente que intenta transmitir un paquete a un nodo destino que se encuentre fuera de su alcance de transmisión necesita una cadena de uno o más nodos intermedios con el fin de alcanzar satisfactoriamente al nodo destino seleccionado. Al proceso de búsqueda de esta cadena de nodos se le denomina *descubrimiento de ruta*.

La FIGURA IV – 3 ilustra un proceso de descubrimiento de ruta en donde el nodo fuente (F) busca una ruta hacia el nodo destino (D). Los círculos trazados con línea continua ilustran el alcance de transmisión de los nodos asociados con la ruta final, mientras que los círculos trazados con línea discontinua ilustran el alcance de transmisión de los nodos en las demás direcciones que no formaron parte de la ruta final.

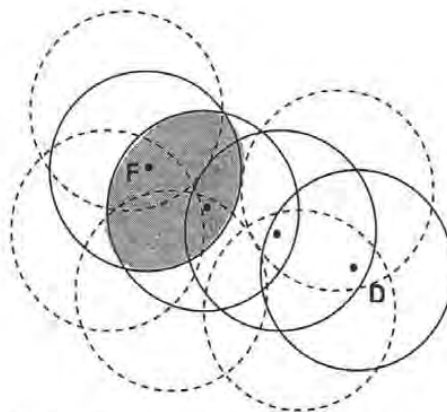


FIGURA IV – 3 Proceso de descubrimiento de ruta.

El proceso de descubrimiento de ruta puede convertirse en una tarea muy demandante en relación tanto al número de paquetes de señalización que deben generarse así como del retardo involucrado en el proceso de búsqueda del receptor designado. Una parte importante de la complejidad involucrada en la mayoría de los protocolos de encaminamiento por demanda para redes *ad – hoc* es la capacidad que deben tener para poder reducir el exceso de ambos factores (el número de paquetes de señalización y el retardo). En el análisis subsiguiente, se considerará que el proceso de descubrimiento de ruta consiste en una inundación completa de la red con un mensaje de solicitud de descubrimiento de ruta.

Un nodo buscando una ruta transmite un mensaje de descubrimiento de ruta que puede ser captado en una región circular con un área dada por $A = \pi R^2$ [m²]. Al asumir que el nodo receptor destino no se encuentra localizado dentro de esta región, entonces otro nodo en la región A debe retransmitir el mensaje original para extender la región inalcanzable por el mensaje transmitido originalmente y así, consecutivamente, si es necesario. Un porcentaje de las retransmisiones se desperdician ya que se traslapan con el área que ya ha cubierto el mensaje transmitido originalmente. Como resultado de lo anterior, existe un desperdicio de espacio inherente mientras se realiza el proceso de inundación de la red con los mensajes retransmitidos. El nodo que retransmite el mensaje de descubrimiento de ruta puede localizarse en cualquier parte dentro de una distancia de 0 a R [m] desde el nodo que transmitió el primer mensaje. Esto es equivalente a variar el parámetro h entre los valores $R/2$ y R [m]. El valor promedio del área traslapada (\bar{b}) es:

$$\bar{b} = \frac{2}{R} \int_{\frac{R}{2}}^R b(h) dh \quad (IV - 3)$$

$$\bar{b} = \frac{2}{R} \int_{\frac{R}{2}}^R \left(2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - 2(R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \right) dh$$

Para resolver la primera parte de la integral (IV - 3) se efectúa el cambio de variable $s = \frac{R-h}{R}$ y se integra por partes, obteniendo:

$$\int \left(2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) \right) dh = - \int (2R^3 \cos^{-1}(s)) ds = -2R^3 s \cos^{-1}(s) - \int 2R^3 \frac{s}{\sqrt{1-s^2}} ds \quad (IV - 4)$$

Sustituyendo $t = 1 - s^2$, en la integral anterior (IV - 4) se puede resolver mediante:

$$\begin{aligned} - \int 2R^3 \frac{s}{\sqrt{1-s^2}} ds - 2R^3 s \cos^{-1}(s) &= \int R^3 \frac{1}{\sqrt{t}} dt - 2R^3 s \cos^{-1}(s) \\ &= 2R^3 \sqrt{\frac{2hR-h^2}{R^2}} - 2R^2(R-h) \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) \end{aligned} \quad (IV - 5)$$

Para resolver la segunda parte de la integral (IV – 3) se efectúa el cambio de variable $u = 2hR - h^2$ y se obtiene:

$$-\int 2(R-h)\sqrt{2Rh-h^2} dh = -\int \sqrt{u} du = -\frac{2}{3}u^{3/2} = -\frac{2}{3}(2Rh-h^2)^{3/2} \quad (\text{IV}-6)$$

Reagrupando las soluciones de ambas integrales se tiene:

$$\int \left(2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - 2(R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \right) dh = 2R^3 \sqrt{\frac{2hR-h^2}{R^2}} - 2R^2(R-h)\cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - \frac{2}{3}(2Rh-h^2)^{3/2} \quad (\text{IV}-7)$$

Finalmente, al valorar la integral anterior se obtiene que la región promedio trasladada, aproximadamente, es igual a:

$$\bar{b} = \frac{2}{R} \int_0^{R/2} \left(2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - 2(R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \right) dh \approx 0.68A \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV}-8)$$

Con el fin de remover la dependencia con respecto al término h en la ecuación que permite calcular el área de la región trasladada (b), se debe obtener dicha área para dos nodos intermedios en una ruta. Como el término h puede variar entre los valores 0 y $R/2$, para este caso el área promedio de la región trasladada (\bar{b}) corresponde a:

$$\bar{b} = \frac{2}{R} \int_0^{R/2} \left(2R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - 2(R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \right) dh \approx 0.16A \quad (\text{IV}-9)$$

El valor anterior corresponde a utilizar el término h , con un valor promedio dado por $\bar{h} \approx 0.265R$.

Obviamente, un mensaje retransmitido puede traslaparse no sólo con el nodo original, sino con regiones potenciales que son cubiertas por mensajes retransmitidos por nodos circundantes. Por tanto, el valor de b puede ser inferior al valor calculado. Si el área total de la red es A_T , luego el número total de mensajes a retransmitir $Q(R)$ a la distancia R que son necesarios para inundar satisfactoriamente la red por completo está dado por:

$$Q(R) \approx \frac{A_T}{(1 - 0.68)A} \approx \frac{A_T}{(1 - 0.68)\pi R^2} \quad (\text{IV} - 10)$$

Debido a la relación inversamente proporcional al cuadrado de $Q(R)$ respecto a la distancia R , entonces si se reduce la potencia de transmisión, es decir el alcance dado por la distancia R , se generará un número excesivo de retransmisión de mensajes necesarios para poder completar la inundación de la red. Como consecuencia, el empleo de un alcance de transmisión mayor puede proporcionar mejor desempeño.

4.4 MANTENIMIENTO DE RUTA

Una propiedad de la mayoría de los protocolos de encaminamiento de las redes inalámbricas *ad-hoc* móviles es que intentan reducir el número de nodos intermedios por cada ruta en la red. El resultado de aplicar esta política de encaminamiento se traduce en que las rutas quedan comprendidas dentro de una región de interconexión entre los nodos fuente y destino. Desde el punto de vista del protocolo de encaminamiento utilizado, existe una región b donde un nodo intermedio potencial puede estar localizado y empleado como el siguiente salto en la ruta hacia el nodo destino (al asumir una gran densidad de nodos se supone que pueden localizarse varios nodos intermedios en dicha región).

Ahora, se analizará el impacto de la movilidad de los nodos y el alcance de transmisión sobre el número de eventos de reestablecimiento de ruta por segundo que son generados por el protocolo de encaminamiento.

El número de nodos por segundo que cruzan la región \mathbf{b} , denotado por \mathbf{N}_c , es:

$$\mathbf{N}_c = \frac{\rho \mathbf{v} \mathbf{F}}{\pi} \quad [\text{nodos / s}] \quad (\text{IV} - 11)$$

donde:

ρ : Densidad de nodos en la red [nodos / m²]

\mathbf{v} : Velocidad promedio de los nodos [m / s]

\mathbf{F} : Perímetro de la región traslapada \mathbf{b} [m]

El perímetro \mathbf{F} de la región traslapada \mathbf{b} está dado por:

$$\mathbf{F} = 2\mathbf{S} = 2\mathbf{R}\theta = 4\mathbf{R} \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{R} - \mathbf{h}}{\mathbf{R}}\right) \quad [\text{m}] \quad (\text{IV} - 12)$$

Por tanto:

$$\mathbf{N}_c = \frac{4\rho \mathbf{v} \mathbf{R} \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{R} - \mathbf{h}}{\mathbf{R}}\right)}{\pi} \quad [\text{nodos / s}] \quad (\text{IV} - 13)$$

En esta ecuación se asume que los nodos se mueven en direcciones aleatorias y con una velocidad constante y existe conservación de flujo en el área traslapada (la cantidad de nodos que ingresan a la región es igual a la cantidad de nodos que la abandonan). El número promedio de nodos presentes en la región \mathbf{b} , denotado por \mathbf{N}_b , es:

$$\mathbf{N}_b = \rho \mathbf{b} \quad [\text{nodos}] \quad (\text{IV} - 14)$$

Un nodo que ingresa a la región b a una velocidad v se mantiene un tiempo promedio (T_{Nb}) en el interior de la región antes de abandonarla, el cual puede calcularse mediante:

$$T_{Nb} = \frac{N_b}{N_c} \quad [s] \quad (IV - 15)$$

Reemplazando N_b y N_c por las ecuaciones definidas anteriormente, se obtiene que:

$$T_{Nb} = \frac{\pi \rho b}{4 \rho v R \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)} \quad [s]$$

Sustituyendo el área de la región traslapada (b) en función del término h , en la ecuación anterior se encuentra que:

$$T_{Nb} = \pi \left(\frac{R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}}{2vR \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)} \right) \quad [s] \quad (IV - 16)$$

El parámetro T_{Nb} se relaciona directamente con la conectividad de la red debido a que contabiliza cuánto tiempo permanece un nodo en una posición de relevo de una ruta antes de que sea necesario reemplazarlo por un nuevo nodo. Por tanto, se puede asumir que el número de eventos de reestablecimiento de ruta por segundo en la red es proporcional al inverso dado por $\frac{1}{T_{Nb}}$.

A continuación, FIGURA IV - 4 muestra la gráfica que corresponde al comportamiento del tiempo promedio de permanencia de un nodo en el área de traslape ($T_{Nb}(v)$) (en escala logarítmica) con respecto a la velocidad promedio con la que se mueven las estaciones (v).

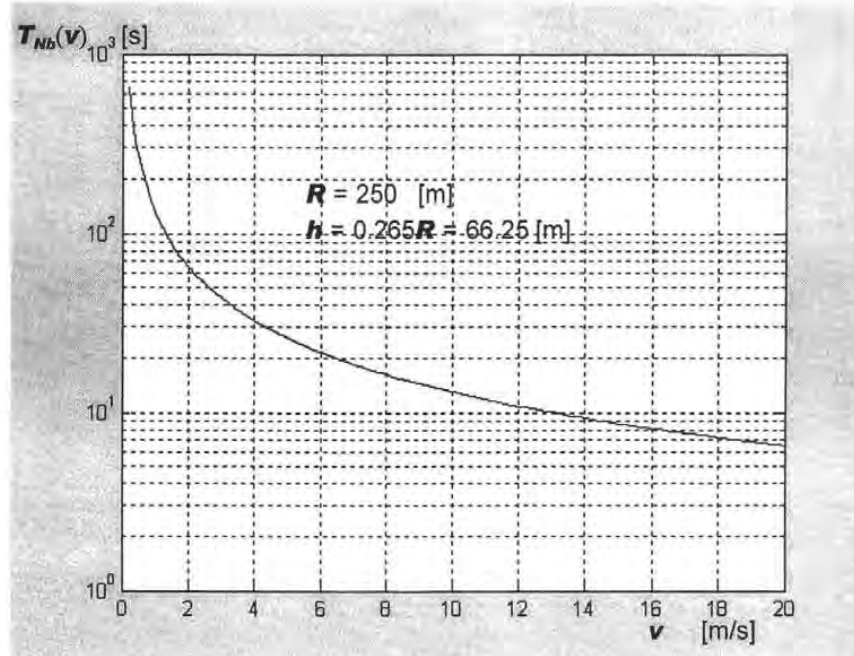


FIGURA IV – 4 Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.

La grafica anterior presenta una caída abrupta, puesto que a mayor velocidad con que se mueva un nodo en la red, menor es el tiempo que podrá permanecer en el área de traslape de las zonas de cobertura de dos nodos. Esto afecta directamente al tiempo de vida útil de un enlace entre el nodo fuente y el nodo destino, ya que por lo regular en dicho enlace intervienen más de un nodo intermedio y el hecho de que cualquiera de ellos abandone el área de cobertura de sus nodos vecinos, provoca la interrupción de la comunicación establecida. Si L es la longitud promedio que separa al par de nodos fuente y destino en la red en el transcurso del tiempo, luego existen, en promedio, un número de nodos intermedios, denotado por N_{int} , que se encuentra por:

$$N_{int} = \frac{L}{d} = \frac{L}{R - h} \quad [\text{nodos}] \quad (\text{IV} - 17)$$

El número promedio de eventos de reestablecimientos de ruta por segundo por ruta en la red, denotado por J , es proporcional a la siguiente razón:

$$J \propto \frac{N_{int}}{T_{Nb}} \quad (\text{IV} - 18)$$

Sustituyendo N_{int} y T_{Nb} por las relaciones definidas anteriormente, se obtiene:

$$J \propto \frac{L}{\pi(R-h)} \left(\frac{2vR \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)}{R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}} \right) \quad (IV - 19)$$

El factor R^2 en el denominador de la ecuación anterior domina el comportamiento de J , y cuánto mayor sea el valor del alcance de transmisión R , mayor será el intervalo de tiempo que se mantiene el nodo remitir en la ruta antes de que sea necesario reemplazarlo y, por tanto, se requiere de una menor cantidad de mensajes de señalización para mantener las rutas existentes. Por otra parte, el número de mensajes de señalización necesarios para mantener una ruta antes de que se requiera un evento de reestablecimiento de ruta depende del protocolo de encaminamiento que se esté utilizando.

4.5 RETARDO EN LA TRANSMISIÓN DE UN PAQUETE EN UNA RED INALÁMBRICA

Definición del retardo en la transmisión de un paquete: El retardo en la transmisión de un paquete en una red de comunicaciones es el tiempo que transcurre desde que el paquete abandona al nodo fuente hasta que alcanza al nodo destino. En este lapso de tiempo no se considera el retardo adicional que involucra el tiempo necesario que tiene que permanecer el paquete en la fila de espera para evitar colisiones en el medio. El tiempo de retardo promedio en la transmisión de un paquete ($D(n)$) en una red con n nodos, se puede obtener promediando el tiempo de todos los paquetes entre todos los pares fuente – destino y considerando todas las configuraciones de red aleatorias.

Debido a la imposibilidad práctica del procedimiento anterior, es necesario estimar el retardo promedio en la transmisión de un paquete ($D(n)$) en una red con n nodos, para lo cual se debe calcular el número promedio de ranuras de tiempo que es necesario ocupar para transmitir satisfactoriamente una trama de datos a través de la red (N_R) y el tiempo promedio de la duración de una ranura de tiempo (T_R).

La probabilidad condicional (p) de que un paquete transmitido por una de las n estaciones enfrente una colisión en el canal de comunicación debido a que alguno de los ($n - 1$) nodos restantes transmita en la misma ranura de tiempo. Si la probabilidad de que una estación transmita en una ranura de tiempo seleccionada aleatoriamente (τ), entonces la probabilidad de que un paquete transmitido por una de las n estaciones enfrente una colisión en el canal de comunicación (p) está dada por:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (\text{IV} - 20)$$

Existe una ecuación, encontrada por J. J. García Luna Aceves, que permite estimar la probabilidad de que un paquete transmitido por una de las n estaciones enfrente una colisión en el canal de comunicación (p) a partir de la cantidad de estaciones n , y la ventana mínima de contención W_{min} , la cual está dada por:

$$p(n) \approx \frac{2W_{min}(n-1)}{(W_{min} + 1)^2 + 2W_{min}(n-1)} \quad (\text{IV} - 21)$$

A su vez, la probabilidad de que una estación transmita en una ranura de tiempo seleccionada aleatoriamente (τ) puede encontrarse mediante:

$$\tau(p) \approx \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W_{min} + 1) + pW_{min}(1-(2p)^m)} \quad (\text{IV} - 22)$$

Por otra parte, la probabilidad (p_t) de que al menos ocurra una transmisión en una ranura de tiempo dada, se obtiene mediante:

$$p_t = 1 - (1 - \tau)^n \quad (\text{IV} - 23)$$

Ahora, la probabilidad (p_s) de que suceda una transmisión satisfactoria, está dada por:

$$p_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (\text{IV} - 24)$$

Entonces, el número promedio de ranuras de tiempo que son necesarias para transmitir satisfactoriamente una trama de datos a través de la red (N_R) y el tiempo promedio de la duración de una ranura de tiempo (T_R), se obtienen mediante:

$$N_R = \frac{1}{\tau(1-p)} \quad (\text{IV} - 25)$$

$$N_R = \frac{(1-2p)(W_{min} + 1) + pW_{min}(1-(2p)^m)}{2(1-2p)(1-p)}$$

$$T_R = (1-p_t)T_\sigma + p_t p_s T_s + p_t(1-p_s)T_c \quad (\text{IV} - 26)$$

donde:

T_σ : Duración de una ranura de tiempo vacía

T_s : Tiempo promedio que detectan las estaciones que el medio está ocupado por una transmisión satisfactoria

T_c : Tiempo promedio que detectan las estaciones que el medio está ocupado por una colisión

El tiempo promedio que detectan las estaciones que el medio está ocupado por una transmisión satisfactoria (T_s) y el tiempo promedio que detectan las estaciones que el medio está ocupado por una colisión (T_c) se calculan, dependiendo el método de acceso utilizado en la capa de control de acceso al medio (MAC) mediante las siguientes fórmulas:

a) Método básico:

$$T_s = T_{DIFS} + T_H + T_P + T_{SIFS} + T_{ACK} + T_\sigma \quad (\text{IV} - 27)$$

$$T_c = T_{DIFS} + T_H + T_P + T_\sigma$$

b) Método con intercambio de paquetes **RTS / CTS**:

$$\begin{aligned} T_s &= T_{DIFS} + T_{RTS} + 3T_{SIFS} + T_{CTS} + T_H + T_P + T_{ACK} + 4T_\sigma \\ T_c &= T_{DIFS} + T_{RTS} + T_\sigma \end{aligned} \quad (IV - 28)$$

donde:

- T_σ : Duración de una ranura de tiempo vacía
- T_{SIFS} : Duración del espacio entre tramas **SIFS**
- T_{DIFS} : Duración del espacio entre tramas **DIFS**
- T_{RTS} : Tiempo de transmisión del paquete de solicitud de envío (**RTS**)
- T_{CTS} : Tiempo de transmisión del paquete de aceptación de envío (**CTS**)
- T_{ACK} : Tiempo de transmisión del paquete de acuse de recibo (**ACK**)
- T_H : Tiempo de transmisión de los encabezados del paquete transmitido (**HEADERS**)
- T_P : Tiempo de transmisión promedio del paquete de datos útiles transmitidos (**PAYLOAD**)

$$T_\sigma = 20 \quad [\mu S] \quad T_{SIFS} = 10 \quad [\mu S] \quad T_{DIFS} = T_{SIFS} + 2T_\sigma = 10 + 2(20) = 50 \quad [\mu S]$$

$$T_{RTS} = \frac{L_{RTS}}{R_{Tx}} \quad T_{CTS} = \frac{L_{CTS}}{R_{Tx}} \quad T_{ACK} = \frac{L_{ACK}}{R_{Tx}} \quad T_H = \frac{L_H}{R_{Tx}} \quad T_P = \frac{L_P}{R_{Tx}} \quad (IV - 29)$$

TABLA IV – 1 LONGITUD Y TIEMPO DE TRANSMISIÓN DE PAQUETES.

Tasa de Transmisión	Longitud del Paquete	Tiempo de Transmisión
$R_{Tx} = 2$ [Mbps]	$L_{RTS} = 44$ [bytes] = 352 [bits]	$T_{RTS} = 176$ [μS]
	$L_{CTS} = 38$ [bytes] = 304 [bits]	$T_{CTS} = 152$ [μS]
	$L_{ACK} = 38$ [bytes] = 304 [bits]	$T_{ACK} = 152$ [μS]
	$L_H = 34$ [bytes] = 272 [bits]	$T_H = 136$ [μS]
	$L_P = 1,500$ [bytes] = 12,000 [bits]	$T_P = 6,000$ [μS]

Por último, el retardo promedio de un paquete $D(n)$ en una red con n nodos conteniendo por transmitir, se obtiene multiplicando el número promedio de ranuras de tiempo que son necesarias para transmitir satisfactoriamente una trama de datos a través de la red (N_R) por el tiempo promedio de la duración de una ranura de tiempo (T_R), esto es:

$$D(n) = N_R T_R \quad (IV - 30)$$

La FIGURA IV – 5 corresponde a la gráfica del retardo promedio de un paquete contra el número de estaciones.

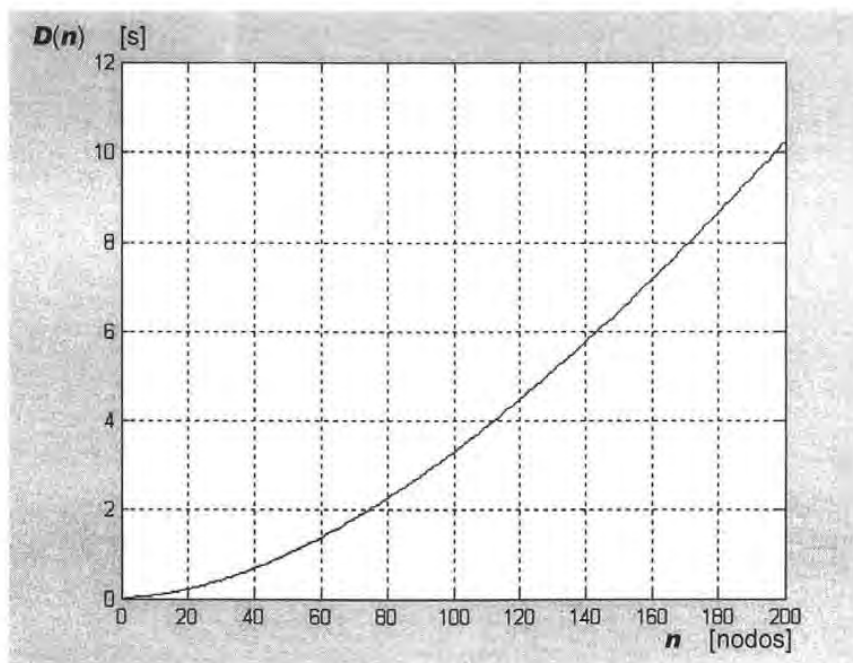


FIGURA IV – 5 Gráfica del retardo promedio de un paquete contra el número de estaciones.

En esta gráfica se puede observar que el retardo se incrementa con una tendencia exponencial conforme aumenta el número de nodos que contienen por transmitir en la red, ya que el tiempo que debe esperar una estación para poder transmitir aumenta conforme mayor sea el número de nodos que contengan por el canal de comunicación.

El valor promedio del retardo total que experimenta un paquete ($\Delta(n)$) en una red con n estaciones en un enlace de comunicación en ambas direcciones (bidireccional) entre el nodo fuente y el nodo destino, es el resultado de duplicar el retardo promedio de un paquete ($D(n)$), que se considera se mantiene prácticamente constante durante todos los enlaces intermedios (*saltos*) que sean necesarios para establecer la comunicación entre ambos nodos por el número promedio de dichos saltos (S_{F-D}).

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Por otra parte, este retardo sufre un incremento considerable cuando se presentan colisiones por la ocurrencia de transmisiones realizadas por estaciones ocultas. Para considerar este incremento, es necesario agregar un factor que se relaciona con la probabilidad de que exista una transmisión efectuada por una estación oculta (p_{ht}). Con base en lo anterior, el valor promedio del retardo total que experimenta un paquete ($\Delta(n)$) en una red con n estaciones, considerando un enlace de comunicación en ambas direcciones entre el nodo fuente y el nodo destino se obtiene mediante:

$$\Delta(n) = \frac{2s_{F-D}}{(1 - p_{ht})} D(n) \quad (\text{IV} - 31)$$

Se considerará que el valor promedio del retardo total que experimenta la transmisión de un paquete ($\Delta(n)$) en una red con n estaciones, es prácticamente equivalente al tiempo necesario para establecer una ruta de comunicación que enlaza a dichos nodos.

A continuación, se presentan dos gráficas (FIGURA IV – 6 y FIGURA IV – 7) que corresponden al valor promedio del retardo total que experimenta un paquete ($\Delta(n)$) en una red con n estaciones en un enlace de comunicación en ambas direcciones entre el nodo fuente y el nodo destino, considerando la influencia de diversos factores, como son:

Número de saltos: $s_{F-D} = 1, 5$ y 10

Probabilidad de una transmisión por una estación oculta: $p_{ht} = 0\%, 20\%, 40\%$ y 60% .

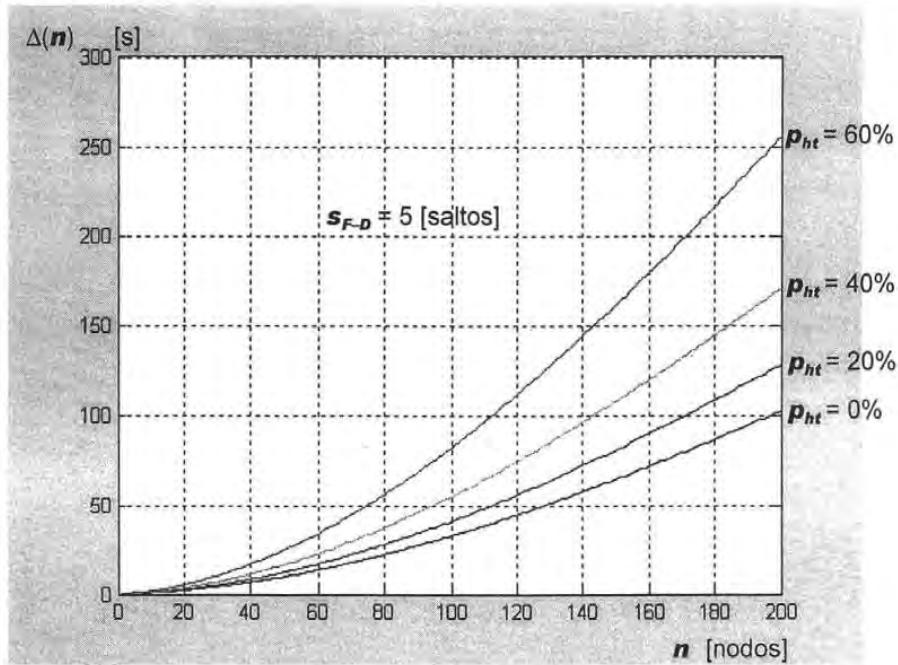


FIGURA IV – 6 Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.

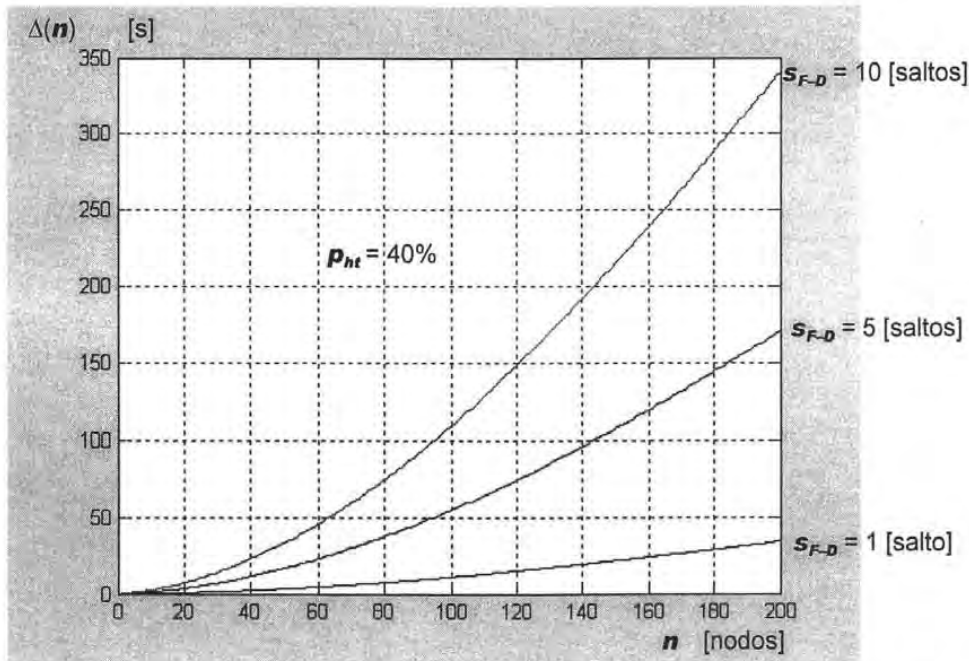


FIGURA IV – 7 Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.

Las gráficas anteriores (FIGURA IV – 6 y IV – 7) muestran que el retardo total en la transmisión de un paquete en una red inalámbrica, sufre un incremento considerable conforme aumentan la cantidad de estaciones en la red, la probabilidad de que ocurra una transmisión por un nodo oculto o la cantidad de estaciones intermedias (saltos) que deben intervenir para establecer el enlace de comunicación entre los nodos fuente y destino.

Las siguientes 3 gráficas (FIGURA IV – 8, FIGURA IV – 9 y FIGURA IV – 10) muestran un comparativo entre el valor promedio del retardo total que experimenta un paquete ($\Delta(n)$) en una red de n nodos en un enlace de comunicación en ambas direcciones entre el nodo fuente y el nodo destino con respecto al tiempo de permanencia de un nodo intermedio ($T_{Nb}(v)$) en la zona de traslape de las áreas de cobertura de dos estaciones adyacentes cuando dicho nodo se mueve a una velocidad específica. En estas gráficas se consideraron los siguientes valores para los parámetros que se indican a continuación:

Velocidad: $v = 5, 10$ y 20 [m/s]

Número de saltos: $s_{F-D} = 1, 5$ y 10 [saltos]

Probabilidades de transmisión por una estación oculta: $p_{ht} = 0, 20\%, 40\%$ y 60% .

Alcance de transmisión: $R = 250$ [m].

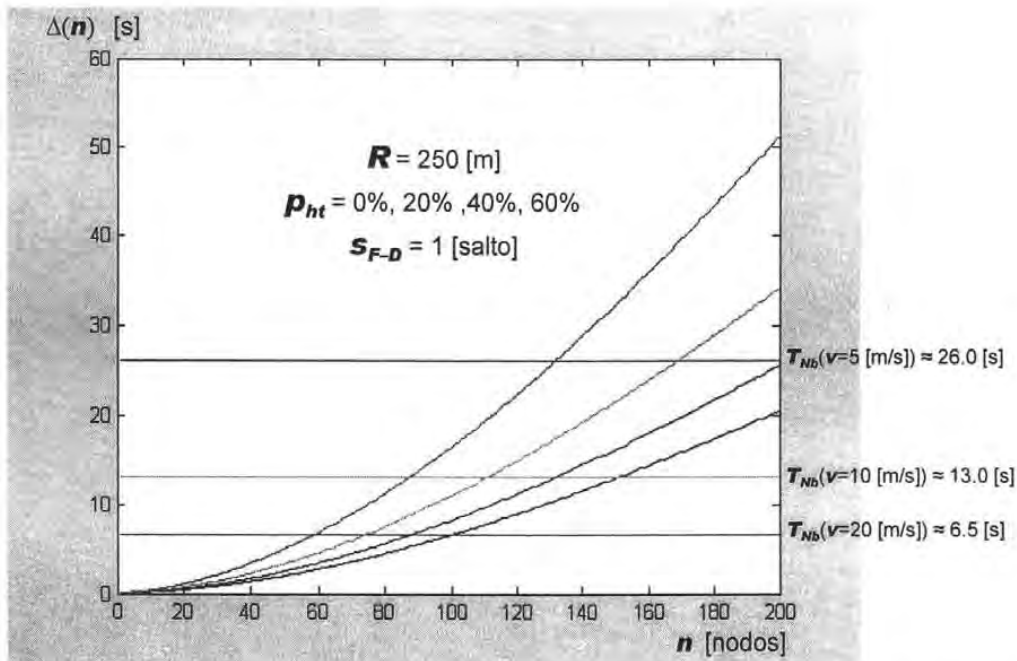


FIGURA IV – 8 Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.

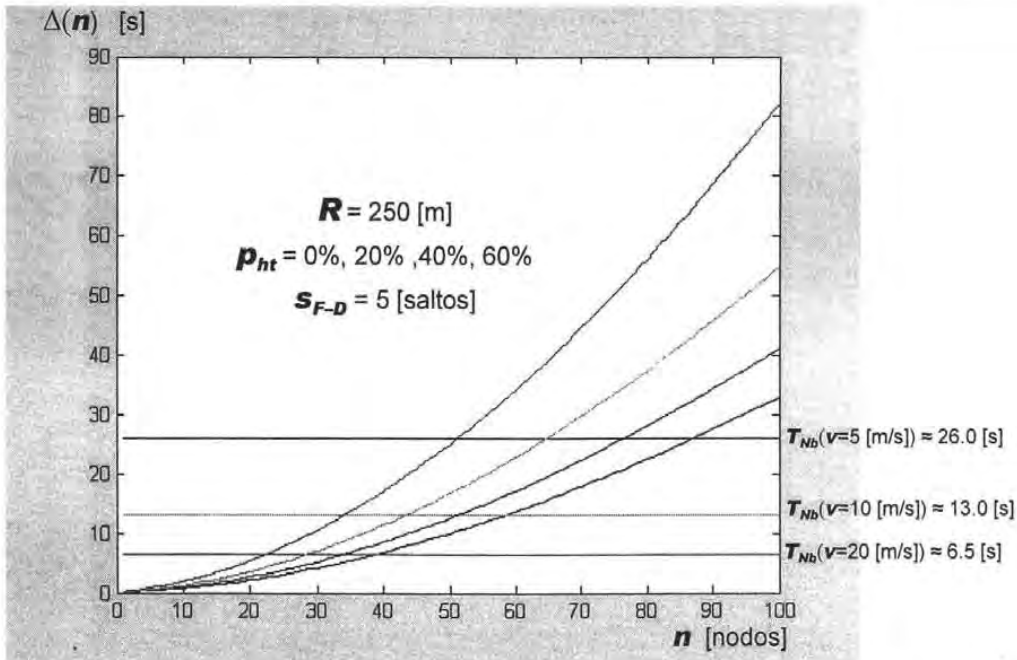


FIGURA IV – 9 Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.

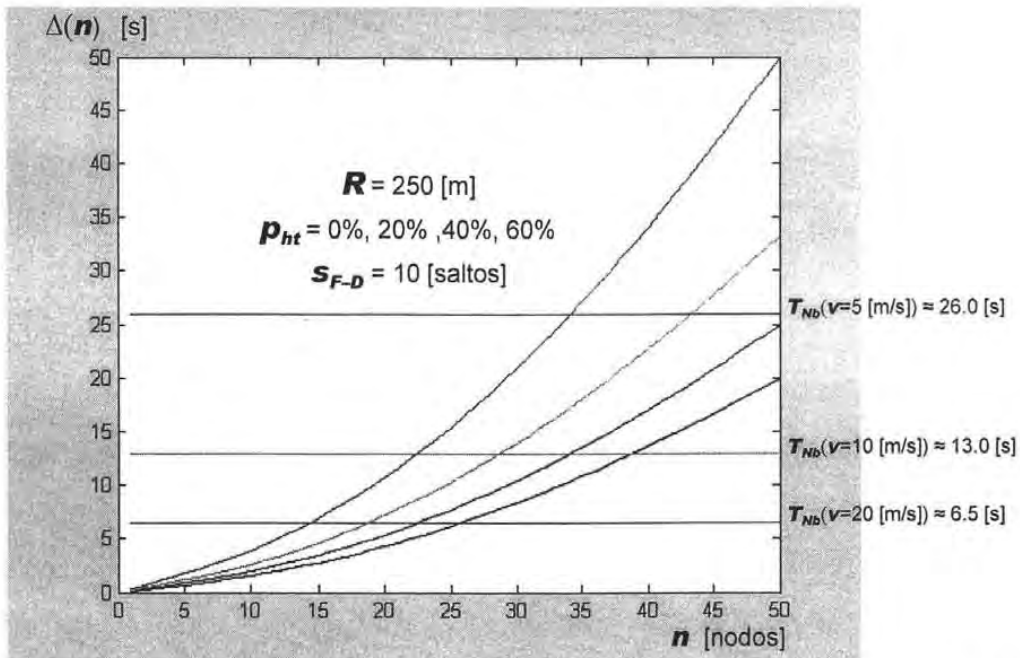


FIGURA IV – 10 Gráfica del retardo total de un paquete contra el número de estaciones.

En las gráficas anteriores (FIGURA IV – 8, IV – 9 y IV – 10), los puntos de intersección entre el retardo total que experimenta la transmisión de un paquete en una red inalámbrica y el tiempo de permanencia de los nodos en el área de traslape para algunos valores de velocidad, proporcionan la cantidad máxima de nodos que pueden estar en contención en la red. Si se supera el número de estaciones máximo, el tiempo de permanencia en el área de traslape resulta ser inferior al tiempo que se requiere para establecer el enlace entre cualquier par de nodos fuente y destino, provocando la pérdida de la conectividad.

Las siguientes 3 gráficas (FIGURA IV – 11, FIGURA IV – 12 y FIGURA IV – 13) muestran un comparativo entre el tiempo de permanencia de un nodo intermedio ($T_{Nb}(v)$) en la zona de traslape de las áreas de cobertura de dos estaciones adyacentes con respecto al valor promedio del retardo total que experimenta un paquete ($\Delta(n)$) en una red inalámbrica, para un enlace de comunicación en ambas direcciones entre el nodo fuente y el nodo destino.

En estas gráficas se consideraron los valores indicados para los siguientes parámetros:

Cantidad de en la red $n = 10, 25, 50$ [nodos]

Número de saltos $s_{F-D} = 1, 5$ y 10 [saltos]

Probabilidad de transmisión por una estación oculta: $p_{ht} = 40\%$

Alcance de transmisión: $R = 250$ [m].

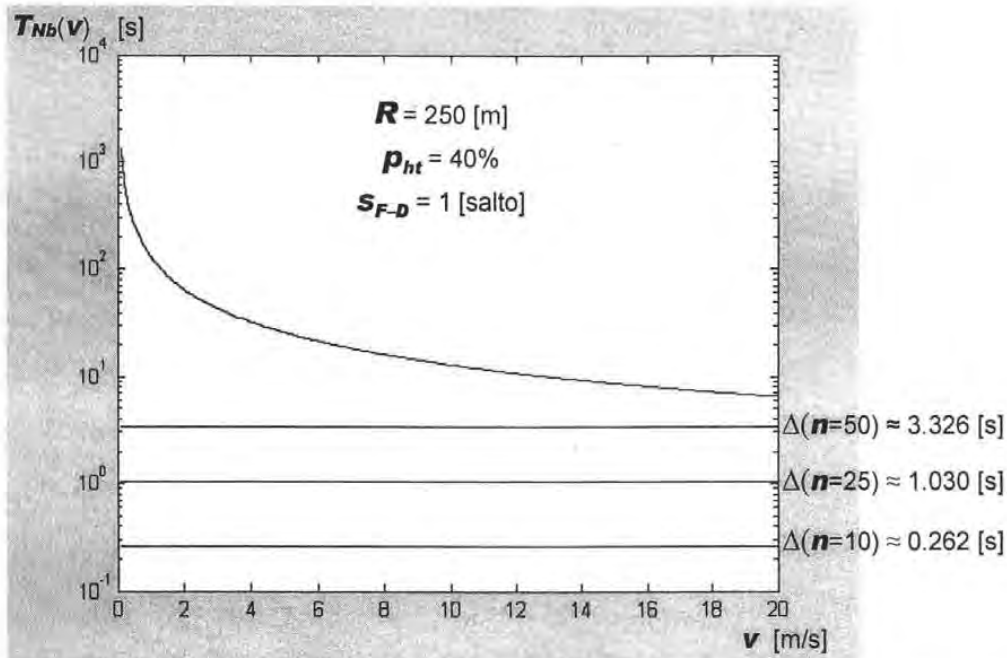


FIGURA IV – 11 Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.

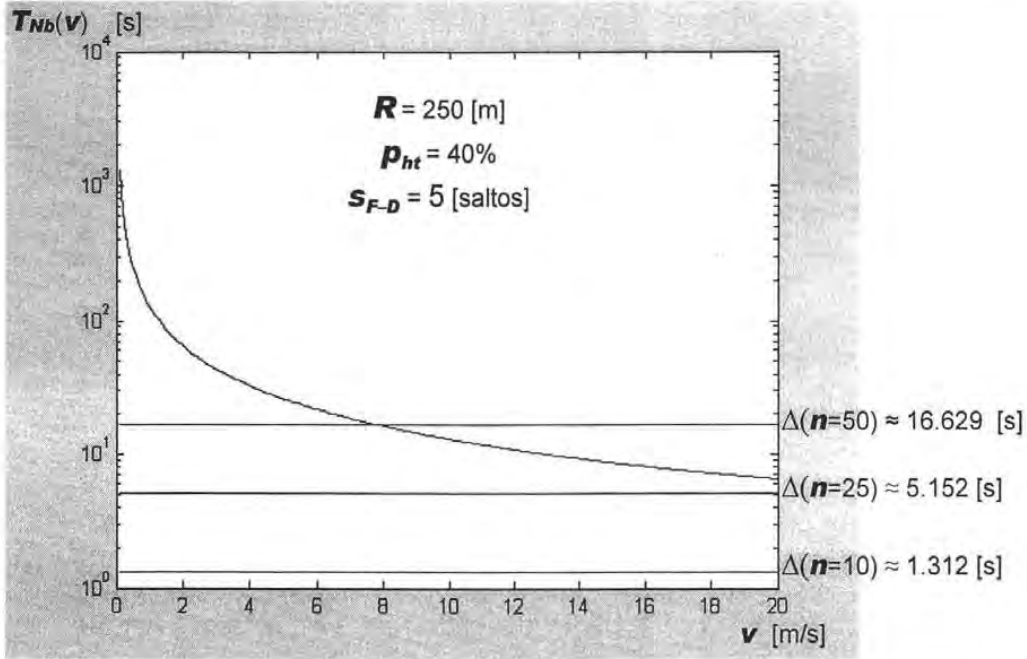


FIGURA IV – 12 Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.

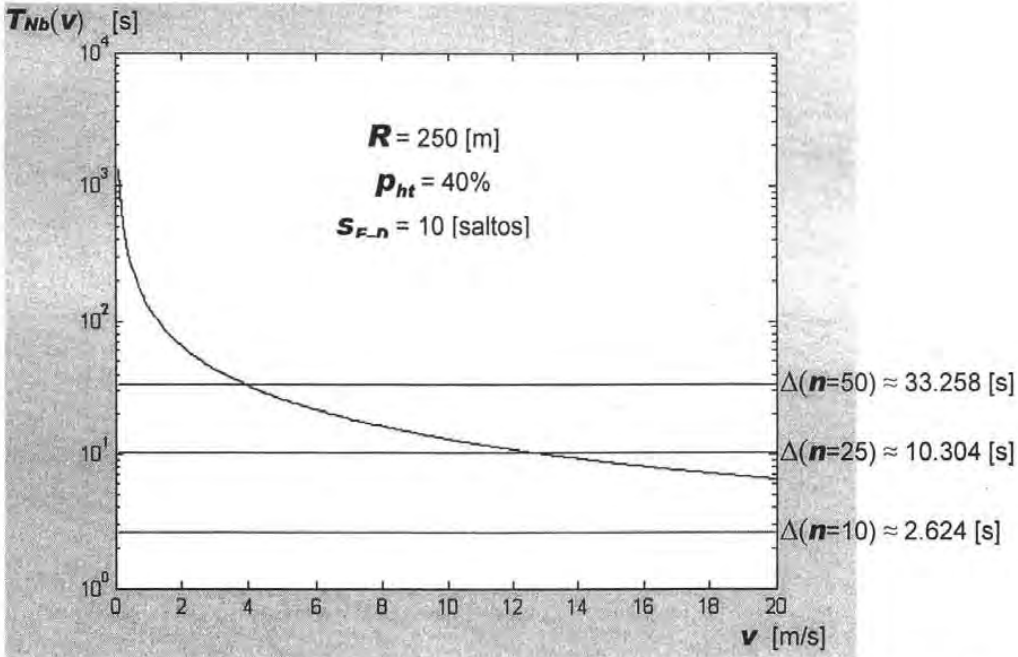


FIGURA IV – 13 Gráfica del tiempo promedio de permanencia contra la velocidad.

En las gráficas anteriores (FIGURA IV – 11, IV – 12 y IV – 13), los puntos de intersección entre los retardos totales que experimenta la transmisión de un paquete en una red inalámbrica para las cantidades de nodos especificadas y el tiempo de permanencia de los nodos en el área de traslape en función de la velocidad, proporcionan la velocidad máxima a la que pueden moverse los nodos en la red, si se supera la velocidad máxima, el tiempo de permanencia en el área de traslape resulta ser inferior al tiempo que se requiere para establecer el enlace entre cualquier par de nodos fuente y destino, provocando la pérdida de la conectividad.

Se desea estimar el límite máximo en la velocidad a la que pueden moverse las estaciones en una red de sensores inalámbricos que garantice la conectividad en la red de comunicación. Para asegurar lo anterior, se debe cumplir que el tiempo de permanencia de cualquier nodo intermedio (T_{Nb}) que forma parte del enlace que comunica al nodo fuente con el destino sea mayor al tiempo necesario para establecer esta ruta ($\Delta(n)$). Transcribiendo lo anterior al lenguaje matemático se tiene que:

$$T_{Nb} > \Delta(n) \quad (\text{IV} - 32)$$

donde:

$$T_{Nb} = \pi \left(\frac{R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}}{2vR \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)} \right) \text{ y } \Delta(n) = \frac{2s_{F-D}}{(1-p_{ht})} D(n)$$

Tomando en consideración los siguientes valores promedio para IEEE 802.11:

$$R = 250 \text{ [m]}$$

$$h = 0.265R = 66.25 \text{ [m]}$$

Al sustituir estos valores en la ecuación del tiempo de permanencia (T_{Nb}), ésta se puede simplificar reemplazando el término constante dado por:

$$k = \pi \left(\frac{R^2 \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2}}{2R \cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)} \right) \quad (\text{IV} - 33)$$

Entonces, la ecuación del tiempo de permanencia simplificada queda:

$$T_{Nb}(v) = \frac{k}{v} \quad (\text{IV} - 34)$$

Sustituyendo en la desigualdad y despejando la velocidad se obtiene:

$$T_{Nb}(v) > \Delta(n) \quad (\text{IV} - 35)$$

$$\frac{k}{v} > \Delta(n) \quad (\text{IV} - 36)$$

Quedando la expresión para determinar el límite superior de la velocidad como:

$$v < \frac{k}{\Delta(n)} \quad (\text{IV} - 37)$$

O bien:

$$v < \frac{k(1 - p_{ht})}{2s_{F-D}D(n)} \quad (\text{IV} - 38)$$

En la siguiente tabla se consideran ciertos valores para obtener el límite teórico de la velocidad máxima a la que pueden moverse los nodos en una red de sensores inalámbricos para mantener la conectividad de la red.

TABLA IV – 2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA DE LOS NODOS EN UNA RED DE SENSORES.

n [nodos]	R [m]	h [m]	k [-]	p_{ht} [-]	s_{F-D} [saltos]	v [m/s]
50	250	66.25	130.0426	40%	1	39.1017
					2	19.5508
					3	13.0339
					4	9.7754
					5	7.8203
					6	6.5169
					7	5.5860
					8	4.8877
					9	4.3446
					10	3.9102

La FIGURA IV – 4 muestra la gráfica de la tabla anterior.

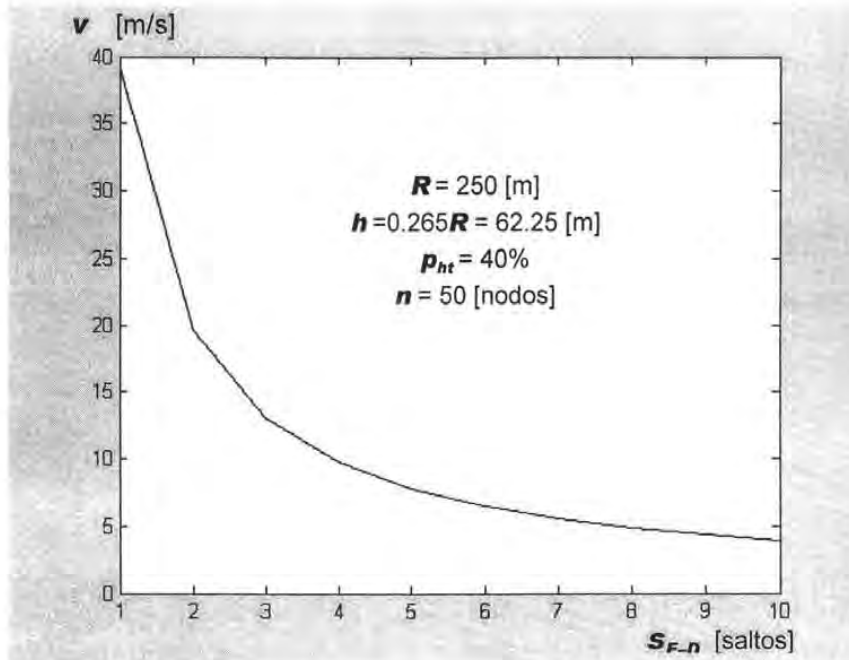


FIGURA IV – 14 Gráfica de la velocidad (v) contra saltos (S_{F-D}) de la TABLA IV – 2.

En esta gráfica se puede apreciar que la velocidad máxima a la que se pueden mover los nodos en una red de sensores inalámbricos disminuye considerablemente cuanto mayor sea la cantidad de saltos que haya que realizar para alcanzar establecer el enlace entre los nodos fuente y destino. Para el caso expuesto, si la velocidad es $v = 5$ [m/s], la cantidad máxima de saltos (S_{F-D}) oscila entre 8 y 9 saltos. Para una velocidad $v = 20$ [m/s], la cantidad máxima de saltos (S_{F-D}) se reduce a aproximadamente 2 saltos. Esta limitante en el número de saltos, restringe la distancia máxima a la que pueden estar los nodos fuente y destino y, por consiguiente, delimita el área total que puede ser cubierta por la red de comunicación.

Cuando en el enlace de comunicación entre cualquier par de nodos fuente y destino requiere de la intervención de varias estaciones intermedias de la red inalámbrica, entonces si uno de los nodos emisores abandona la zona de traslape definida por la intersección de los alcances de dos nodos contiguos, se pierde la comunicación (deja de ser válida la ruta establecida) hasta que algún otro nodo lo reemplace o se establezca un nuevo enlace.

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Para poder analizar la validez de los resultados teóricos proporcionados por el modelo analítico de movilidad utilizado para encontrar el límite máximo de la velocidad a la que pueden moverse los nodos en la red de sensores inalámbricos para mantener la conectividad de la red de comunicación, es necesario obtener resultados experimentales, recurriendo para esto a un programa de simulación que permita comparar los resultados teóricos con los valores que proporcione el programa. Una vez obtenidos los resultados de la simulación y, si resultan congruentes con los resultados provistos por el modelo teórico, será posible probar el modelo al aplicarlo en un caso práctico que pueda desarrollarse en un trabajo de investigación posterior.

5.1.1 NETWORK SIMULATOR VERSIÓN 2 (NS – 2)

El programa *Network Simulator NS – 2*, permite analizar el comportamiento de las redes de comunicaciones pues consiste en un simulador de eventos discretos enfocado a los protocolos de las redes que operan en las diferentes capas del modelo de referencia. El apéndice de este trabajo de investigación contiene información más detallada sobre los principios de funcionamiento y las principales características de este programa de simulación.

5.1.2 SIMULACIÓN DE REDES MÓVILES (INALÁMBRICAS) MEDIANTE EL PROGRAMA NS – 2

El modelo original de movilidad utilizado en el programa de simulación *NS – 2* fue una contribución del grupo Monarca de la Universidad Carnegie Mellon (CMU – Carnegie Mellon University). Otras contribuciones adicionales integradas a este modelo fueron aportadas por la Universidad de California, Berkeley (UCB), la compañía Sun Microsystems, la Universidad de Cincinnati, el Instituto de Ciencias de la Información de la Universidad del Sur de California (USC/ISI University of Southern California / Information Sciences Institute), etc.

Existen diversos modelos para redes inalámbricas que todavía no han sido integrados al programa *NS – 2*, pero resultan útiles para diversos propósitos de estudio, entre estos modelos están los siguientes: Blueware, BlueHoc, Mobiwan, GPRS, CIMS, etc. La definición del nodo móvil es la base del modelo de movilidad, los nodos móviles se pueden mover en una topología dada, recibiendo y transmitiendo señales desde y hacia los canales inalámbricos. El conjunto o pila de protocolos de la red inalámbrica incluye a varias capas, interfaces y módulos, entre los que se encuentran: la Capa de Enlace (**LL – Link Layer**), el módulo de resolución de direcciones (**ARP – Address Resoultion Protocol**), la capa de Control de Acceso al Medio (**MAC – Medium Access Control**), la Interfaz de enfilamiento, etc. El modelo móvil permite la simulación de redes tipo *ad – hoc* por saltos múltiples, redes de área local inalámbricas (**WLAN – Wireless Local Area Networks**), redes de sensores, etc.

Un nodo móvil consiste básicamente en un conjunto de clasificadores (clasificador de direcciones y clasificador de puertos), agente de encaminamiento, un conjunto o pila de componentes como la capa de enlace, la capa de control de acceso al medio, la interfaz de red, el modelo de radio propagación, el canal inalámbrico, etc.

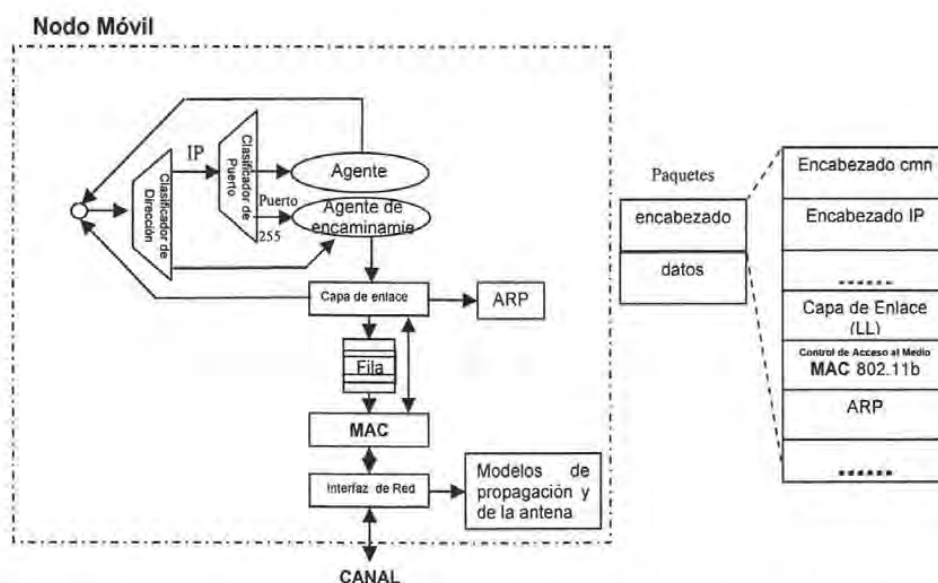


FIGURA V – 1 Diagrama esquemático de un nodo móvil en el programa de simulación *NS – 2*.

Agente de Encaminamiento: el agente de encaminamiento puede aplicar los protocolos de encaminamiento *ad-hoc* como **AODV**, **DSDV**, **DSR**, **TORA** o la difusión dirigida.

Capa de Enlace (LL – Link Layer): La capa de enlace utilizada por los nodos móviles posee asociado el módulo **ARP** que resuelve todas las conversiones de direcciones IP a direcciones físicas de la interfaz de red. Por lo regular, los paquetes salientes (hacia el canal) son administrados por el Agente de encaminamiento. La capa de enlace traslada los paquetes a la interfaz de enfilamiento. Los paquetes entrantes (desde el canal) son administrados por la capa de control de acceso al medio (**MAC**), la cual los traslada a la capa de enlace para que este a su vez los transfiera al punto de entrada al nodo.

ARP (Address Resolution Protocol): Este módulo recibe las solicitudes de la capa de. Si el módulo **ARP** posee la información sobre la dirección física del destino, la escribe en el encabezado **MAC** del paquete. Si no posee la información, radiotransmite una solicitud y retiene temporalmente el paquete. Por cada dirección física de estaciones destino desconocidas existe un almacenamiento temporal para cada paquete. En caso de que existan paquetes adicionales con la misma dirección destino, el paquete que se encontraba previamente almacenado se descarta. Una vez que se conoce la dirección física donde debe enviarse el paquete, este se inserta a la interfaz de enfilamiento.

Interfaz de Enfilamiento: En esta interfaz se aplica una política de prioridad de enfilamiento, la cual da preferencia a los paquetes del protocolo de encaminamiento insertándolos al principio de la fila de espera. Posee un filtro que aplica a los paquetes almacenados en la fila, permitiendo remover aquellos paquetes que tengan una dirección de destino específica

Capa de Control de Acceso al Medio (MAC – Medium Access Control): La capa de acceso al medio utiliza el estándar **IEEE 802.11** con la función de coordinación distribuida (**DCF Distributed Coordination Function**). Se emplea un patrón de intercambio de paquetes **RTS / CTS / DATOS / ACK** para todos los paquetes de transmisión específica (*unicast*) y simplemente se envían los datos para los paquetes de transmisión general (*broadcast*).

Interfaz de Red: La capa de interfaz de red sirve como una interfaz física empleada por el nodo móvil para acceder al canal (medio inalámbrico compartido). Esta interfaz está sujeta a colisiones y se utiliza algún modelo de radio propagación para simular la comunicación de los paquetes entre los nodos conectados a través del canal. A cada paquete transmitido se le agrega información (meta – datos) relacionados con la transmisión como son la potencia de transmisión, la longitud de onda, etc. Esta información se agrega en el encabezado del paquete para que el nodo receptor la utilice y aplique en el modelo de propagación con el que esté operando la simulación, de esta forma se determina si el paquete recibido presenta el nivel de potencia mínima requerida para poder ser recibido, capturado o detectado correctamente por el nodo receptor. El modelo de transmisión que se utiliza aplica la técnica de espectro disperso por secuencia directa (LucentWaveLan DS – SS).

Modelos de Radio Propagación: Se utiliza el modelo de atenuación de espacio libre (Friss) para distancias cercanas ($1/r^2$) y una aproximación del modelo de dos rayos para largas distancias ($1/r^4$) asumiendo reflexiones especulares sobre superficies planas. Aplica un modelo probabilístico para describir los efectos de bloqueo.

Antena: el modelo de antena aplicado considera a una antena omni - direccional con ganancia unitaria.

GENERADOR DE ARCHIVOS DEFINIDORES DE ESCENARIOS CON NODOS MÓVILES

Existen dos versiones de una herramienta, denominada *setdest*, que permite generar archivos definidores de escenarios con nodos móviles para ser utilizados en el programa de simulación *NS – 2*, dicha herramienta se encuentra presente en la ruta *ns-2/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest/* de directorios del programa. La sintaxis para utilizar esta herramienta es:

Versión 1

```
./setdest -n <número de nodos> -p <tiempo de pausa> -s <velocidad máxima> -t <tiempo de simulación> -x <máxima coordenada en x> -y <máxima coordenada en y>
```

Versión 2 (modificada en 2003 por la Universidad de Michigan)

```
./setdest -v [2] -n <número de nodos> -s <tipo de velocidad> -m <velocidad mínima> -M <velocidad máxima> -t < tiempo de simulación > -P <tipo de pausa> -p <tiempo de pausa> -x <máxima coordenada en x> -y <máxima coordenada en y>
```

GENERADOR DE ARCHIVOS DEFINIDORES DE PATRONES DE TRÁFICO

La herramienta, denominada *cbrgen*, sirve para generar archivos definidores de patrones de tráfico con una tasa de transferencia de bits constante (**CBR – Constant Bit Rate**) para que puedan ser utilizados en el programa de simulación *NS – 2*, dicha herramienta se encuentra presente en la ruta *ns-2/indep-utils/cmu-scen-gen/* de los directorios del programa. La sintaxis para utilizar esta herramienta es la siguiente:

```
./ns cbrgen.tcl -type [cbr|tcp] -nn <número de nodos> -seed <semilla> -mc <conexiones> -rate <tasa>
```

Nota: Las etiquetas entre <> se deben reemplazar con valores numéricos con el formato **##.##** que deben introducirse al ejecutarse la herramienta. Las etiquetas entre [] se deben reemplazar con alguno de los valores u opciones definidos previamente en éstas.

5.2 EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO DE MOVILIDAD

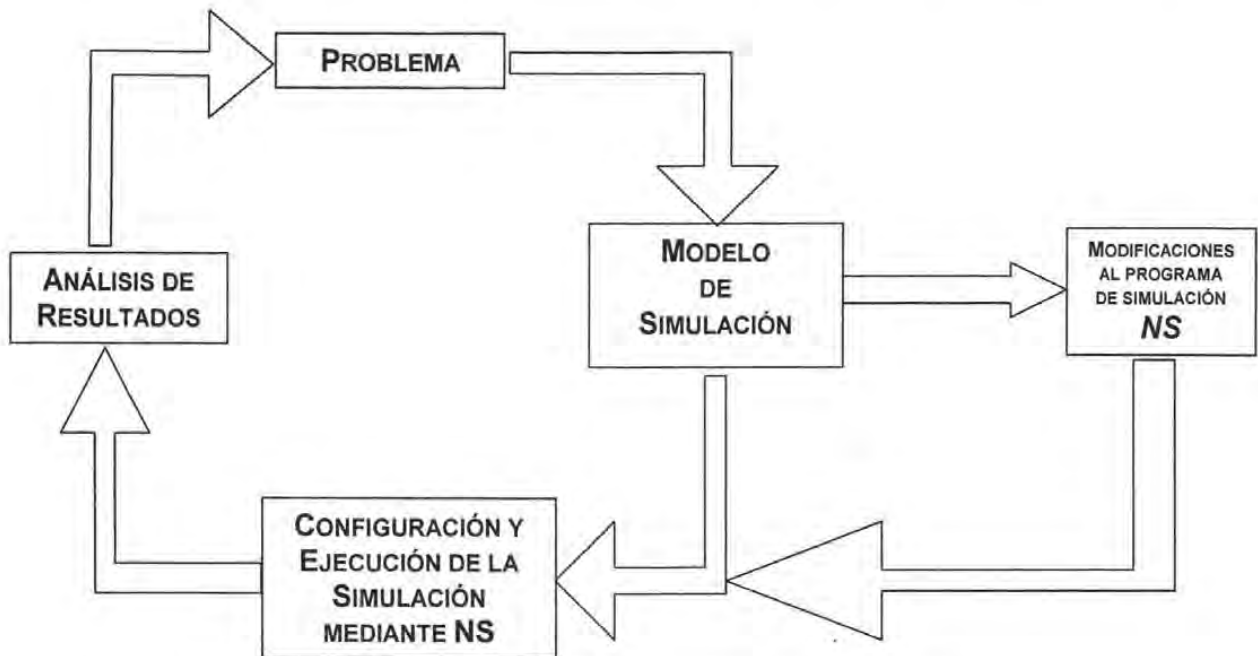


FIGURA V – 2 Diagrama general del experimento de simulación.

PROBLEMA

El problema a resolver es determinar si el límite máximo de la velocidad con la que se pueden mover los nodos sin perderse el estado activo en la operación de la red de comunicación, proporcionado por el modelo teórico utilizado, corresponde a un valor dentro de cierto margen tolerable en torno al *valor real* (simulado).

MODELO DE SIMULACIÓN

El experimento de simulación que se efectuó mediante el programa *NS – 2*, consistió en crear un escenario con una red *ad – hoc*, en la que las estaciones poseen la capacidad de movilidad y puede ser controlable, con el fin de comprobar el límite máximo de la velocidad con la que se pueden mover los nodos sin que se pierda el estado activo en la operación de la red de comunicación.

Para determinar el límite máximo de la velocidad, es necesario obtener los siguientes datos:

1. El tiempo promedio de establecimiento de la ruta. – es decir el lapso que debe transcurrir para que se establezca una ruta de comunicación que enlace el nodo fuente con el nodo destino.
2. El tiempo promedio de permanencia de la ruta. – es decir el lapso que transcurre desde que la ruta entre los nodos fuente y destino se ha establecido y el tiempo en el que se pierde la comunicación debido a que se interrumpe el enlace entre alguno de los nodos intermedios que forman parte de la ruta cuando uno de estos abandona el área de cobertura.

Mientras el tiempo de permanencia de la ruta establecida sea mayor al tiempo que demora el establecimiento de la misma, esto implica que la velocidad con la que se mueven los nodos en la red está dentro de los límites operativos. En cuanto el tiempo de permanencia se reduce por debajo del tiempo de establecimiento de la ruta, se ha superado la velocidad máxima que permite que la ruta establecida siga siendo útil para el enlace de comunicación.

MODIFICACIONES AL PROGRAMA DE SIMULACIÓN NS

Para realizar el experimento de simulación con el programa NS – 2, se modificó el archivo de biblioteca *dsragent.cc* para que durante la simulación se mostraran en pantalla y se pudieran almacenar el tiempo en que ocurren los eventos de *solicitud de nueva transmisión (new request)* *confirmación de transmisión (reply sent)* y *falla de transmisión (send failure)*.

Los datos mencionados son importantes para determinar el tiempo que ocupa la transmisión de un paquete entre el nodo fuente y el nodo destino, así como el tiempo que permanece vigente la ruta utilizada para establecer el enlace entre estos nodos.

CONFIGURACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN MEDIANTE NS

Para efectuar el experimento de simulación fue necesario generar una serie de archivos definidores de escenarios con nodos móviles (tres escenarios para cada caso), utilizando la segunda versión de la herramienta *setdest*, con las siguientes características:

Número de nodos: 200 [nodos]

Tipo de velocidad: 0

Velocidad mínima: 4.99 [m/s] Velocidad máxima: 5.01 [m/s] Velocidad promedio: 5.00 [m/s]

Velocidad mínima: 19.99 [m/s] Velocidad máxima: 20.01 [m/s] Velocidad promedio: 20.00 [m/s]

Tiempo de simulación: 100 [s]

Tipo de pausa: 0

Tiempo de pausa: 0.00 [s]

Máxima coordenada en x: 1500.00 [m] Máxima coordenada en y: 1500.00 [m]

Ejemplos:

```
./setdest -v 2 -n 200 -s 0 -m 4.99 -M 5.01 -t 100.00 -P 0 -p 0 -x 1500.00 -y 1500.00 > scen-1500x1500-200-5-0-a
```

Parámetros del archivo definidor del escenario
Archivo de escenario

```
./setdest -v 2 -n 200 -s 0 -m 19.99 -M 20.01 -t 100.00 -P 0 -p 0 -x 1500.00 -y 1500.00 > scen-1500x1500-200-20-0-a
```

Parámetros del archivo definidor del escenario
Archivo de escenario

Además, se generaron varios archivos definidores de patrones de tráfico, utilizando la herramienta *cbrgen*, con las siguientes características:

Tipo de patrón de tráfico: tasa de transmisión constante (**CBR Constant Bit Rate**)

Número de nodos: 200 [nodos]

Semilla: 1

Número de conexiones: 21 [conexiones]

Tasa (tiempo entre envío de paquetes): 2 [segundos entre cada paquete]

Ejemplo:

```
./ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 200 -seed 1 -mc 20 -rate 2 > cbr-200-20-2
```

Parámetros del archivo definidor del patrón de tráfico
Archivo de tráfico

Posteriormente, se seleccionaron diferentes nodos como estaciones fuente y destino, se modificaron los archivos definidores de patrones de tráfico para que el inicio de las transmisiones de las 20 conexiones restantes se efectuara en diferentes instantes, dentro de los primeros 40 segundos del tiempo de la simulación. A partir de los 60 segundos de iniciada la simulación, se indicó el comienzo de la transmisión entre los nodos origen y destino seleccionados.

El siguiente paso fue crear un archivo de simulación en el lenguaje TCL (Tool Command Language) para una red inalámbrica en el que se indica que se utilizarán los parámetros especificados por los archivos definidores de escenarios y de patrones de tráfico que fueron generados anteriormente. A continuación, se lista el archivo de simulación utilizado:

```

# Nombre del archivo de simulación: sim-1500x1500-200-20t.tcl
# =====
# Se definen las opciones
# =====
set val(chan)          Channel/WirelessChannel      ;# tipo de canal
set val(prop)          Propagation/TwoRayGround     ;# modelo de radio-propagación
set val(netif)         Phy/WirelessPhy              ;# tipo de interfaz de red
set val(mac)           Mac/802_11                  ;# tipo de MAC
set val(ifq)           CMUPriQueue                  ;# tipo de interfaz de fila (IF)
set val(ll)            LL                           ;# tipo de capa de enlace
set val(ant)           Antenna/OmniAntenna          ;# modelo de la antena
set val(ifqlen)        50                           ;# cantidad de paquetes en la IF
set val(nn)            200                           ;# número de nodos móviles
set val(seed)          0.0
set val(rp)            DSR                           ;# protocolo de encaminamiento
set val(x)              1500
set val(y)              1500
set val(sc)            "/home/scen-1500x1500-200-20-0-1"
set val(cp)            "/home/cbr-200-100-10-512"
# =====
# Programa principal
# =====
# Variables Globales y definición de los nombres de algunos archivos de salida

set ns_                [new Simulator]
set tracefd            [open sim-1500x1500-200-20t.tr w]
set namtrace           [open sim-1500x1500-200-20t.nam w]

$ns_ trace-all $tracefd
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

```



```
# Objeto de topografía

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1501.00 1501.00

# Creación del Director General de Operaciones GOD (General Operations Director)

set god_ [create-god $val(nn)]

# Configuración del número de nodos especificado

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

    for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
        set node_($i) [$ns_ node]
        $node_($i) random-motion 0; # Inhabilita el movimiento aleatorio
    }

# Carga del archivo definidor de escenario con nodos móviles

puts "Cargando el archivo definidor del escenario..."
source $val(sc)

# Carga del archivo definidor del modelo del tráfico

puts "Cargando el archivo definidor del modelo del tráfico..."
source $val(cp)

# Definición de la posición inicial y el tamaño de los nodos en la animación

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 50
}

# Indicación de cuando termina la simulación

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at 100.0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at 100.0 "stop"
$ns_ at 100.01 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
    global ns_tracefd
    $ns_flush-trace
    close $tracefd
}
}
```

```
puts $tracefd "M 0.0 nn $val(nn) x $val(x) y $val(y) rp $val(rp) "
puts $tracefd "M 0.0 sc $val(sc) cp $val(cp) seed $val(seed) "
puts $tracefd "M 0.0 prop $val(prop) ant $val(ant) "

puts "Comenzando la simulación..."

$ns_run
```

Cada vez que se ejecutó una simulación se guardaron los resultados, que normalmente se despliegan en pantalla, en un archivo de salida con datos tipo texto (resultados). La instrucción seguida para efectuar las simulaciones es la siguiente:

```
./ns sim-1500x1500-200-5-a.tcl > resultados
```

└──────────────────────────────────┘
└──────────────────┘
Archivo de simulación
Archivo de salida

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los archivos de salida, se filtró la información relacionada con los nodos fuente y destino seleccionados en el archivo definidor del patrón de tráfico para poder obtener el tiempo en que ocurren los eventos de *solicitud de nueva transmisión (new request)*, *confirmación de transmisión (reply sent)* y *falla de transmisión (send failure)*. Como ya se mencionó, estos datos son importantes para poder determinar el tiempo que ocupa la transmisión de un paquete entre las estaciones fuentes y las estaciones destinatarias seleccionadas, así como el tiempo que permanece vigente la ruta utilizada para establecer el enlace entre estos nodos.

Cada simulación generó archivos de animación *NAM*, que permiten observar el comportamiento de la transmisión durante la simulación, así como el patrón de movimiento descrito por los nodos en la red. A continuación, se muestran la instrucción para ejecutar el programa de animación (*NAM*) del simulador *NS - 2* y algunas imágenes que se obtuvieron al capturar la ventana que despliega la interfaz gráfica del simulador durante la animación.

```
./nam sim-1500x1500-200-5-a.nam
```

└──────────────────────────────────┘
 Archivo de animación

La FIGURA V – 3 muestra el escenario al inicio de la simulación indicando los nodos fuente y destino antes de comenzar la transmisión. En la FIGURA V – 4 se presenta el comienzo de la transmisión del evento de *solicitud de nueva transmisión* que se traduce en una inundación de la red de comunicación con la retransmisión del paquete que requiere la información acerca de la ruta óptima que establece el enlace entre las estaciones fuente y destino. Posteriormente, en la FIGURA V – 5 se expone la respuesta por parte del nodo destino que indica el evento de *confirmación de transmisión* que informa la ruta que permite el enlace entre las estaciones fuente y destino. Finalmente, en la FIGURA V – 6 se puede observar el inicio de la transmisión de los paquetes de datos entre los nodos fuente y destino seleccionados, a través de la ruta establecida con anterioridad.

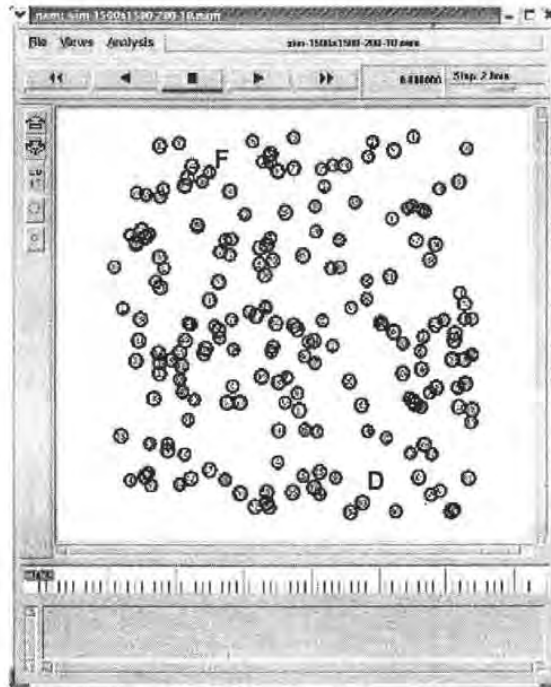


FIGURA V – 3 Escenario al inicio de la simulación.

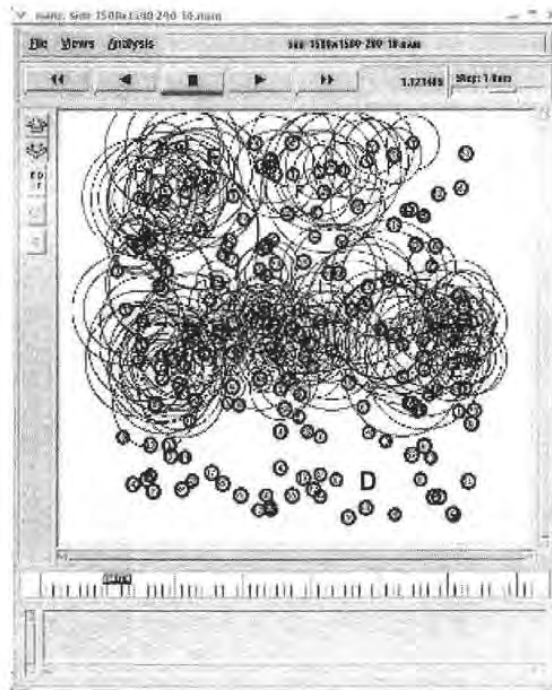


FIGURA V – 4 Inicio de la transmisión, el nodo fuente envía la solicitud de nueva transmisión.

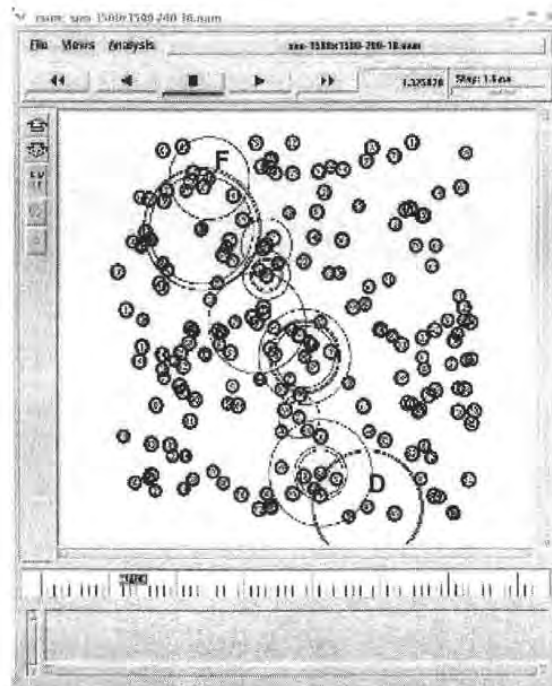


FIGURA V – 5 Respuesta, el nodo destino envía el paquete de confirmación de transmisión.

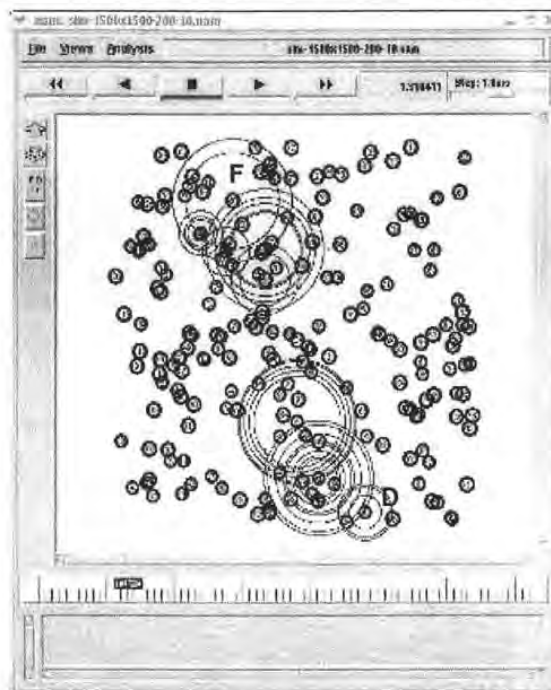


FIGURA V – 6 Inicio de la transmisión de los paquetes de datos entre los nodos fuente y destino.

Una vez obtenidas las simulaciones y los archivos con los datos de interés ya filtrados, se realizó un análisis estadístico de los mismos tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

Se analizaron diferentes pares de nodos (fuente y destino) separados una cierta cantidad de saltos (cantidad de nodos intermedios que son necesarios para establecer el enlace de comunicación entre las estaciones seleccionadas). Se seleccionaron diferentes estaciones que funcionaran como nodos fuente y destino, de acuerdo a su ubicación inicial y la distancia de separación, de tal forma que requerían varios saltos (3 a 11 en promedio) para poder establecer la comunicación entre ellos.

Una vez seleccionados dichos nodos, se observó y registro tanto el tiempo en el que se realizó la primera *solicitud de nueva transmisión* (*new – request time* t_{NR}), el tiempo en que se efectuó la confirmación de transmisión (*reply – sent time* t_{RS}), así como el tiempo en que se presentó la falla en la transmisión (*send – failure time* t_F).

Para el análisis se consideró que el tiempo que lleva en establecerse una conexión entre cada par de nodos fuente y destino (Δt_{F-D}) es aproximadamente igual a:

$$\Delta t_{F-D} \approx 2(t_{RS} - t_{NR}) \quad [s] \quad (V - 1)$$

Por otra parte, el tiempo que permanece en funcionamiento de la ruta (Δt_R), aproximadamente es:

$$\Delta t_R \approx t_F - t_{RS} \quad [s] \quad (V - 2)$$

La FIGURA V – 7 y la FIGURA V – 8 corresponden a las gráficas de la superposición del tiempo que lleva en establecerse una conexión entre cada par de nodos fuente y destino (Δt_{F-D}) y el tiempo que permanece en funcionamiento de la ruta (Δt_R) para una velocidad promedio de los nodos de 5 y 20 [m/s], respectivamente, con respecto al número de saltos (S_{F-D}) que son necesarios para establecer el enlace entre las estaciones fuente y destino seleccionadas.

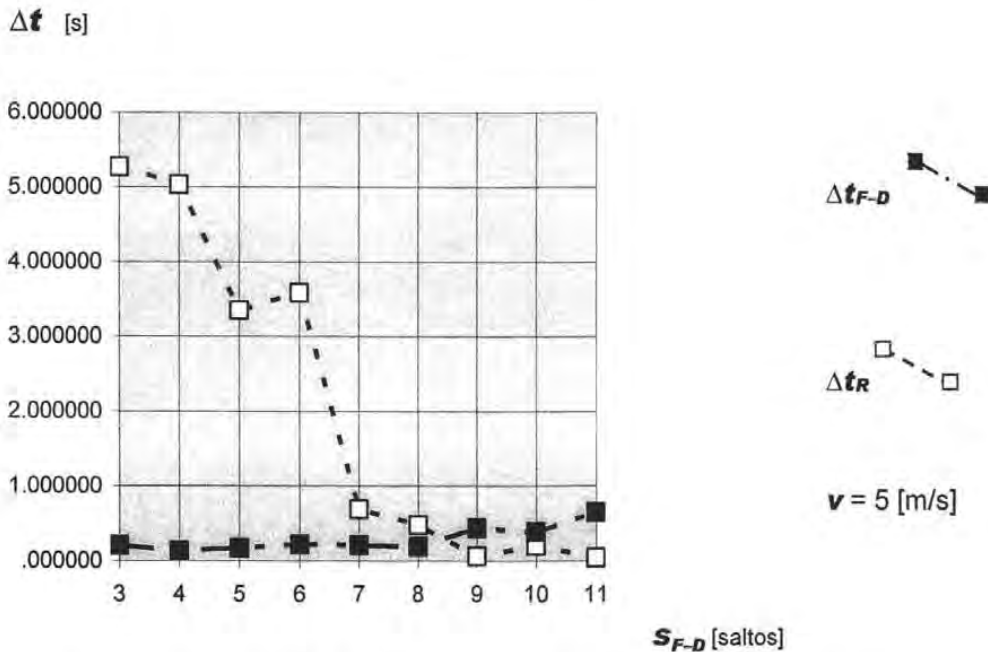


FIGURA V – 7 Gráficas de Δt_{F-D} y Δt_R contra S_{F-D} para $v = 5$ [m/s].

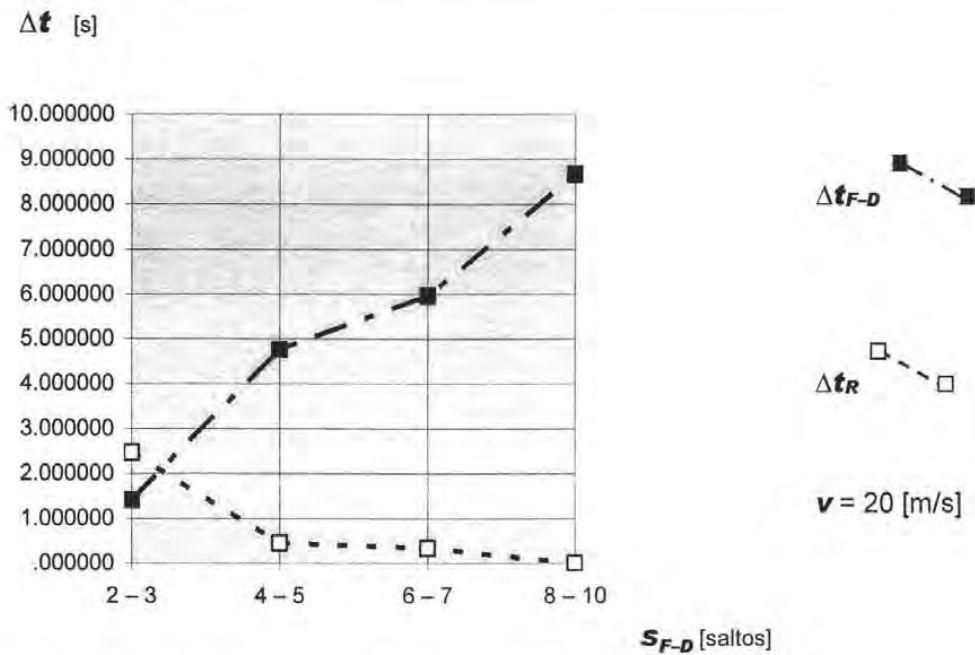


FIGURA V – 8 Gráficas de Δt_{F-D} y Δt_R contra S_{F-D} para $v = 20$ [m/s].

Como se puede observar en ambas gráficas, el tiempo que lleva en establecerse una conexión entre cada par de nodos fuente y destino (Δt_{F-D}) tiende a incrementarse conforme mayor es la cantidad de saltos necesarios (S_{F-D}) para establecer el enlace entre las estaciones fuente y destino.

Por otra parte, el tiempo que permanece en funcionamiento de la ruta (Δt_R) tiende a disminuir conforme mayor es la cantidad de saltos (S_{F-D}) necesarios para establecer el enlace entre las estaciones fuente y destino. Lo anterior se debe a que a mayor cantidad de saltos, intervienen más nodos móviles en el enlace, por lo que existe una mayor probabilidad de que el enlace se pierda debido a que, por la movilidad de todos los nodos, alguno de ellos abandona el área de cobertura entre los nodos contiguos, provocando la interrupción de la comunicación.

El punto de intersección de ambas gráficas indica el valor máximo del intervalo de tiempo por debajo del cual la ruta utilizada sigue siendo útil para la comunicación, antes de que ocurra su interrupción.

Además, el punto de intersección indica la cantidad máxima de saltos que es posible realizar antes de que el tiempo de establecimiento de la comunicación entre las estaciones fuente y destino supere al tiempo de duración de la ruta.

En estas gráficas se puede apreciar que la cantidad de saltos que es posible realizar para comunicar dos nodos (la distancia máxima entre ellos) disminuye considerablemente cuanto mayor sea la velocidad con la que se mueven las estaciones en la red. Además se puede observar lo siguiente:

Para una velocidad $v = 5$ [m/s] la cantidad máxima de saltos es $s_{F-D} = 8 - 9$ [saltos].

Para una velocidad $v = 20$ [m/s] la cantidad máxima de saltos es $s_{F-D} = 2 - 3$ [saltos].

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizarán y compararán los resultados obtenidos a partir del modelo teórico de movilidad utilizado y los resultados experimentales aportados por el programa de simulación de redes utilizado. Esto es con el fin de comprobar la validez del estudio, los alcances y limitaciones del mismo y poder llegar a obtener las conclusiones del trabajo de investigación realizado.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este trabajo de investigación, se utilizó un modelo teórico para encontrar el límite en la velocidad máxima a la que pueden moverse las estaciones de una red de sensores inalámbricos, manteniendo la conectividad de la red. El modelo mencionado, predijo que la cantidad máxima de enlaces intermedios (saltos) que es posible establecer en una ruta de comunicación entre cualquier par de nodos fuente y destino es de 8 y 2 saltos, para las velocidades de 5 y 20 [m/s], respectivamente. Durante los experimentos de simulación se presentaron resultados similares para los valores en la rapidez de movimiento ya descritos.

6.3 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se planteó como objetivo principal, encontrar el límite de la velocidad máxima a la que pueden moverse los nodos en una red de sensores inalámbricos, garantizando la conectividad en la red de comunicación. A continuación se listarán algunas de las conclusiones a las que se ha llegado al realizar este estudio.

- El modelo analítico, proporcionó resultados teóricos aceptables y el comportamiento de movilidad fue el esperado, ya que se observó que cuando las estaciones se mueven a mayor velocidad, el tiempo que permanece en operación un enlace o ruta establecido entre dos nodos (fuente y destino) tiende a disminuir.

- El alcance del enlace se ve afectado por la velocidad con la que se mueven los nodos, puesto que cuanto mayor sea la velocidad, la cantidad de saltos que pueden realizarse para comunicar a los nodos fuente y destino se reduce considerablemente, afectando el área total que puede cubrir la red de sensores inalámbricos.
- La validez de los resultados teóricos no se pudo comprobar en su totalidad con los experimentos hechos con el simulador, puesto que en el modelo teórico utilizado para determinar el retardo de un paquete que viaja a través de la red se hacen ciertas consideraciones, entre las que están:
 - 1) La densidad de tráfico es homogénea, es decir, se observa la misma cantidad de tráfico en cualquier parte de la red, pero en la simulación y en las redes reales se presenta una mayor cantidad de tráfico en la parte central de la red ya que, por lo regular, cada enlace se intenta establecer con la menor longitud posible. La FIGURA VI – 1 muestra la forma característica de como se distribuye el tráfico en una red multipunto.

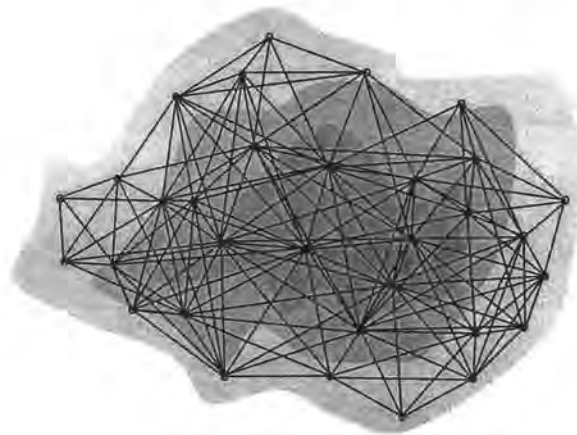
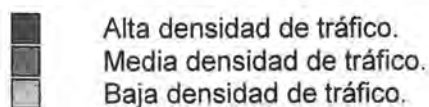


FIGURA VI – 1 *Distribución característica del tráfico en una red multipunto.*



- 2) La red de comunicación está saturada, es decir que la totalidad de nodos que forman parte de la red posee información a transmitir en todo momento y está en un estado de contención por utilizar el canal de comunicación. En el trabajo experimental no se pudo simular dicho escenario, puesto que si se incrementaba considerablemente la cantidad de nodos conteniendo por transmitir, se aumentaba de igual forma la cantidad de paquetes que se perdían en la fila de espera por agotarse el tiempo máximo de almacenamiento. Por lo anterior, para evitar pérdidas de paquetes en el simulador se seleccionó una menor cantidad de nodos con paquetes a transmitir que no corresponde al número total de las estaciones en la red.
- Sin embargo, a partir del estudio realizado en este trabajo de investigación es posible encontrar que el comportamiento general del modelo teórico presenta una tendencia similar al observado en los escenarios de redes inalámbricas simulados mediante el programa de cómputo *NS – 2*.

BIBLIOGRAFÍA

Jacobson, Adree. *"Metrics in Ad Hoc Networks"* Lulea University of Technology, (2000)

Srivastava, Mani. *"The Wireless Channel: Impairments and Models"* University of California at Los Angeles, Electrical Engineering Department, (2002)

Sorooshyari, Siamak. *"Introduction to Mobile Radio Propagation and Characterization of Frequency Bands"*(2002)

Aguiar, Ana & Gross, James. *"Wireless Channel Models"* TU Berlin, (2003)

Josh Broch & David A. Maltz & David B. Johnson & Yih-Chun Hu & Jorjeta Jetcheva
"A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols"
IEEE MOBICOM '98, Dallas, Texas, USA (1998)

Niculescu, Dragos & Nath, Badri *"Ad Hoc Positioning System (APS)"* IEEE GLOBECOM' 2002, Taipei, Taiwan (2002)

Chatzimisios, P. & Vitsas, V. & Boucouvalas, A. C. *"Throughput and Delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol"* IEEE INFOCOM' 2002, New York, NY, USA (2002)

Carvalho, Marcelo M. & Garcia Luna – Aceves, J. J. *"Delay Analysis of IEEE 802.11 in Single – Hop Networks"* IEEE International Conference on Network Protocols – ICNP '03, Atlanta, Georgia, USA (2003)

Chen, Yunli / Zeng, Qing-An & Agrawal, Drama P. *"Performance of MAC Protocol in Ad Hoc Networks"* Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation Conference (CNDS'03), Orlando, Florida, USA (2003)

Gómez Castellanos, Javier and Andrew T. Campbell, *"A Case for Variable – Range Transmission Power Control in Wireless Ad Hoc Networks"*, IEEE INFOCOM' 2004. Hong Kong, China. (2004)

Bagchi, S. & Cabuk, S. & Lin, L. & Malhotra, N. & Shroff, N. *"Analysis of Topological Characteristics of Unreliable Mobile Wireless Ad Hoc Network"* IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing – PRDC'04, Papeete, Tahiti, Polinesia Francesa (2004)

Sampei, Seiichi *"Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications"*, Edit. Prentice – Hall Cap. II pp. 15 – 54 (1997)

APÉNDICE

NETWORK SIMULATOR VERSIÓN 2 (NS – 2)

El programa *Network Simulator NS – 2*, permite analizar el comportamiento de las redes de comunicaciones pues consiste en un simulador de eventos discretos enfocado a los protocolos de las redes que operan en las diferentes capas del modelo de referencia.

- El simulador fue diseñado para soportar diversos trabajos de investigación y educación en los siguientes campos de las redes de comunicaciones:
 - Diseño de protocolos, estudios sobre el tráfico en las redes de comunicaciones
 - Comparación entre los protocolos utilizados en las redes de comunicaciones
- El simulador debe proveer de una plataforma de simulación que opere bajo los esquemas de colaboración, esto es:
 - Distribución libre del programa y con el código fuente abierto
 - Compartir el código, los protocolos, los modelos, etc.
 - Proporcionar un patrón de referencia común
 - Incrementar la confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos
 - Muchos investigadores se encuentran desarrollando nuevos modelos en las diversas capas operativas de las redes de comunicaciones funcionando bajo diferentes condiciones

El programa de simulación *NS* fue desarrollado por el laboratorio Lawrence Berkeley (LBL) en 1995 a través del soporte de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica (*DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency*). El programa *NS* comenzó como una variación del simulador de redes *REAL* de 1989, el programa de simulación *REAL* fue diseñado para poder estudiar el comportamiento dinámico del flujo de información y los esquemas de control de congestión en redes de datos con paquetes conmutados. Posteriormente, en 1996 el programa *NS* se extendió y distribuyó gracias al proyecto *VINT* (*Virtual InterNet Testbed*) en el que participan el laboratorio Lawrence Berkeley (LBL), el centro de investigación de la compañía Xerox en Palo Alto, California (Xerox PARC), la Universidad de California, Berkeley (UCB) y el Instituto de Ciencias de la Información de la Universidad del Sur de California (USC/ISI University of Southern California / Information Sciences Institute), donde se mantiene actualmente. El objetivo principal del proyecto *VINT* era crear un simulador de redes que permitiera el estudio de la interacción y el desarrollo de los protocolos utilizados en las redes de comunicaciones actuales y futuras. En 1997, el grupo de investigación Daedelus

de la Universidad de California, Berkeley (UCB) extendió las capacidades del programa *NS* al incorporar modelos para simular enlaces de comunicación vía satélite. En 1999, a partir del proyecto Monarch de la Universidad Carnegie Mellon (CMU – Carnegie Mellon University) se agregaron los modelos para simular los enlaces de comunicación inalámbricos al programa *NS*, dando origen a la segunda versión del programa o *NS – 2*. Recientemente se ha incorporado la capacidad de emulación (disponible solamente para el sistema operativo FreeBSD).

Actualmente, se estima que existen 10,000 usuarios del programa de simulación *NS – 2*, que forman parte de 600 institutos de investigación en 50 países del mundo. Periódicamente se publican y están disponibles nuevos lanzamientos y cambios del programa de simulación, desde los sitios en Internet del Instituto de Ciencias de la Información de la Universidad del Sur de California (USC/ISI University of Southern California / Information Sciences Institute) y de la Universidad de California, Berkeley (UCB).

Las plataformas sobre las que opera el programa de simulación *NS – 2*, son la mayoría de los sistemas operativos basados en UNIX, tales como: FreeBSD o BSD, Linux, SunOS y Solaris. Ocasionalmente, el programa de simulación *NS – 2*, funciona sobre sistemas operativos de la compañía Microsoft, tales como: Windows 95/98/Me/NT/2000/XP (requiere Microsoft Visual C++ 5.0 o superior). Las principales áreas donde puede aplicarse el programa de simulación *NS – 2* son:

- Redes de comunicaciones por cable
 - Protocolos de Encaminamiento: **DV, LS, PIM-SM**
 - Protocolos de Transporte: **TCP, UDP, SCTP**
 - Fuentes de Tráfico: **Web, FTP, Telnet, CBR**, Estocásticas
 - Disciplinas de filas de espera (enfilamiento): *drop – tail*, **RED, FQ, SFQ, DRR**
 - Modelos de Calidad de Servicio: IntServ y Diffserv
 - Emulación
- Redes de comunicaciones inalámbricas
 - Encaminamiento *Ad – hoc* e IP móvil
 - Difusión Dirigida, sensor-**MAC**
- Trazado, visualización, varias utilerías

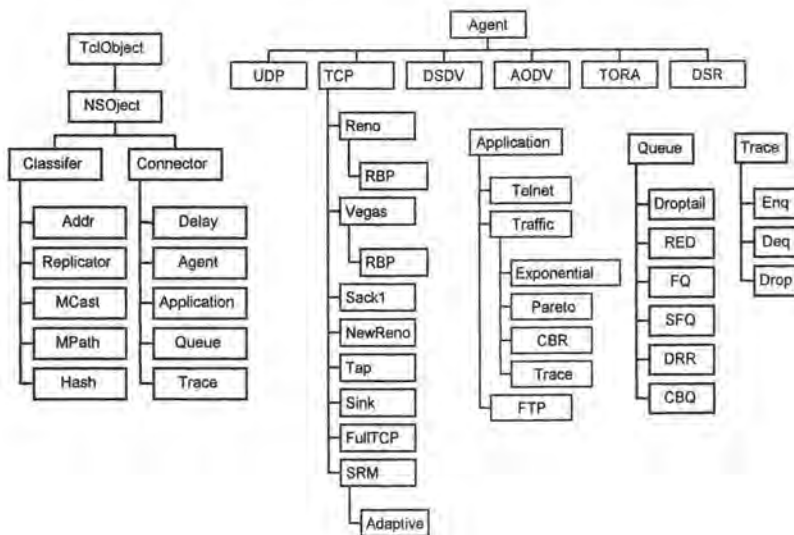
Los principales componentes del programa de simulación *NS – 2* son:

- **NS** (programa de simulación)
- **NAM** (*Network AnIMator*)
 - Visualiza los archivos de salida del NS
 - Interfaz Gráfica del Usuario GUI para introducir escenarios de simulación simples
- Herramientas previas al procesamiento:
 - Programas generadores de tráfico, topologías y escenarios
- Herramientas posteriores al procesamiento:
 - Análisis del trazado y registro de actividades durante la simulación (mediante **Awk**, **Perl**, **Tcl** e incluso **MATLAB**)

Los principales modelos que utiliza el programa de simulación NS – 2 son:

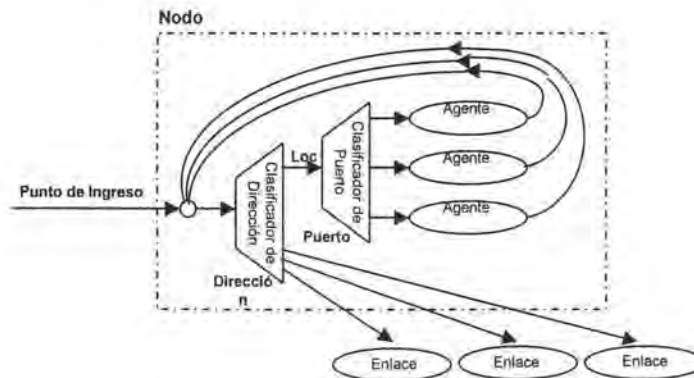
- Modelos de tráfico y aplicaciones en la red de comunicaciones
 - **Web, FTP, Telnet, CBR** (Constant Bit Rate), Real audio
- Protocolos de transporte en la red de comunicaciones
 - Unicast: **TCP** (**Reno, Vegas, etc.**), **UDP, SCTP**
 - Multicast: **SRM**
- Encaminamiento y enfilamiento
 - Encaminamiento por cable, encaminamiento *ad-hoc* y difusión dirigida
 - Protocolos de enfilamiento: **RED, drop-tail, FQ, SFQ, CBQ, DRR, etc.**
- Medios Físicos
 - Medios de comunicación a través cable (punto a punto, redes de área local)
 - Medios de comunicación inalámbricos (múltiples modelos de propagación)
 - Medios de comunicación vía satélite

MODELO JERÁRQUICO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN NS – 2



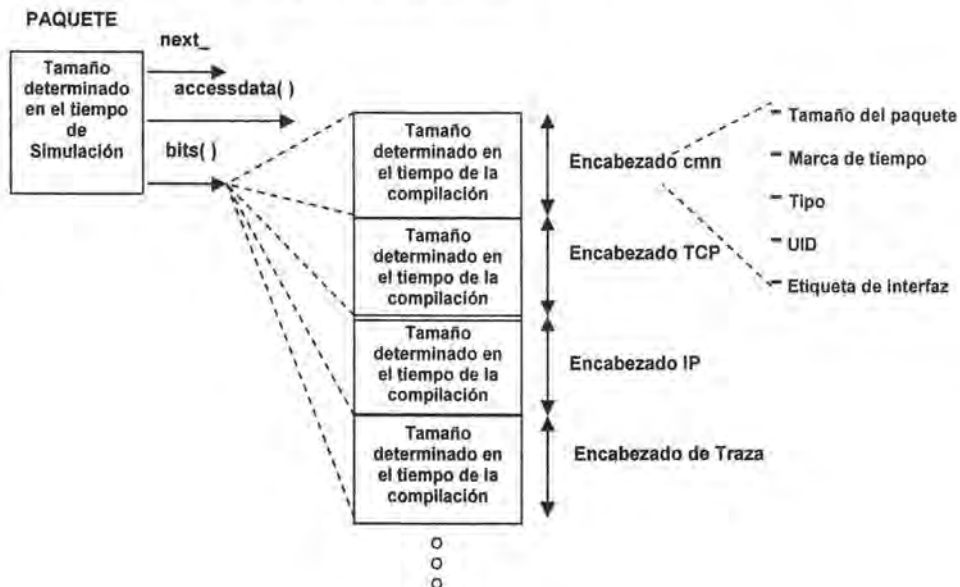
NODOS

El programa *NS - 2* simula los nodos de una red de comunicaciones por medio de una colección de clasificadores y de conectores (agentes). Los agentes son protocolos que actúan entre puntos extremos y objetos relacionados que generan o completan los campos de los paquetes y los clasificadores son separadores de paquetes (*demultiplexores*).



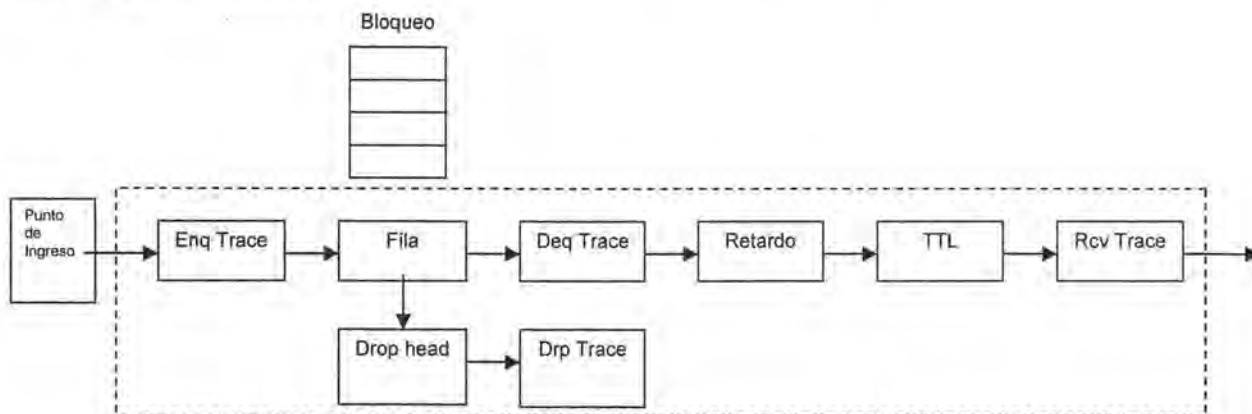
PAQUETES (EVENTOS)

En general, el programa *NS - 2* simula los paquetes a transmitir por la red de comunicaciones, utilizando el siguiente esquema:



ENLACES

En general, el programa *NS – 2* simula los enlaces en la red de comunicaciones, utilizando el siguiente esquema:



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN *NS – 2*

El modelo de simulación del programa *NS* se basa en *eventos*:

- El simulador posee una lista de eventos
- Un proceso selecciona el siguiente evento en la lista, lo ejecuta hasta que finaliza
- Cada evento ocurre en un instante de *tiempo virtual (simulado)*, pero ocupa una cantidad arbitraria de *tiempo real*

El programa de simulación *NS* utiliza un modelo simple que posee una sola línea de control, reduciendo la probabilidad de que sucedan las condiciones que provocan que un proceso se quede en un ciclo u ocurran contenciones entre eventos. Los lenguajes de programación que utiliza el programa de simulación *NS – 2* son los lenguajes orientados a objetos C++ y OTcl (Object-Oriented Tool Command Language), de esta manera se tiene un enfoque modular en el que cada uno de los lenguajes se utiliza para realizar funciones específicas, tales como:

C++

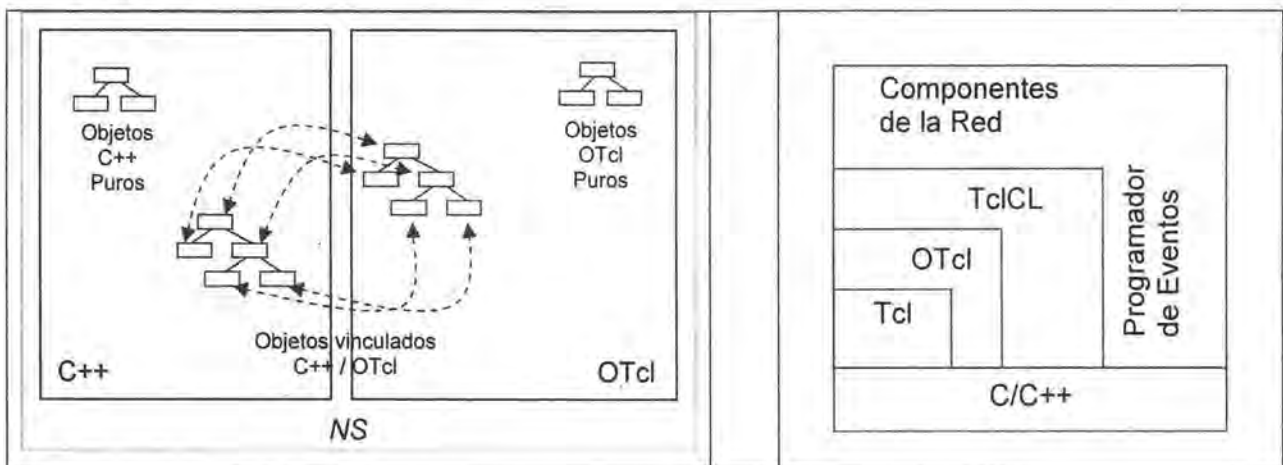
- Define nuevos objetos, agentes, protocolos y el marco operativo.
- Se utiliza para el procesamiento de los paquetes, es el núcleo del simulador *NS*

- Manipulaciones a los niveles de byte/bit.
- Presenta un tiempo de ejecución menor y se puede controlar en forma detallada y completa

OTcl

- Define Topologías, escenarios, simulaciones, ...
- Lenguaje mediante guiones (*Script language*) facilitando las modificaciones a la topología
- Se utiliza en funciones de control:
 - Configuración del simulador y de los escenarios de simulación
 - Programación de eventos (acciones periódicas o disparadas)
 - Manipulación de los objetos creados en C++
 - Rapidez de escritura y modificación

Se observa que existen algunos objetos completamente separados entre ambos lenguajes (objetos puros) pero otros se encuentran vinculados entre sí, esto es que cada objeto creado en el lenguaje Otcl tiene un objeto asociado o correspondiente en el lenguaje C++. La biblioteca (conjunto de funciones) TcICL se utiliza para vincular o proveer conectividad entre ambos lenguajes facilitando el proceso de compartir las funciones y variables que son utilizadas por ambos. A continuación, se muestra la arquitectura operativa del programa de simulación NS – 2.



El programa de simulación NS – 2 utiliza como entrada un guión en lenguaje TCL (Tool Command Language), el cual define lo siguiente:

- La configuración física de la red de comunicación
 - Los nodos en la red
 - Las conexiones entre los nodos

- Los protocolos a utilizar en las conexiones
- Los aplicaciones a utilizar en las conexiones

El programa de simulación *NS – 2* genera un archivo de salida (.nam) que es una descripción completa de la simulación de la red de comunicación. Cada línea de este archivo describe el estado de cierto paquete que ha sido enviado, recibido, enfilado o descartado durante el tiempo de la simulación. El proceso de examinar el archivo puede ser muy útil aunque en ocasiones resulta complicado.