

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE  
ESTUDIOS SUPERIORES  
DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**PROGRAMA DE GRADUADOS DE MECATRÓNICA Y TECNOLOGÍAS  
DE INFORMACIÓN**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY**

**TESIS**

**ANÁLISIS DE REGIONES DE AHORRO DE POTENCIA DE  
TRANSMISIÓN EN UNA RED INALÁMBRICA MULTISALTO**

**PRESENTADO COMO REQUERIMIENTO PARCIAL PARA ADQUIRIR  
EL GRADO ACADÉMICO DE LA MAestrÍA EN CIENCIAS EN**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON ESPECIALIDAD EN  
TELECOMUNICACIONES**

**POR**

**Ing. José Roberto Díaz Betancourt**

**Monterrey, N.L., NOVIEMBRE 2009**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE  
ESTUDIOS SUPERIORES  
DE MONTERREY**

**CAMPUS MONTERREY**

**PROGRAMA DE GRADUADOS DE MECATRÓNICA Y TECNOLOGÍAS  
DE INFORMACIÓN**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY®**

**TESIS**

**ANÁLISIS DE REGIONES DE AHORRO DE POTENCIA DE  
TRANSMISIÓN EN UNA RED INALÁMBRICA MULTISALTO**

**PRESENTADO COMO REQUERIMIENTO PARCIAL PARA ADQUIRIR  
EL GRADO ACADÉMICO DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON ESPECIALIDAD EN  
TELECOMUNICACIONES**

**POR**

**Ing. José Roberto Díaz Betancourt**

**Monterrey, N.L., NOVIEMBRE 2009**

# **ANÁLISIS DE REGIONES DE AHORRO DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN EN UNA RED INALÁMBRICA MULTISALTO**

por

**Ing. José Roberto Díaz Betancourt**

**Tesis**

Presentada al Programa de Graduados de la  
ESCUELA DE GRADUADOS DE MECATRÓNICA Y TECNOLOGÍAS DE  
INFORMACIÓN

como requisito parcial para obtener el grado académico de

**Maestro en Ciencias**

especialidad en

**Telecomunicaciones**

**Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey**

**Campus Monterrey**

Noviembre de 2009

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de  
Monterrey

Campus Monterrey


ESCUELA DE GRADUADOS DE MECATRÓNICA Y  
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN


Programa de Graduados


Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis de José Roberto Díaz Betancourt sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de **Maestro en Ciencias**, especialidad en:

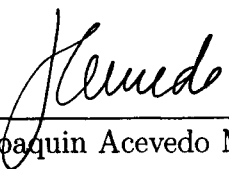
**Telecomunicaciones**

**Comité de tesis:**

  
Dr. David Muñoz Rodríguez  
Asesor de la tesis

  
Dr. José Ramón Rodríguez Cruz  
Sinodal

  
Dr. Gabriel Campuzano Treviño  
Sinodal

  
Dr. Joaquín Acevedo Mascarúa  
Director del Programa de Graduados

Noviembre de 2009

## Reconocimientos

A dios, por haberme dado vida y la fuerza necesaria para emprender esta etapa y terminarla satisfactoriamente.

A mis padres y hermanos, a los que les debo el ser la persona que soy hoy en día, por su amor y apoyo incondicional en este y cada momento de mi vida.

A mi novia Adriana Danalí por acompañarme y alentarme siempre a seguir adelante, por todo su amor y cariño, y por estar siempre conmigo.

Al resto de mi familia por siempre estar al pendiente de mi y darme animos para seguir adelante y perseverar en esta etapa de mi vida.

A mis compañeros de maestria (Lenin, Paulino, Ivan, Raúl, Juan Manuel y todos los demas) que fueron como mi familia durante este tiempo, les agradezco su compañía, su amistad, apoyo y todos los momentos que compartimos estos dos años.

Al Tecnológico de Monterrey y a CONACYT por haberme brindado las facilidades para que la realización de mis estudios de postgrado en esta institución se hiciera realidad.

A mi asesor, el Dr. David Muñoz Rodriguez por su guía y apoyo en la realización de este proyecto, así como al Dr. Cesar Vargas y todos los profesores del departamento de Electrónica y Telecomunicaciones.

JOSÉ ROBERTO DÍAZ BETANCOURT

*Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*  
*Noviembre 2009*

## Resumen

En la actualidad los grandes avances tecnológicos han propiciado la creación de dispositivos móviles de comunicación que se han puesto al alcance de un gran número de personas. Este auge en las comunicaciones inalámbricas ha motivado la investigación y la creación de numerosos y novedosos esquemas como las redes de sensores y las redes ad-hoc que plantean escenarios de redes inalámbricas multisalto.

Uno de los aspectos más importantes en este tipo de redes es el consumo de energía. Debido a que los dispositivos inalámbricos funcionan con baterías la cantidad de energía de la que disponen para su funcionamiento es limitada. Investigaciones anteriores muestran que un porcentaje considerable de la energía del dispositivo se consume durante la transmisión de la señal.

En este trabajo se plantea el escenario de una red inalámbrica multisalto formada por dispositivos inalámbricos. Por medio de simulaciones computacionales se realiza un análisis que permite comparar la transmisión de un nodo A a un nodo B de manera directa o a través de uno o mas dispositivos intermedios, esto con el objetivo de determinar las regiones que contienen las posibles posiciones que pudieran tomar estos nodos intermedios y el ahorro en potencia de transmisión que se puede obtener.

## Abstract

Nowadays the great technological advances had favored the creation of mobile communication devices which had been put at reach of a large amount of people. This peak at wireless communications has motivated the research and creation of numerous and new schemes such as sensor and ad-hoc networks which propose multihop wireless scenarios.

One of the most important aspects of these kinds of networks is the power consumption. Due wireless devices work with batteries, the amount of energy they have available to operate is limited. Previous researches show that a considerable percentage of the device's energy is consumed during the signal transmission.

In this paper it is established the scenario of a wireless multihop network formed by wireless devices. By means of computer simulations an analysis is performed, this analysis allows to compare the transmission of a node A to a node B in a direct way or through one or more intermediate devices, this with the purpose of determine the regions which contain the possible positions that these intermediate nodes may take and the power transmission savings that it may be obtained.

# Índice general

<b>Reconocimientos</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>x</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xI</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del Problema . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	2
<b>Capítulo 2. Redes Inalámbricas Multisalto</b>	<b>4</b>
2.1. Redes Ad Hoc . . . . .	4
2.2. Redes de Sensores . . . . .	6
2.3. Control de Potencia en Redes Inalámbricas Multisalto . . . . .	8
<b>Capítulo 3. Análisis de Resultados</b>	<b>10</b>
3.1. Modelo de Propagación . . . . .	10
3.2. Consideraciones de Diseño en la Simulación . . . . .	11
3.3. Descripción del Escenario . . . . .	12
3.3.1. Límite del Area de Ahorro de Potencia . . . . .	15
3.3.2. Regiones de Ahorro de Potencia . . . . .	20
3.4. Resultados . . . . .	22
3.4.1. Dos saltos . . . . .	22
3.4.2. Tres saltos . . . . .	26
3.4.3. Cuatro saltos . . . . .	29
3.4.4. Cinco saltos . . . . .	32
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>Capítulo 5. Trabajos Futuros</b>	<b>36</b>



**Bibliografia**

**37**

**Vita**

**39**

# Índice de tablas

3.1. Exponentes de Pérdida en Distintos Ambientes . . . . .	13
---	----

# Índice de figuras

2.1. Topología aleatoria de una red inalámbrica multsalto, y algunas de las posibles rutas . . . . .	6
2.2. Red inalámbrica de sensores . . . . .	7
3.1. Red Inalámbrica Multisalto . . . . .	13
3.2. Enlace directo y enlace multsalto entre A y B . . . . .	14
3.3. Posición aleatoria de los nodos intermedios . . . . .	16
3.4. Límite de la región de ahorro de una ruta multsalto . . . . .	16
3.5. Transmisión en dos saltos . . . . .	17
3.6. Potencia de transmisión en dos saltos . . . . .	18
3.7. Calculo de las distancias de los dos saltos . . . . .	19
3.8. Calculo de las distancias de los saltos . . . . .	19
3.9. Calculo de las distancias de los saltos . . . . .	20
3.10. Regiones de ahorro en dos saltos . . . . .	23
3.11. Regiones de ahorro en dos saltos . . . . .	24
3.12. Regiones de ahorro en dos saltos . . . . .	25
3.13. Regiones de ahorro en tres saltos . . . . .	26
3.14. Regiones de ahorro en tres saltos . . . . .	27
3.15. Regiones de ahorro en tres saltos . . . . .	28
3.16. Regiones de ahorro en cuatro saltos . . . . .	29
3.17. Regiones de ahorro en cuatro saltos . . . . .	30
3.18. Regiones de ahorro en cuatro saltos . . . . .	31
3.19. Regiones de ahorro en cinco saltos . . . . .	32
3.20. Regiones de ahorro en cinco saltos . . . . .	33
3.21. Regiones de ahorro en cinco saltos . . . . .	34

## Capítulo 1

### Introducción

El desarrollo de dispositivos móviles cada vez más pequeños y accesibles, como computadoras portátiles y teléfonos celulares, ha propiciado que la cantidad de personas que cuentan con uno de estos haya crecido mucho en los últimos años. Sin embargo, estos dispositivos tienen una limitación importante que es la capacidad de su batería. Un tema de diseño crucial en la creciente área las redes inalámbricas como las redes ad hoc y de sensores, es desarrollar mecanismos de ahorro de energía para proporcionar una comunicación de calidad entre los dispositivos y al mismo tiempo, reducir el consumo de energía y de esta manera incrementar el periodo operacional de los dispositivos y de la red. El control de la potencia de transmisión que se implementa en las comunicaciones, impacta de distintas maneras el tiempo de vida de los dispositivos inalámbricos. Para dispositivos como computadoras portátiles, la reducción de la potencia de transmisión puede no significar un gran cambio en el tiempo de vida o de operación que le proporciona su batería, ya que en aparatos como estos, la potencia de transmisión representa solo un pequeño porcentaje del total de energía consumida. Por otro lado y de manera contraria, en pequeños dispositivos de comunicación con transmisores integrados o acoplados a ellos (sensores, teléfonos celulares, PDA's, etc.) la reducción de la potencia de transmisión puede extender significativamente el tiempo de vida del dispositivo, siendo especialmente útil en aplicaciones como las redes de sensores.

Transmitir a un dispositivo que se encuentra a una gran distancia con una potencia de transmisión alta, puede consumir una desproporcionada cantidad de energía si se compara con transmitir a un nodo que se encuentre mucho mas cerca [1], lo cual es el principio básico de las redes multisalto. Importantes y novedosos tipos de redes inalámbricas como las redes ad hoc son por naturaleza redes multisalto, utilizando esta técnica para lograr una reducción en el consumo de potencia de transmisión.

En el presente trabajo se muestra el análisis realizado sobre una red con estas características. Por medio de simulaciones computacionales se plantea un escenario específico, y en base a los valores de ciertos parámetros se determina la posición en la que deberían ubicarse los nodos de la red para obtener un determinado porcentaje de ahorro. De esta manera se logra definir regiones que delimitan la posición de los nodos y que representan distintos porcentajes de ahorro de potencia.

## 1.1. Definición del Problema

El alto porcentaje de energía que consume la interfaz inalámbrica de los dispositivos móviles, aunado a un creciente consumo de energía debido a las aplicaciones en algunos de ellos y la cantidad limitada de potencia en las baterías, deja en evidencia la necesidad de reducir los niveles de potencia de transmisión en redes inalámbricas, para extender el tiempo de vida de los aparatos.

## 1.2. Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Comparar mediante gráficas, la transmisión directa de una señal entre un punto A y un punto B, y la transmisión entre esos mismos puntos a través de uno o mas nodos intermedios.
- Determinar, en base a las posibles posiciones de los nodos de una red, la forma y tamaño de la región en la que existe ahorro de potencia de transmisión.
- Determinar los distintos niveles de ahorro de potencia que se pueden obtener con una transmisión multisalto, y la forma y tamaño de cada una de estas regiones.

## 1.3. Justificación

Distintos tipos de dispositivos inalámbricos como celulares, computadoras portátiles, PDA's, etc, pueden formar parte de una red inalámbrica multisalto, sin embargo siempre estarán sujetos a una cantidad limitada de energía para su funcionamiento. Estos aparatos incorporan cada vez mas funciones como reproducción de música y video, conexión inalámbrica a la red, etc. lo que ha acarreado a su vez, que el consumo de energía se incremente rápidamente. Como se menciona en [2] la tecnología del desarrollo de fuentes de energía como las baterías, no ha avanzado al ritmo que la revolución multimedia y las tecnologías inalámbricas han impuesto. Por esta razón, se investigan múltiples posibilidades que permitan ahorrar energía. El control de potencia de transmisión es una de las áreas en las que se pueden lograr grandes avances, si se toma en cuenta que, por ejemplo, en un teléfono celular que incorpore funciones como el GPRS, el 40 % de su energía se utiliza en la transmisión. En plataformas móviles avanzadas como PDAs y los denominados smart-phones, el sistema de comunicación inalámbrica representa la mayor parte del consumo total de energía en lo que a comunicación se refiere [17][18]. Además, estos aparatos están cada vez más equipados con multiples interfaces de radio comunicación para manejar varios tipos de conexiones, que

van desde Bluetooth para enlaces de área personal, WiFi para conectividad de área local, y GPRS para acceso de área amplia. En dispositivos pequeños como celulares avanzados y PDAs, con cantidades limitadas de energía, el consumo de energía debido a la interface o interfaces inalámbricas representa una significativa proporción del total de energía disponible en todo el sistema. Como se menciona en [19] aproximadamente el 70% del total de energía en estos dispositivos se consume en la transmisión, lo que en unidades de potencia es aproximadamente 786 mW de un total de 1251 mW.

Por tales motivos, se buscan constantemente nuevas formas de reducir el consumo de energía en este tipo de dispositivos. Esquemas como la transmisión multisalto son altamente eficientes y ofrecen una de las soluciones más novedosas a este problema. Aunado a lo que ya se mencionó, se pueden citar aplicaciones como las redes de sensores en donde la conservación de la energía es tal vez el tema de mayor importancia y donde controlar la potencia de transmisión es una de las maneras más efectivas de extender el tiempo de operación de los sensores.

## Capítulo 2

# Redes Inalámbricas Multisalto

La evolución de las redes de comunicación, especialmente en años recientes ha traído grandes cambios. A diferencia de las redes con las que tenemos contacto en nuestra vida diaria como la de telefonía fija o de conexión a internet en la que se hace uso de cables y de una infraestructura fija para proporcionar el servicio, los nuevos paradigmas plantean un cambio hacia tecnologías inalámbricas y esquemas descentralizados incorporando comunicación multisalto entre los nodos de la red, como se expone en [3]. En este tipo de redes un grupo de dispositivos móviles forman una red creando enlaces inalámbricos temporales para transmitir información. Un transmisor se comunica con un receptor a través de uno o mas nodos intermedios que retransmiten la información hasta llegar a su destino final. Estas redes tienen la característica de ser altamente dinámicas, ya que en todo momento pueden llegar y salir nodos de ella adaptando el envío de información a los cambios que se van realizando en su topología. Una de las clases y de las subclases más importantes de este tipo de redes son las redes móviles Ad Hoc (MANET por sus siglas en inglés, Mobile Ad hoc Network) de las cuales se hablara con mayor detalle a continuación.

## 2.1. Redes Ad Hoc

Los avances en materia de transmisión inalámbrica y la popularidad con la que cuentan hoy en día los dispositivos móviles nos ha permitido acercarnos mucho al sueño de estar comunicados siempre y en todo lugar. El paradigma de las redes inalámbricas Ad Hoc es una muestra de ello. Una red Ad Hoc consiste en un conjunto de dispositivos o nodos móviles que operan sin la necesidad de una infraestructura fija o de un control centralizado [4]. La comunicación se realiza a través de enlaces inalámbricos entre los nodos móviles, utilizando sus antenas. Debido a restricciones como la cantidad de energía limitada y la utilización del canal, un nodo puede ser incapaz de comunicarse directamente con otro en forma de un salto único. En estos casos, estamos ante un escenario multisalto en el cual los paquetes enviados por el nodo fuente, deben ser retransmitidos por varios nodos intermedios antes de alcanzar el destino final.

A pesar de que la comunicación táctica militar se sigue considerando como la principal aplicación de las redes Ad Hoc, con el paso del tiempo continúa creciendo el interés comercial por este tipo de redes. Aplicaciones comerciales, educativas y redes de sensores [4] [5] son solo algunos de los posibles ejemplos comerciales. Existen muchos retos técnicos relacionados con las redes Ad Hoc. La topología es altamente dinámica, se dan cambios muy frecuentes y es difícil de predecir. Con el uso de enlaces inalámbricos la red se ve afectada por altas tasas de pérdidas y puede experimentar mayores retardos. Además, y debido a la naturaleza inalámbrica, la seguridad física es limitada. Como uno de los criterios de diseño más importantes se debe mencionar el ahorro de energía en los nodos, como dispositivos móviles, que dependen de la capacidad de su batería para operar.

Algunas de las características más importantes de las MANETs son:

**Topología dinámica** Tanto la cantidad de dispositivos como la ubicación de éstos dentro de la red son factores que varían constantemente en una MANET. Las estrategias de comunicación como los protocolos de ruteo deben ser en igual medida adaptables para adecuarse a esta situación.

**Limitación energética** Sin importar el tipo de dispositivo que se encuentre en la red, utiliza una interfaz inalámbrica para establecer comunicación. Dado que la transmisión consume un gran porcentaje de la energía del móvil, la capacidad de la batería del mismo impone una importante limitación.

**Comunicación multisalto** Usualmente los mensajes enviados por una fuente de información siguen una ruta a través uno o más nodos intermedios antes de llegar a su destino final.

A diferencia de las redes fijas convencionales en las que la topología rara vez cambia, las redes Ad Hoc suponen un esquema altamente dinámico y flexible en la que los nodos pueden estar situados de manera aleatoria en cualquier punto del área que ocupa la red. Nuevos usuarios pueden entrar o salir de la red en cualquier momento agregando complejidad al ya altamente cambiante esquema de la red. Cada dispositivo puede representar el teléfono celular de alguna persona, su computadora personal, etc. de manera que en cualquier momento pueden tomar el papel de transmisor o fuente de información. El destinatario de dicha transmisión puede estar situado físicamente lejos de la fuente, por lo que la opción energéticamente más eficiente de alcanzarlo es a través de otros nodos, los cuales se convierten en retransmisores del mensaje de la fuente. Esto puede ocurrir de manera simultánea para varias fuentes de información, como se muestra en la figura 2.1.



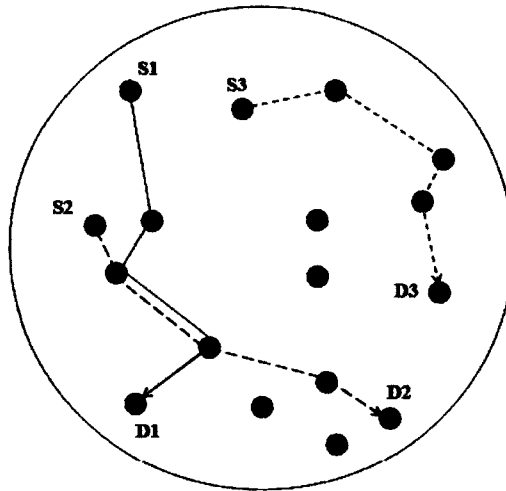


Figura 2.1: Topología aleatoria de una red inalámbrica multisalto, y algunas de las posibles rutas

## 2.2. Redes de Sensores

Una de las clase más importantes de redes ad hoc son las redes inalámbricas de sensores (WSN por sus siglas en inglés, Wireless Sensor Netwoks). Se puede de finir a este tipo de redes como un grupo de sensores ubicados de manera dispersa en una región geográfica, con el objetivo de tomar mediciones de distintos parámetros del entorno en el que se encuentran tales como temperatura, humedad, movimiento, intensidad de luz, presión admosférica, sonida, iluminación, entre otros . Figura 2.2.

Algunas de las características más importantes de las WSN son [12]:

**Procesamiento limitado** Debido a que comunmente se requiere que los sensores tengan un tamaño reducido, el hardware con el que cuentan les da una capacidad muy limitada de procesamiento. Además de que la energía también es limitada y mayor procesamiento implica mayor consumo de energía.

**Limitación energética** La energía es el recurso más importante en este tipo de aplicaciones. Los nodos funcionan generalmente con baterías y deben funcionar en su ubicación por largos periodos de tiempo sin remplazo de batería.

**Capacidad de sensado** Cada dispositivo puede tener uno o varios tipos de sensores.

**Sistemas de localización** Debido a que no siempre es posible colocar los sensores en una ubicación conocida, es necesario contar con algun método de localización para conocer la ubicación de los mismos.

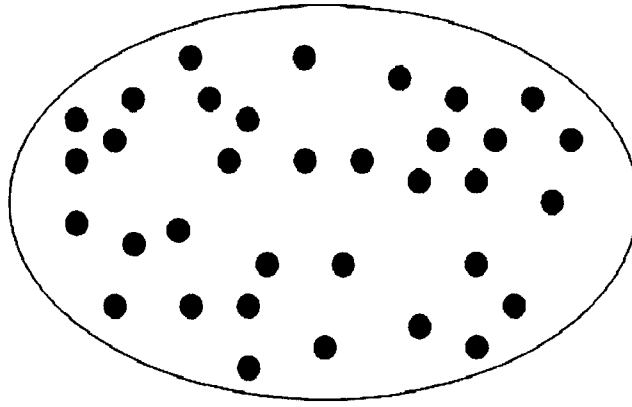


Figura 2.2: Red inalámbrica de sensores

**Comunicación multisalto** De la misma forma que sucede en las redes Ad Hoc los mensajes enviados por un sensor fuente siguen una ruta a través uno o más nodos intermedios antes de llegar a su destino final.

Por ser una subclase de las MANETs, las WSN y estas tienen muchas características similares. Sin embargo, también tienen aspectos que las diferencian unas de otras [13]. En [14] se menciona que una red de sensores múltiples fuentes de información emiten señales a un mismo receptor. Otra de las diferencias principales es que en una red Ad Hoc los nodos generalmente son dispositivos inalámbricos de comunicación personal que están en constante movimiento, mientras que los sensores de una WSN están por lo regular fijos en una posición.

Existe una enorme cantidad de aplicaciones para las redes de sensores en una gran variedad de áreas. En gran medida, la aplicación determinará la mayoría de los factores de la red de sensores como la topología de la red, la cantidad de sensores desplegados, los tipos de sensores que se utilizarán, la potencia de transmisión, entre otros. Algunas de las aplicaciones más importantes de las WSN son por ejemplo, el control de los sistemas una casa habitación como la temperatura, iluminación, seguridad, etc. La recolección de datos en ambientes en los que la intervención humana resulta poco práctica o peligrosa es otra de las áreas en las que se puede utilizar sensores. En edificios se puede lograr cierto nivel de automatización haciendo uso de una red de sensores para controlar la seguridad, reducir costos, localizar dispositivos o personas y controlar equipos de manera remota [15] [16]. Sin embargo, al igual que en el caso de las redes Ad Hoc, las aplicaciones militares siguen siendo la principal utilización de esta clase de redes.

Debido a que los sensores de una WSN generalmente están colocados en posiciones fijas, la topología de la red define en gran parte factores como cobertura y conectividad. A continuación se enlistan algunos de los tipos de topologías:

- Estrella
- Malla
- Arbol
- Bus

## 2.3. Control de Potencia en Redes Inalámbricas Multisalto

La conservación de energía es de gran importancia para cualquier tipo de dispositivo móvil, ya que sin importar si pertenece a una red Ad Hoc o está conectado a una red de infraestructura fija, está limitado por la cantidad de energía almacenada en su batería. Los dispositivos realizan un conjunto de operaciones y tienen un comportamiento predeterminado que define su consumo de energía. Acciones como la transmisión y recepción de datos, procesamiento, periodos de descanso, periodos de actividad, etc. requieren de un cierto porcentaje de energía para realizarse. Además, cuando se busca minimizar el nivel de potencia de transmisión el medio ambiente por el que se propaga la señal inalámbrica interviene. Factores espaciales como los objetos circundantes, el terreno, la distancia de separación entre transmisor y receptor, y hasta las condiciones del clima puede influir en el enlace. Por tal razón, se debe tratar de encontrar un equilibrio óptimo que permita ahorrar la mayor cantidad de potencia manteniendo la calidad de la comunicación en el nivel deseado para cada aplicación.

Bajo condiciones de energía limitada, la eficiencia y la confiabilidad pueden contraponerse entre sí. Se puede mejorar la confiabilidad transmitiendo paquetes al máximo nivel de potencia de transmisión [6] [7], pero esta situación produce un gasto de energía alto e innecesario. Para contar con sistemas que tengan la habilidad de controlar dinámicamente la potencia de transmisión, existen distintas herramientas y estrategias. Una de estas herramientas es controlar la potencia por medio de hardware comunmente usado como el CC1000 [8] y el CC2420 [9], con los que se puede especificar el nivel de potencia de transmisión durante el tiempo de funcionamiento. Otras técnicas de control de potencia de transmisión son la implementaciones de mecanismos de control en protocolos y arquitecturas de red. A continuación se enumeran algunos de estos esquemas de control de potencia:

**ATPC** . Adaptive Transmission Power Control.

**PARO** . Power-aware Routing Optimization.

**IEEE 802.11** . Mecanismo de control de potencia del estándar para redes inalámbricas de área local.

De manera concreta, el principio básico de todas estas técnicas de control de potencia consiste en que los dispositivos móviles pertenecientes a una red multisalto, sean capaces de ajustar de manera dinámica la potencia de transmisión requerida para comunicarse con algún otro nodo. Esto implica obviamente que los nodos deberán conocer algunos parámetros básicos para poder realizar el mencionado ajuste, como la distancias entre un nodo y sus vecinos, determinar el índice de pérdida dependiendo de las condiciones del ambiente, la sensibilidad de los demás móviles, etc.

El modelo matemático del esquema de ahorro de potencia que se menciona es el siguiente

$$P_t = P_r x^{-\alpha} \quad (2.1)$$

donde  $P_t$  es la potencia de transmisión, que esta en función del umbral del receptor o potencia de recepción  $P_r$ , así como de la distancia  $x$  de la transmisión elevada a un exponente de pérdida  $\alpha$ . La ecuación anterior describe el cálculo que los nodos realizan antes de iniciar una transmisión, para determinar con que nivel de potencia deben transmitir asegurando la calidad de enlace deseada.

Existen diversas aplicaciones para las redes inalámbricas multisalto, y muchas más que se encuentran en desarrollo. Una de las aplicaciones con probabilidad de mayor aplicación son las redes Ad Hoc formadas por dispositivos móviles de comunicación personal. Esta red puede existir en lugares como edificios habitacionales o áreas de trabajo en las que los aparatos de comunicación puedan interconectarse y formar una red que podría estar formada por una cantidad no determinada de nodos, pero que típicamente podría estar formada por 40 o 50 nodos.

Esta idea general de control de potencia de transmisión se adopta en este trabajo para simular el mecanismo de control en una red. Los resultados del análisis y las especificaciones de las consideraciones realizadas en esta investigación se exponen en el capítulo siguiente.

## Capítulo 3

# Análisis de Resultados

Este capítulo está dedicado a mostrar los resultados obtenidos del análisis que se realizó, así como describir los escenarios y la manera en la que se implementó la simulación. Distintos parámetros intervienen en los resultados obtenidos, estos se explican debidamente, y se muestran gráficamente los resultados.

### 3.1. Modelo de Propagación

El canal de radio móvil impone muchas limitaciones sobre el desempeño de los sistemas de comunicación inalámbrica. El enlace entre transmisor y receptor puede variar desde una simple línea de vista, hasta uno obstruido fuertemente por edificios, montañas o follaje. A diferencia de los canales alámbricos que son estacionarios y predecibles, el canal de radio es altamente aleatorio y su análisis no es sencillo. Incluso la velocidad del movimiento impacta en cuanto rápido se atenúa el nivel de la señal mientras el nodo móvil se mueve en el espacio. El modelado del canal de radio ha sido históricamente una de las partes más difíciles del diseño de sistemas inalámbricos, y típicamente se realiza en base a mediciones hechas en sistemas de comunicación ya instalados [11].

Tradicionalmente los modelos de propagación se enfocan en predecir la fuerza promedio de la señal recibida a una distancia dada del transmisor. Los modelos de propagación que predicen el promedio de la intensidad de la señal para una separación arbitraria entre transmisor-receptor (T-R) son útiles en la estimación del área de cobertura del transmisor y se les denomina modelos de propagación de gran escala.

El modelo de espacio libre que es un modelo utilizado comúnmente para predecir la fuerza de la señal recibida cuando el transmisor y el receptor se encuentran en línea de vista y no hay obstrucciones en ella, fue el elegido para utilizar en este trabajo. La razón principal para esta decisión es, que el objetivo del trabajo no consiste en ver el comportamiento del modelo, por lo que idealizando los escenarios, el modelo de espacio libre funciona de manera adecuada. Como con la mayoría de los modelos de gran escala, el modelo de espacio libre predice que la potencia recibida disminuye en función de la distancia de separación entre

transmisor y receptor elevada a una cierta potencia. La potencia recibida por una antena receptora que esta separada de una antena transmisora a una distancia  $d$  esta dada por la ecuación

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3.1)$$

donde  $P_t$  es la potencia transmitida,  $P_r(d)$  es la potencia recibida en función de la distancia de separación entre transmisor y receptor,  $G_t$  es la ganancia de la antena transmisora,  $G_r$  la ganancia de la antena receptora,  $d$  la distancia entre T y R en metros,  $L$  es un factor de pérdidas en el sistema no relacionadas con la propagación, y  $\lambda$  que es la longitud de onda en metros.

$\lambda$  está relacionada con la frecuencia por

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (3.2)$$

donde  $f$  es la frecuencia de la portadora en Hertz,  $\omega_c$  es la frecuencia en radianes por segundo, y  $c$  es la velocidad de la luz dada en metros/s. El valor de  $P_t$  y  $P_r$  están expresados en las mismas unidades, y  $G_t$  y  $G_r$  son adimensionales.

Para el análisis a realizar fué necesario utilizar el modelo expresado en la ecuación 3.1 con una pequeña modificación ya que en este caso la potencia recibida es un valor conocido (que es la sensibilidad del receptor y de los demás nodos) mientras que la potencia de transmisión es la incognita en esta ecuación. Por lo tanto, despejando  $P_t$  la ecuación del modelo es

$$P_t = \frac{P_r(d)(4\pi)^2 d^2 L}{G_t G_r \lambda^2} \quad (3.3)$$

donde  $P_t$  es la potencia en Watts que se necesita para cubrir una distancia  $d$  y recibir un nivel de potencia  $P_r$  en el receptor.

## 3.2. Consideraciones de Diseño en la Simulación

Durante la elaboración de la simulación se tomaron algunas expresiones y modelos como el de propagación previamente presentado, y se definieron los valores de algunos de estos parámetros. Se enlistan a continuación los parámetros, sus valores, y las razones por las cuales de hicieron tales consideraciones.

**Distancia de separación entre T y R.** Dado que este tipo de análisis trata de describir una situación que se presenta tanto en redes ad hoc como de sensores, en el caso de estas últimas la distancia que existe entre un nodo y otro cuando se despliega una red

de este tipo en algun área física, puede ser bastante grande, y dado que el modelo de propagación es aplicable a distancias medianas y grandes, se eligió una distancia de 10 Km.

**Potencia de umbral ó sensibilidad del receptor.** Se consideró la sensibilidad del receptor para este análisis, como el nivel de potencia mínimo en el cual el receptor es capaz de recibir e interpretar correctamente la señal. En promedio la señal recibida en redes inalámbricas (802.11x) es de -70 dBm. En móviles que funcionan bajo el estándar GSM la potencia mínima de recepción puede ser de hasta -110 dBm [10]. Tomando en cuenta esto, el valor de sensibilidad elegido para la simulación es de -110 dBm. Además, se asume que todos los nodos de la red tienen el mismo nivel de sensibilidad.

**Frecuencia de la portadora.** Dentro del rango de frecuencias en las que operan los sistemas de comunicación móvil, la banda de los 900 MHz es utilizada por compañías de comunicación celular, por ésta razón se utiliza esta frecuencia para la simulación.

**Ganancias de las antenas.** El valor de las ganancias de las antenas de transmisión y recepción se fijo en 1. Una ganancia unitaria significa que se cuenta con un radiador isotrópico, es decir, una antena que radía la señal en todas direcciones por igual. Debido a que son muy variados los tipos de dispositivos que pueden pertenecer a una red móvil multisalto y para generalizar el planteamiento del escenario, se determinó usar ganancias unitarias.

**Exponente de pérdida en el medio.** El ambiente por el que se propaga la señal influye de manera significativa en la pérdida de la señal que se transmite. Obstáculos como edificios, arboledas o la misma geografía del área e incluso hasta las condiciones climáticas afectan a la comunicación. El exponente de pérdida es un parámetro que representa esta afección del ambiente sobre la señal, variándose el valor dependiendo del tipo de aplicación. La tabla 3.1 muestra los valores del exponente y las situaciones en las que se aplican. Para el presente trabajo se utilizaron los tres valores mas comunes del exponente de pérdida, los cuales son 2, 3 y 4.

### 3.3. Descripción del Escenario

Basados en el tipo de red que se desea analizar y en las consideraciones mencionadas anteriormente, a continuación se describe cómo está conformado el escenario de la red y la parte en la que se enfoca el análisis de este trabajo. Se describe de manera detallada la metodología que se siguió.

El escenario presenta una red inalámbrica que consta de un área de tamaño determinado dentro de la cual, existe un grupo de nodos móviles como se muestra en la figura 3.1. Si

Tabla 3.1: Exponentes de Pérdida en Distintos Ambientes

Ambiente	Exponente de pérdida, n
Espacio libre	2
Área urbana	2.7 a 3.5
Área urbana con obstrucciones	3 a 5
Línea de vista en edificios	1.6 a 1.8
Obstrucción en edificios	4 a 6
Obstrucción en fábricas	2 a 3

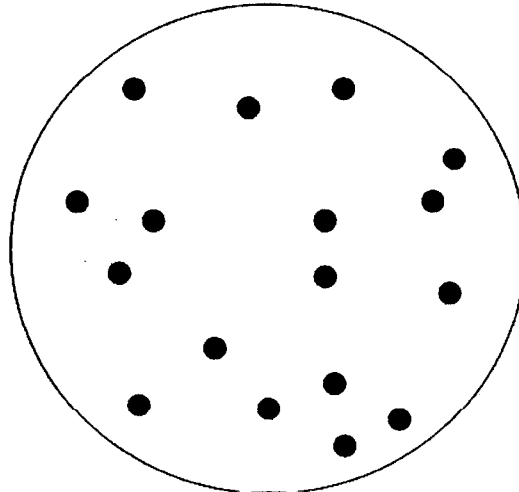


Figura 3.1: Red Inalámbrica Multisalto

esta red fuera una red de sensores, los nodos estarían distribuidos físicamente dentro de un área determinada, situados en una ubicación específica y fija. Por otro lado, si el escenario representara una red Ad Hoc de nodos móviles, también estarían contenidos dentro de un área particular, pero a diferencia de los sensores, estos nodos si pueden cambiar de posición. De tal manera que, el escenario de análisis sería una fotografía de la red tomada en el momento en el que alguno de los nodos intenta iniciar una transmisión hacia algún otro dispositivo de la red.

En el momento que un nodo A inicia una transmisión de información hacia un nodo B, se forma un enlace de comunicación entre los dos. Dependiendo de la posición de los demás móviles la transmisión entre A y B podría realizarse de manera directa entre ambos o a través de una ruta multisalto como se aprecia en la figura 3.2.

Mientras mayor sea la densidad de nodos en la red mayor será la cantidad de posibles



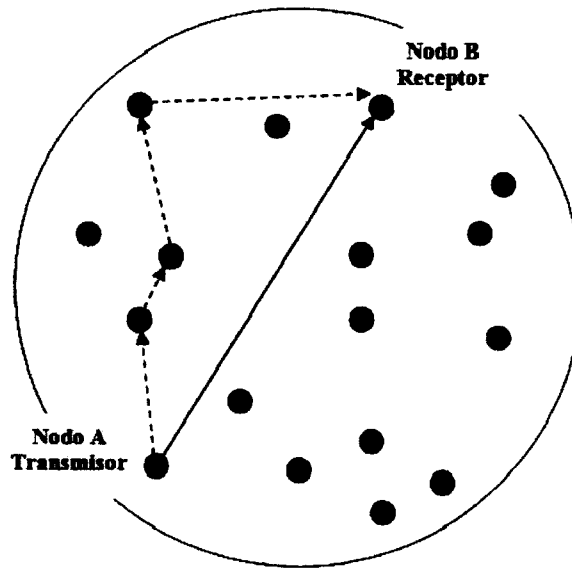


Figura 3.2: Enlace directo y enlace multisalto entre A y B

rutas multisalto que se puedan formar entre transmisor y receptor. Sin embargo, el criterio principal bajo el cual se determina qué ruta tomar, en el caso de un enlace multisalto, y a través de cuántos nodos pasar (número de saltos) es la potencia de transmisión requerida para alcanzar el destino. La transmisión puede darse de las siguientes maneras:

**Un salto ó transmisión directa.** El nodo A puede enviar la información hasta el punto B de manera directa realizando un solo salto. La potencia de transmisión necesaria para alcanzar el destino que se encuentra a la distancia  $d$ , está dada por el modelo de propagación. A mayor distancia entre A y B mayor será la potencia con la que se tenga que transmitir.

**Dos saltos.** Se contruye un enlace entre el nodo A y B haciendo uso de un nodo intermedio. A transmite al nodo intermedio, el cual puede estar situado en una posición  $x,y$  aleatoria, con el nivel de potencia necesario para cumplir con el requerimiento de que la potencia que llega al receptor sea mayor que la sensibilidad del mismo (control de potencia). El nodo intermedio retransmite la señal hacia el punto B (destino) calculando de igual manera el nivel de potencia de transmisión. La energía total utilizada en este caso es la suma de la potencia necesaria en cada uno de los saltos.

**N saltos.** De manera similar al caso anterior, la comunicación entre A y B se lleva a cabo a través de uno o varios nodos intermedios, donde cada uno de estos nodos se ubica en

una posición aleatoria dentro de la red. En cada una de las transmisiones, el nodo que transmite realiza el control de potencia ajustando el nivel de energía de transmisión para alcanzar el siguiente nodo. En cada una de las transmisiones se requiere de un determinado nivel de potencia por lo que la potencia total del enlace, es la suma de cada uno de ellos.

Se debe analizar cual de las posibles rutas que se pueden formar representa un determinado ahorro de energía en comparación a una transmisión directa. Si se transmite en un solo salto la potencia necesaria para llegar al destino es  $P_d$ . Cuando se transmite en dos saltos la potencia total es

$$P_{2saltos} = P_{t1} + P_{t2} \quad (3.4)$$

donde  $P_{2saltos}$  es la potencia total del enlace,  $P_{t1}$  es la potencia del primer salto y  $P_{t2}$  la del segundo. Así al sumar la potencia de cada uno de los enlaces se obtiene la cantidad energía necesaria para alcanzar el nodo destino en dos saltos. Cuando se trata de una ruta a través de mas de un nodo intermedio, la potencia de transmisión total del enlace es

$$P_{Nsaltos} = P_{t1} + P_{t2} + \dots + P_{tN} \quad (3.5)$$

donde  $P_{Nsaltos}$  es la potencia resultante de la suma de las potencias de cada uno de los N saltos que forman el camino entre fuente y destino.  $P_{t1}$  a  $P_{tN}$  representan las potencias de transmisión individuales de cada uno de los caminos de la ruta multisalto.

Trabajos de investigación anteriores demuestran que en muchos casos, la transmisión multisalto permite reducir el consumo de energía en comparación con la transmisión directa. Para poder comparar adecuadamente estas dos formas de transmitir información y lograr el objetivo de esta investigación, el nivel de potencia que sirve como referencia para determinar si existe o no ahorro de energía, es la potencia de transmisión requerida en un solo salto.

Una ruta multisalto puede ofrecer un beneficio energético dependiendo de la posición en la que se encuentren los nodos que forman esa ruta o camino. Como se puede apreciar en la figura 3.3 los nodos que realizan la función de retransmitir los mensajes pueden estar situados en una posición aleatoria dentro del plano de la red, lo que impone restricciones importantes al momento de elegir una ruta para transmitir.

### 3.3.1. Límite del Area de Ahorro de Potencia

Si el nodo o los nodos intermedios que forman parte del camino de transmisión estan separados por distancias considerables entre si, la suma de las potencias de transmisión en cada uno de los saltos podría ser mayor que la potencia de referencia, lo que significa que en lugar de haber un ahorro de potencia, el consumo de energía se incrementaría. Existe por lo tanto, una región física que delimita el área en la que pueden estar situados los nodos

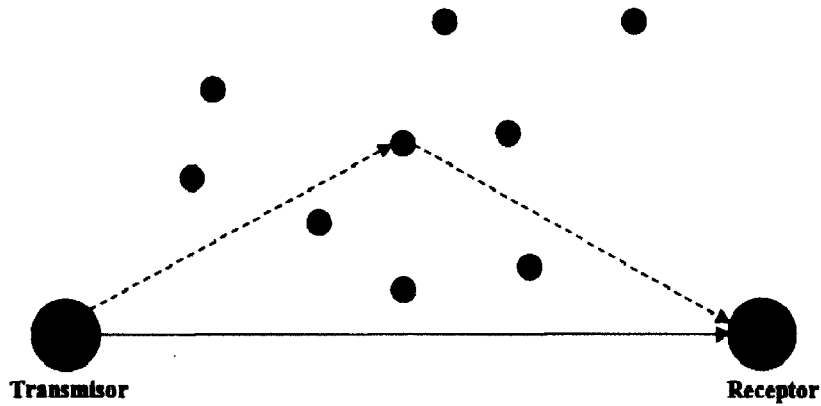


Figura 3.3: Posición aleatoria de los nodos intermedios

retransmisores de manera que la ruta multisalto, represente un ahorro de potencia como se ilustra en la figura 3.4.

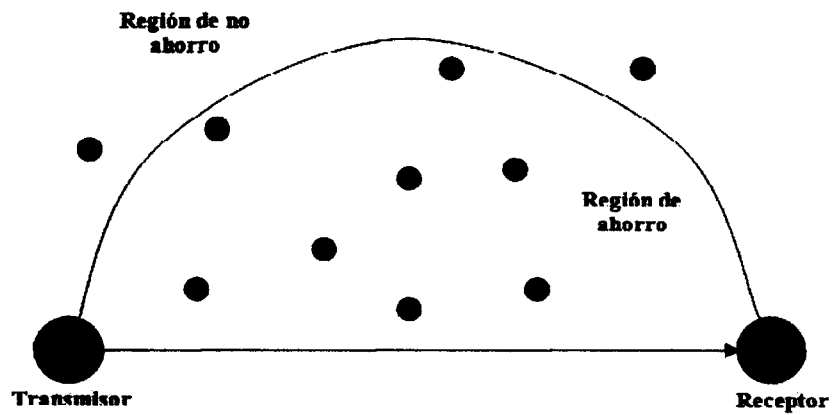


Figura 3.4: Límite de la región de ahorro de una ruta multisalto

La línea que aparece en la grafica delimita dos áreas físicas. La primera de ellas, la región de ahorro, representa el área en la que todas las rutas multisalto contenidas dentro de esa región requieren menor o igual potencia en comparación al nivel de referencia. La segunda región de no ahorro se denomina así porque representa el área en la que, si alguno o algunos de los nodos del camino multisalto están ubicados en esta región, la potencia total multisalto será mayor que la potencia de referencia lo que representa un gasto mayor de energía. Por lo tanto, la línea que divide las dos regiones representa los puntos límite en los que pueden estar ubicados los nodos intermedios. En ese caso la potencia del enlace multisalto es igual

a la potencia de referencia. El tamaño y la forma de la región de ahorro depende de los parámetros del escenario como el número de saltos de la ruta y el índice de pérdida.

Para expresar con mas detalle esta situación se toma el caso particular de dos saltos como ejemplo. Para enviar una señal desde un punto A hasta un punto B se tiene la posibilidad de transmitir directamente o de hacerlo en dos saltos. El modelo de propagación predice que para cubrir la distancia que separa los dos puntos se necesita una potencia  $P_{dir}$ . Este valor es el punto de comparación o referencia en este caso.

Transmitir en dos saltos requiere que el nodo fuente envíe los datos a un nodo auxiliar, el cual retransmite la información al nodo destino. Este punto de retransmisión es otro dispositivo de la red que tiene una posición aleatoria dentro de la misma. Se requiere analizar las posibles posiciones que este nodo puede tener para determinar en cuales de esas posiciones la potencia total del enlace representa un beneficio energético.

En el caso más sencillo, cuando el nodo intermedio se sitúa exactamente a la mitad de la distancia que separa al punto A del punto B como se observa en la figura 3.5, la potencia de transmisión en dos saltos tiene su valor más bajo.



Figura 3.5: Transmisión en dos saltos

En la figura 3.6 se ilustra la variación de la potencia total de transmisión (la suma de las potencias de los dos saltos) acorde a la posición que toma el nodo intermedio sobre el eje X. En la esquina inferior izquierda (0,0) se encuentra el transmisor mientras que la esquina inferior derecha (d,0) de la grafica esta el receptor. Como lo demuestra esta simulación, el mínimo se encuentra cuando el punto intermedio esta a la mitad de la distancia total.

Analíticamente se puede demostrar que lo que indica la simulación anterior es correcto. Simplificando la ecuación del modelo de espacio libre para efecto de la comprobación se puede expresar la suma de la potencia de transmisión de cada uno de los saltos de la siguiente forma

$$P_{tot} = P_r x^{-\alpha} + P_r (d - x)^{-\alpha} \quad (3.6)$$

donde  $P_{tot}$  es la suma de la potencia de los dos saltos,  $P_r$  es la potencia recibida que es la sensibilidad del receptor,  $x$  que es la distancia a la que se encuentra el nodo intermedio del origen o transmisor, y  $\alpha$  que es el exponente de pérdida en el medio.

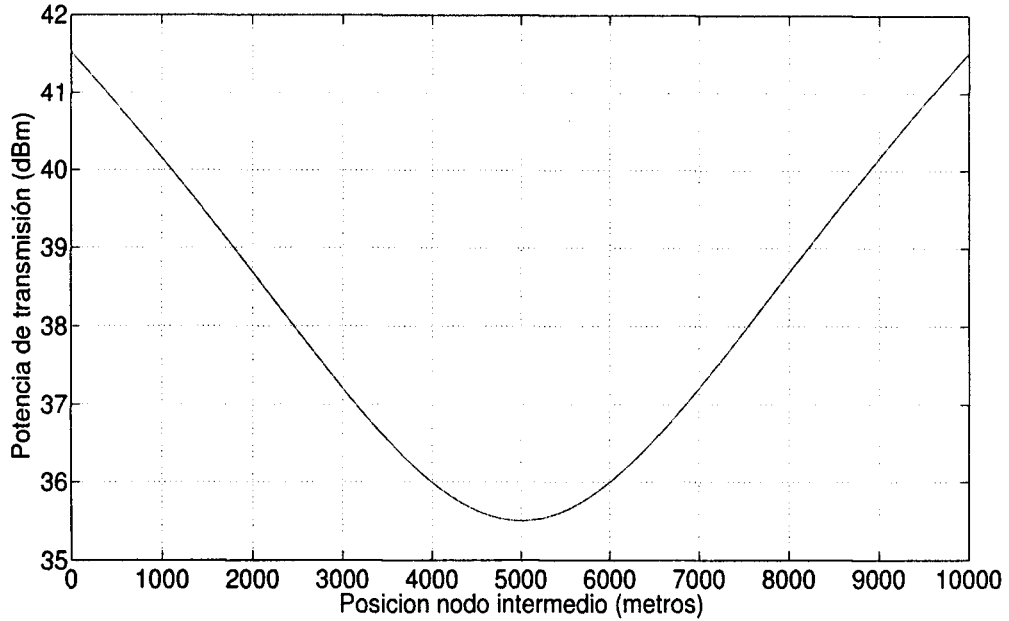


Figura 3.6: Potencia de transmisión en dos saltos

Para poder encontrar el valor mínimo de  $x$  en el que la expresión anterior se cumple, es necesario derivar e igualar a cero, con lo que se obtiene lo siguiente.

$$2xP_r - 2dP_r + 2xP_r = 0 \quad (3.7)$$

Despejando  $x$  se llega a la expresión

$$x = \frac{1}{2}d \quad (3.8)$$

A manera de ejemplo, este caso lineal es ilustrativo para saber como se comporta la potencia a medida de cambian las distancias de los saltos. Sin embargo, en la realidad el caso es mas complejo debido a que las posiciones de los nodos son aleatorias. Como lo indica la figura 3.7, en el caso de dos saltos como el ejemplo que se utilizó, el nodo intermedio puede ubicarse en posiciones en las que los enlaces que se forman no coinciden con el plano del camino que existe entre transmisor y receptor. Dada esta situación, cuando el nodo intermedio esta ubicado en una coordenada  $(x,y)$  especifica es necesario determinar la distancia que debe cubrir cada uno de los saltos lo cual se logra aplicando la simple ecuación del teorema de Pitágoras.

Una vez obtenidas las distancias que cubrirán los saltos es posible calcular la potencia en cada uno de ellos, y la potencia total del enlace. Cuando la ruta multisalto está formada por mas de un nodo intermedio se determinan las distancias de los saltos de manera similar

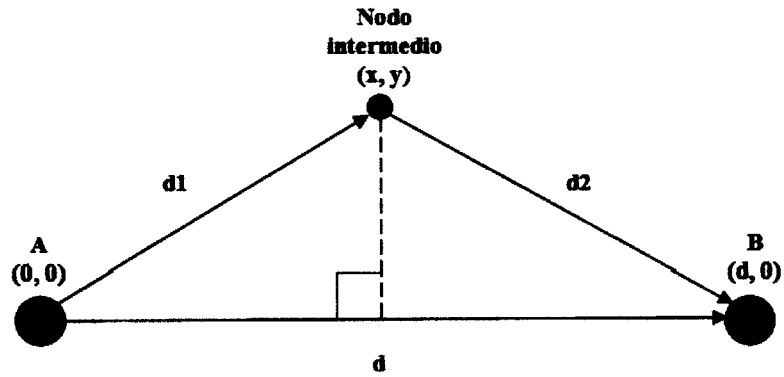


Figura 3.7: Cálculo de las distancias de los dos saltos

al ejemplo descrito anteriormente. Una ilustración de cómo se realiza, se muestra en la figura 3.8

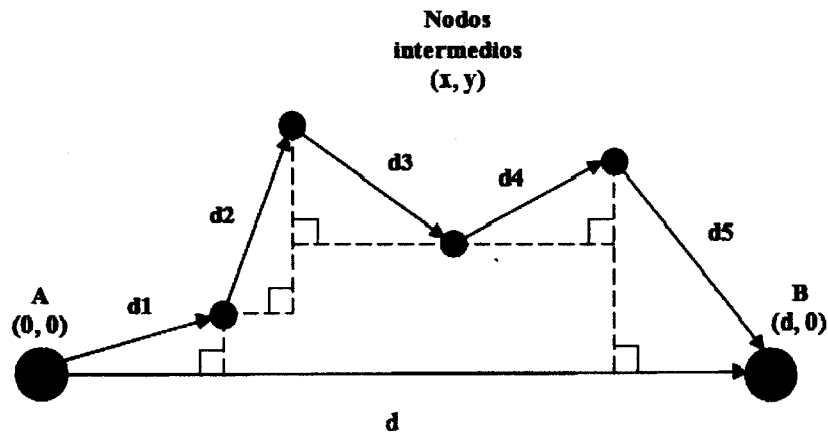


Figura 3.8: Cálculo de las distancias de los saltos

Con el valor de la potencia total se determina la conveniencia de la ruta multisalto comparando la potencia con el valor de referencia. Si la transmisión multisalto es menor, existe un ahorro de potencia de transmisión, de lo contrario se concluye que es más conveniente en términos de gasto de energía que se transmita directamente.

### 3.3.2. Regiones de Ahorro de Potencia

Como se explico en la sección anterior, existe para el caso de las transmisiones multi-salto, una determinada región que delimita el área en la que deben estar situados los nodos intermedios de la ruta con el fin de que la trasmisión multisalto ofrezca un determinado porcentaje de ahorro en comparación a la transmisión en un solo salto.

De igual forma pueden formarse regiones que delimiten el área representativa a un determinado porcentaje de ahorro de potencia. Por ejemplo, puede determinarse el área que contiene las posiciones de los  $n$  nodos del camino multisalto cuya potencia de transmisión represente un 50 % de ahorro en comparación con el nivel de referencia. De manera que esta región podría verse como se muestar en la figura 3.9

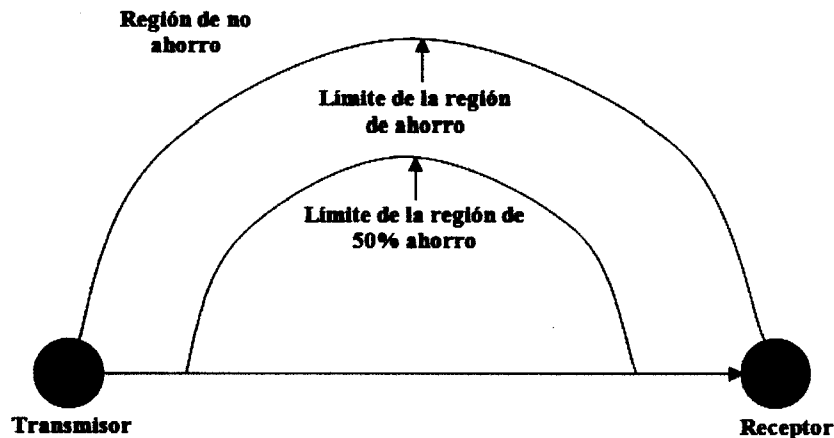


Figura 3.9: Calculo de las distancias de los saltos

Antes de presentar los resultados de esta investigación, se enlistan una serie de pasos que describen el funcionamiento de la simulación de la cual se obtuvieron los resultados, esto con el fin de clarificar un poco más el procedimiento o metodología que se siguió.

Nota: el procedimiento siguiente se realiza para cada enlace individual entre dos nodos específicos de la red.

1. Definir los parámetros iniciales, tales como la sensibilidad de los dispositivos, distancia entre transmisor y receptor, frecuencia, exponente de pérdida, modelo de propagación, etc.
2. Calcular el nivel de potencia de referencia para la transmisión.
3. Definir el número de saltos que conformarán la ruta multisalto a seguir desde la fuente hasta el destino.

4. Generar de forma aleatoria las posiciones de cada uno de los nodos intermedios dentro de la red.
5. Calcular la distancia de cada uno de los saltos.
6. Calcular en base al modelo de propagación y al control de potencia implementado, la potencia de transmisión de cada salto.
7. Calcular la suma de la potencia de todos los saltos.
8. Comparar la potencia de transmisión multisalto con la potencia de referencia y determinar si es menor, mayor o igual.
9. Si la potencia de transmisión multisalto es menor o igual que la potencia de referencia continúa con el paso 10. Si es mayor, se ignoran las posiciones de los nodos ya que tal ruta no representa ahorro de potencia.
10. Almacenar las coordenadas de cada una de las posiciones de los nodos de la ruta.
11. Realizar iterativamente las operaciones de los pasos 4 al 10.
12. Unir graficamente los puntos externos de las posiciones almacenadas de los nodos para formar la línea que delimita la región de ahorro.
13. Recalcular el valor de referencia en base al nivel de ahorro de potencia que se desee obtener.
14. Repetir todos los pasos anteriores para cada nivel de ahorro de potencia.



## 3.4. Resultados

Habiendo definido los escenarios y las especificaciones previas del análisis en esta sección, se procede a presentar los resultados. Se muestran las gráficas obtenidas de la simulación para diferentes valores de los parámetros los cuales también se especifican.

El número de iteraciones que se manejaron en la simulación no tienen un fundamento estadístico debido a que no se encontró en el estado del arte algún análisis similar del cual pudiera definirse un determinado número de iteraciones. Para lograr gráficamente un resultado con el nivel de definición apropiado, el número de iteraciones fué diferente para varios de los casos que aquí se presentan.

La razón principal por la cual se justifica el análisis por medio de una simulación computacional es el hecho de que es necesario determinar la potencia de transmisión de cada uno de los enlaces multisalto que se pueden tener. Mientras más grande sea el número de nodos intermedios que conformen la ruta multisalto, más complicado es analizar el escenario de manera analítica ya que cada uno de los nodos intermedios puede estar ubicado en cualquier posición del plano. A través de la simulación y un alto número de iteraciones se puede obtener un resultado muy apegado al caso ideal, que sería realizar el análisis del enlace en cada una de las posibles posiciones de cada uno de los nodos.

En lo que se refiere a la generación de las posiciones de los nodos intermedios, el tamaño del área dentro de la que se posicionan los nodos varía dependiendo del número de saltos y del exponente de pérdida. Por esta razón, se definieron las posiciones generando una ubicación aleatoria  $(x,y)$  para cada nodos. En  $x$  el valor siempre estaba dentro del rango  $(0 - 10,000)$  que es la distancia de separación entre T y R. En  $y$  el valor fué distinto dependiendo de los parámetros antes mencionados, por lo que se ajustó en cada escenario tratando de encontrar un valor que estuviera en el límite del tamaño máximo en  $y$  del área límite de ahorro.

### 3.4.1. Dos saltos

Para el caso de una transmisión multisalto con un nodo intermedio, osea dos saltos, se presentan tres casos que corresponden a los diferentes valores del exponente de pérdida utilizados en este trabajo. Los parámetros se especifican a continuación.

Número de saltos 2

Exponente de pérdida 2

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

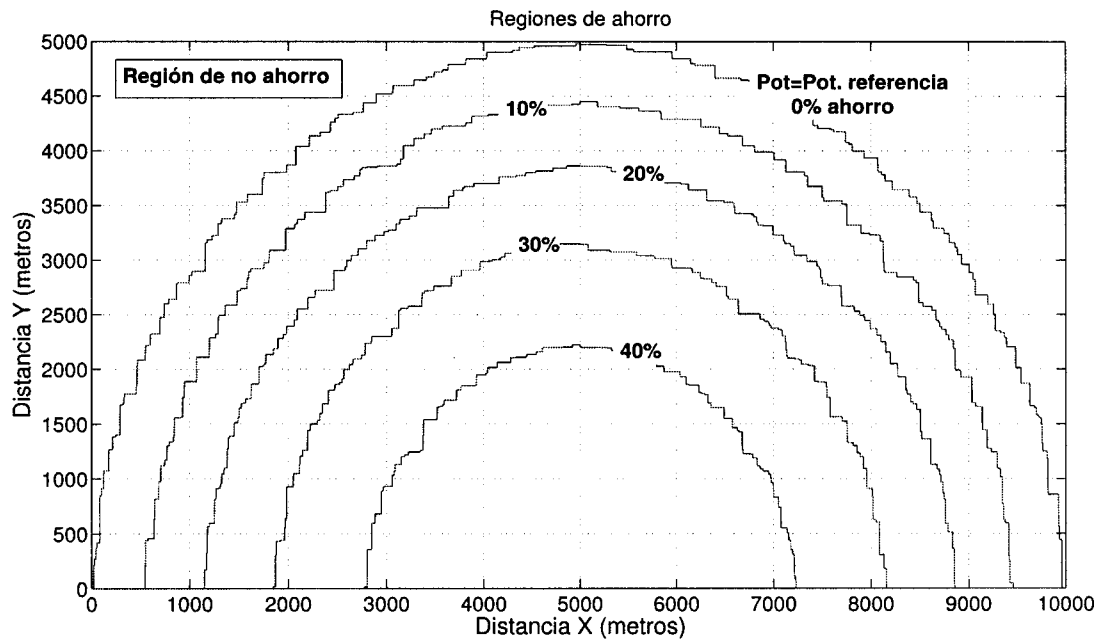


Figura 3.10: Regiones de ahorro en dos saltos

Número de saltos 2

Exponente de pérdida 3

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

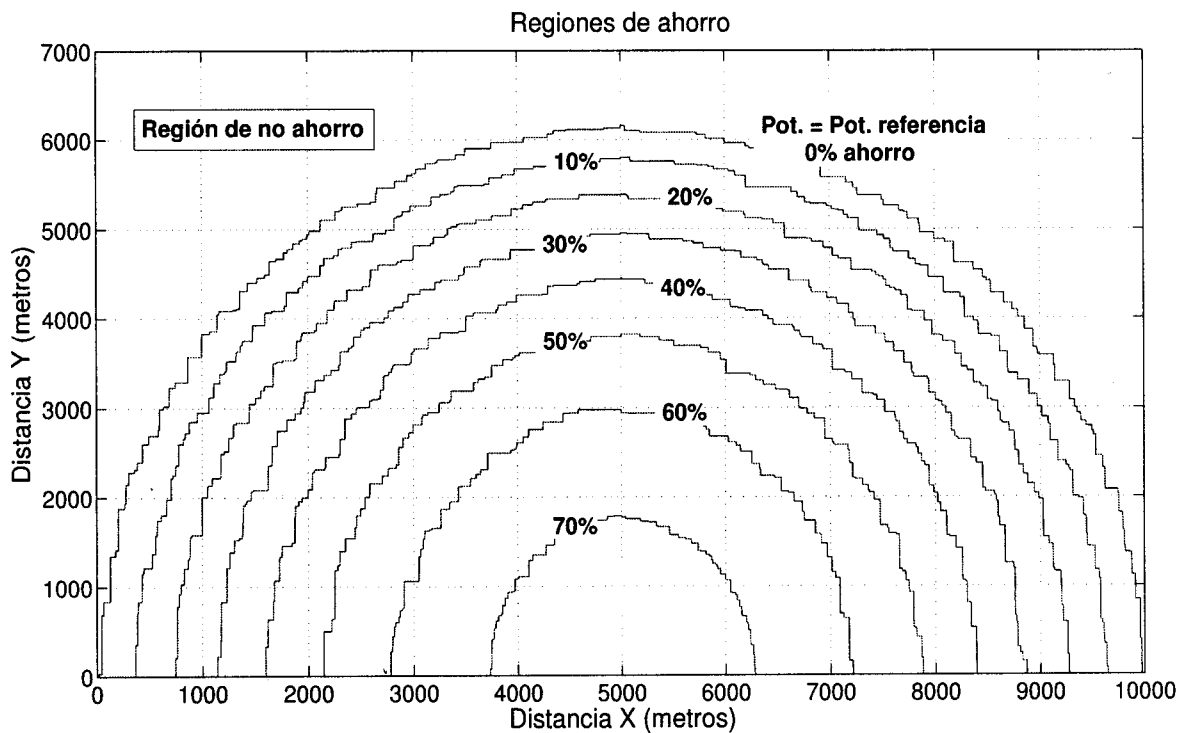


Figura 3.11: Regiones de ahorro en dos saltos

Número de saltos 2

Exponente de pérdida 4

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

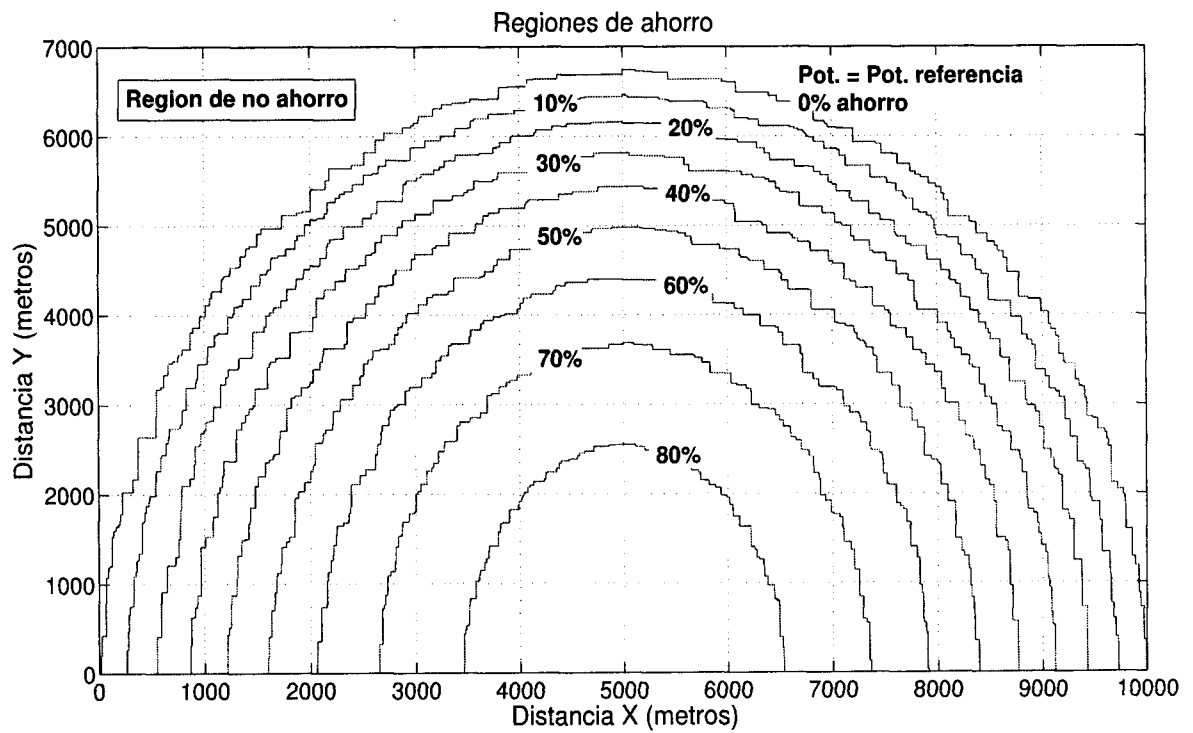


Figura 3.12: Regiones de ahorro en dos saltos

### 3.4.2. Tres saltos

En una transmisión multisalto con dos nodos intermedios el envío se realiza en tres saltos. Al igual que en el caso anterior se presentan los resultados para los tres valores de exponente de pérdida utilizados. Los parámetros se especifican a continuación.

Número de saltos 3

Exponente de pérdida 2

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

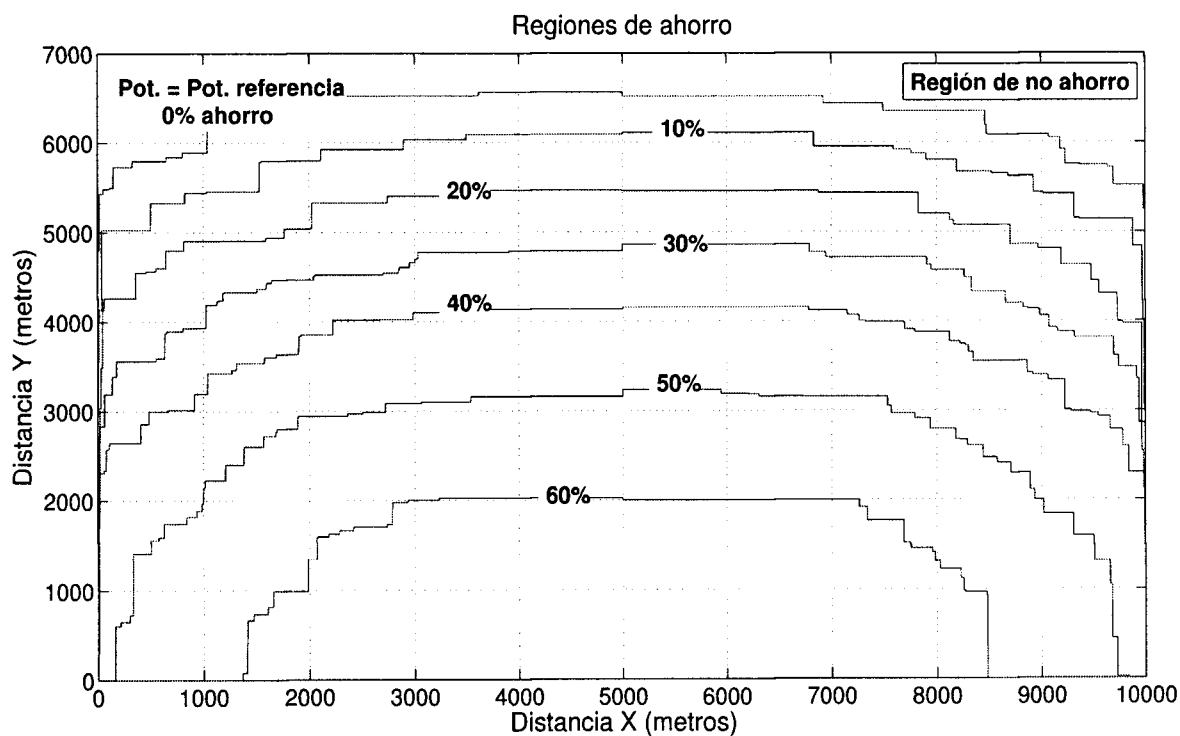


Figura 3.13: Regiones de ahorro en tres saltos

Número de saltos 3

Exponente de pérdida 3

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

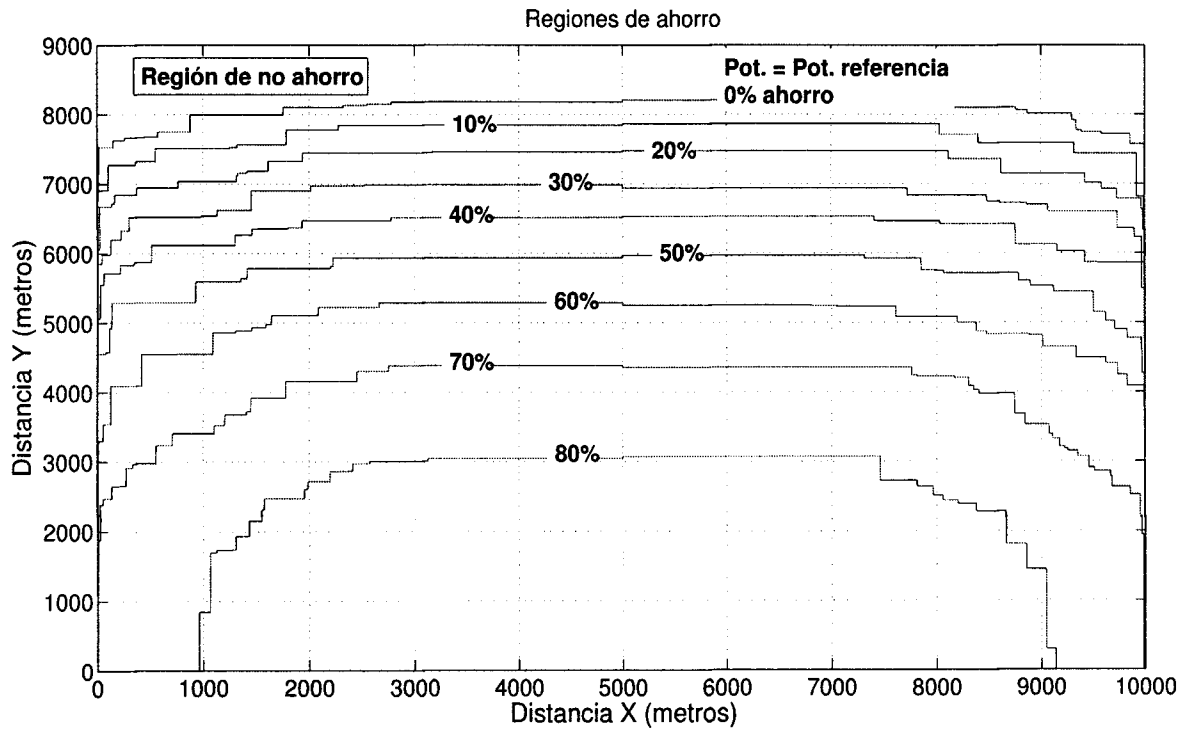


Figura 3.14: Regiones de ahorro en tres saltos

Número de saltos 3

Exponente de pérdida 4

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

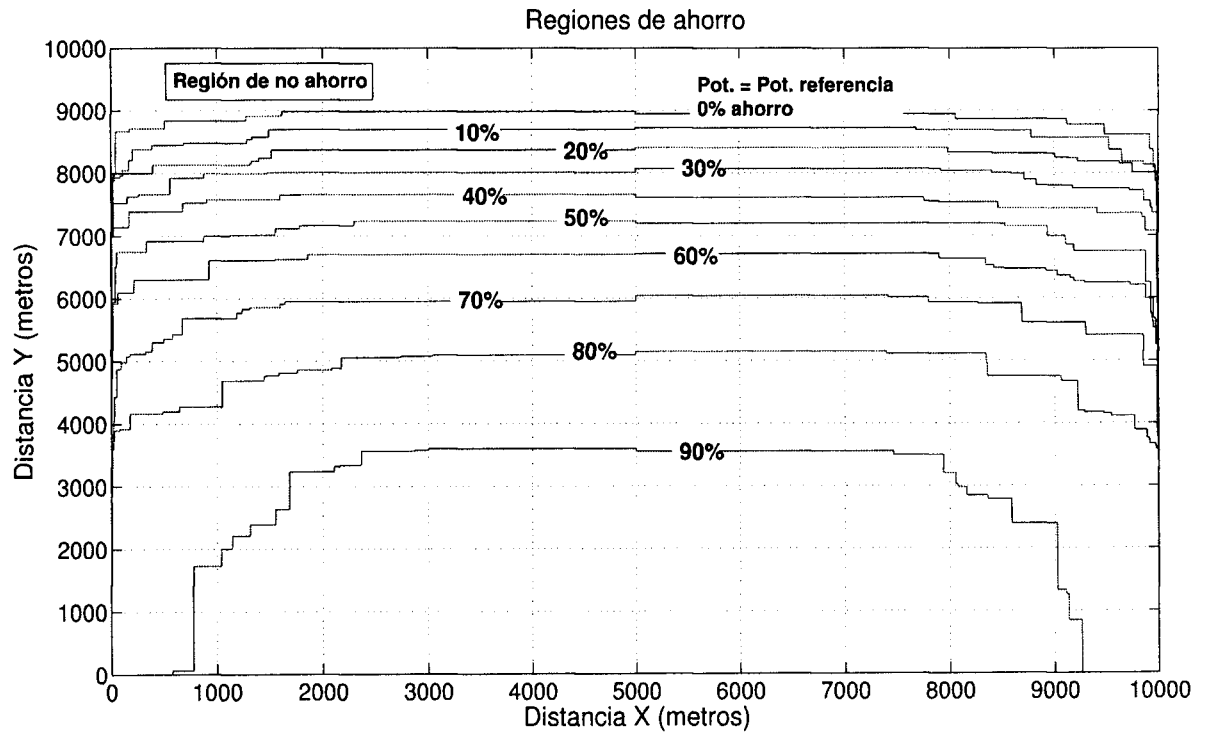


Figura 3.15: Regiones de ahorro en tres saltos

### 3.4.3. Cuatro saltos

Para el caso de una transmisión multisalto con tres nodos intermedios o sea cuatro saltos, se presentan tres casos que corresponden a los diferentes valores del exponente de pérdida utilizados en este trabajo. Los parámetros se especifican a continuación.

Número de saltos 4

Exponente de pérdida 2

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

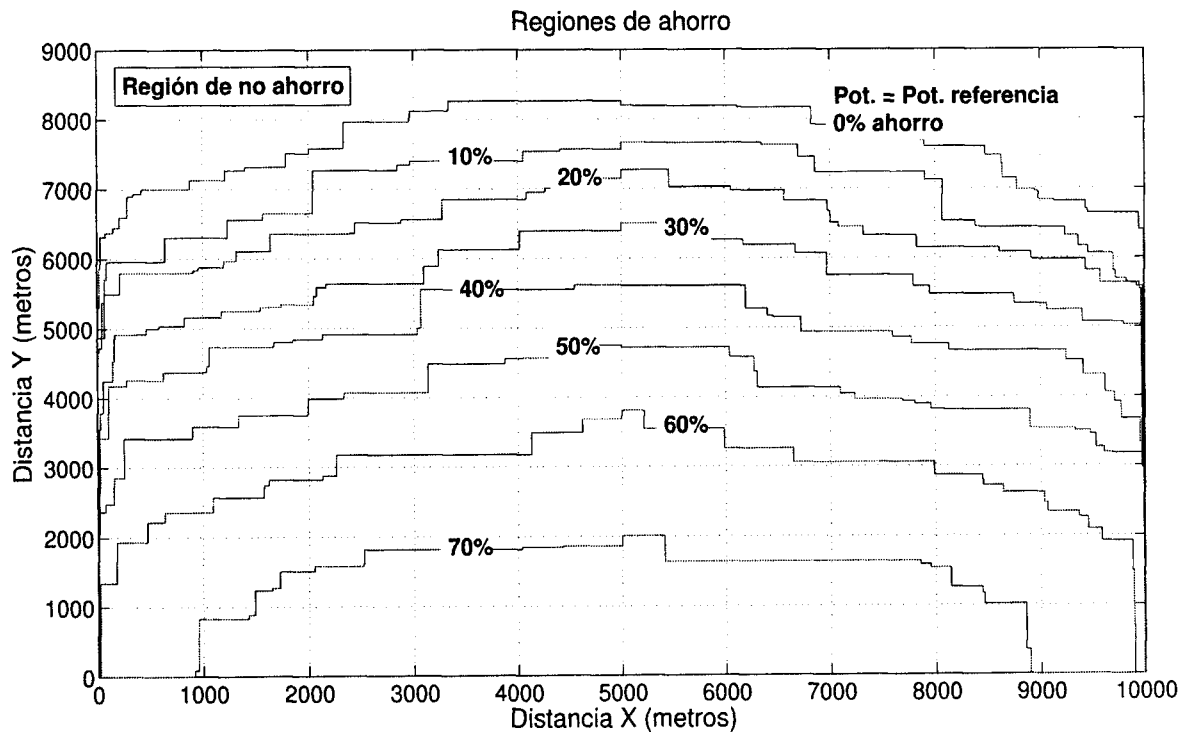


Figura 3.16: Regiones de ahorro en cuatro saltos



Número de saltos 4

Exponente de pérdida 3

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

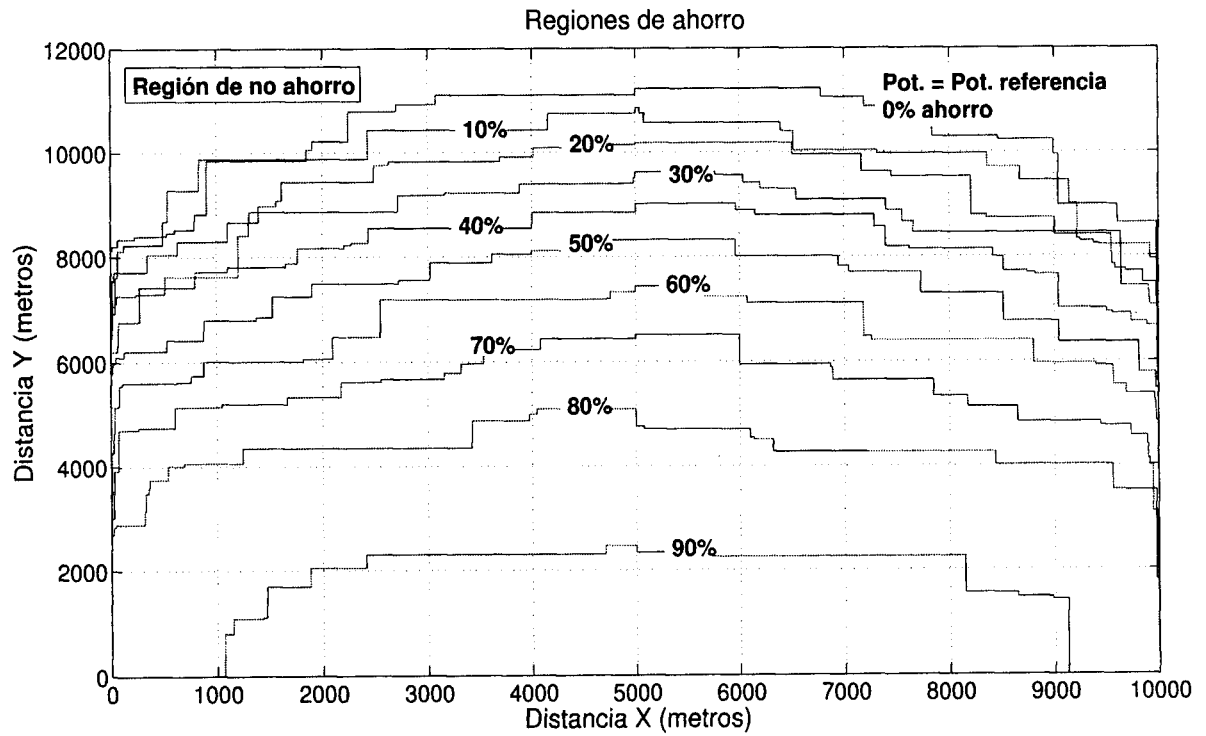


Figura 3.17: Regiones de ahorro en cuatro saltos

Número de saltos 4

Exponente de pérdida 4

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

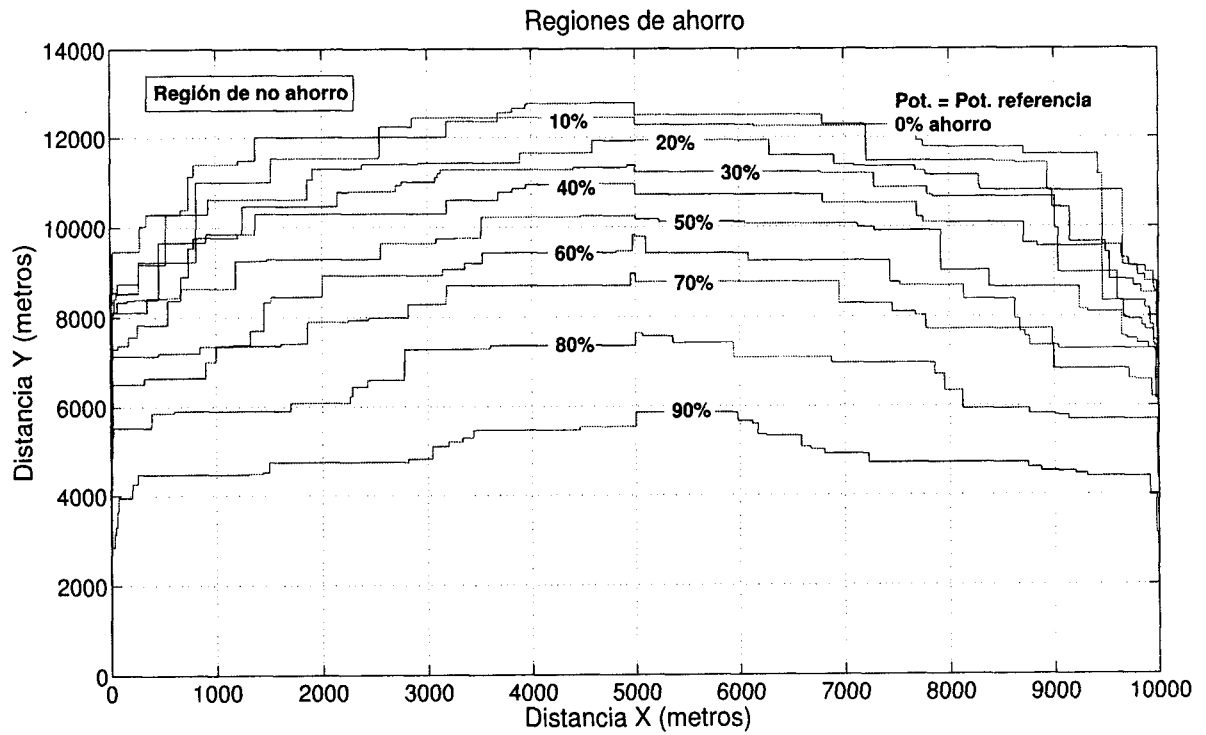


Figura 3.18: Regiones de ahorro en cuatro saltos

### 3.4.4. Cinco saltos

En una transmisión multisalto con cuatro nodos intermedios el envío se realiza en cinco saltos. Al igual que en el caso anterior se presentan los resultados para los tres valores de exponente de pérdida utilizados. Los parámetros se especifican a continuación.

Número de saltos 5

Exponente de pérdida 2

Sensibilidad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

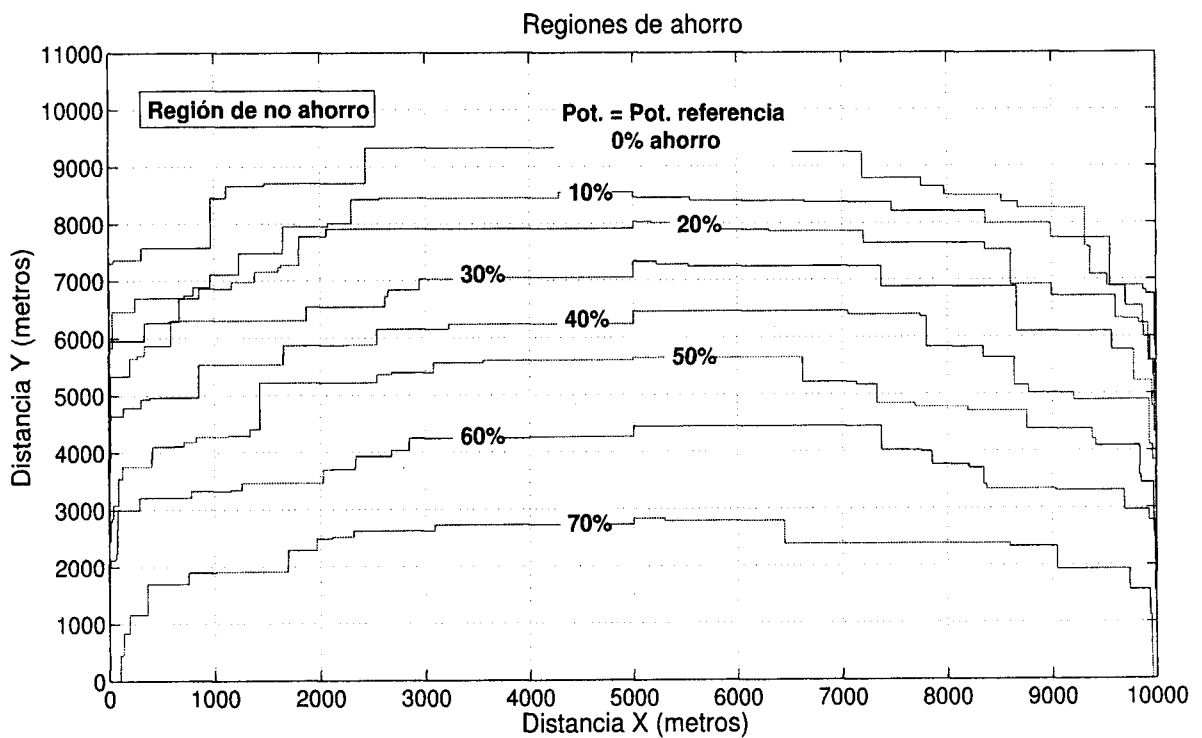


Figura 3.19: Regiones de ahorro en cinco saltos

Número de saltos 5

Exponente de pérdida 3

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

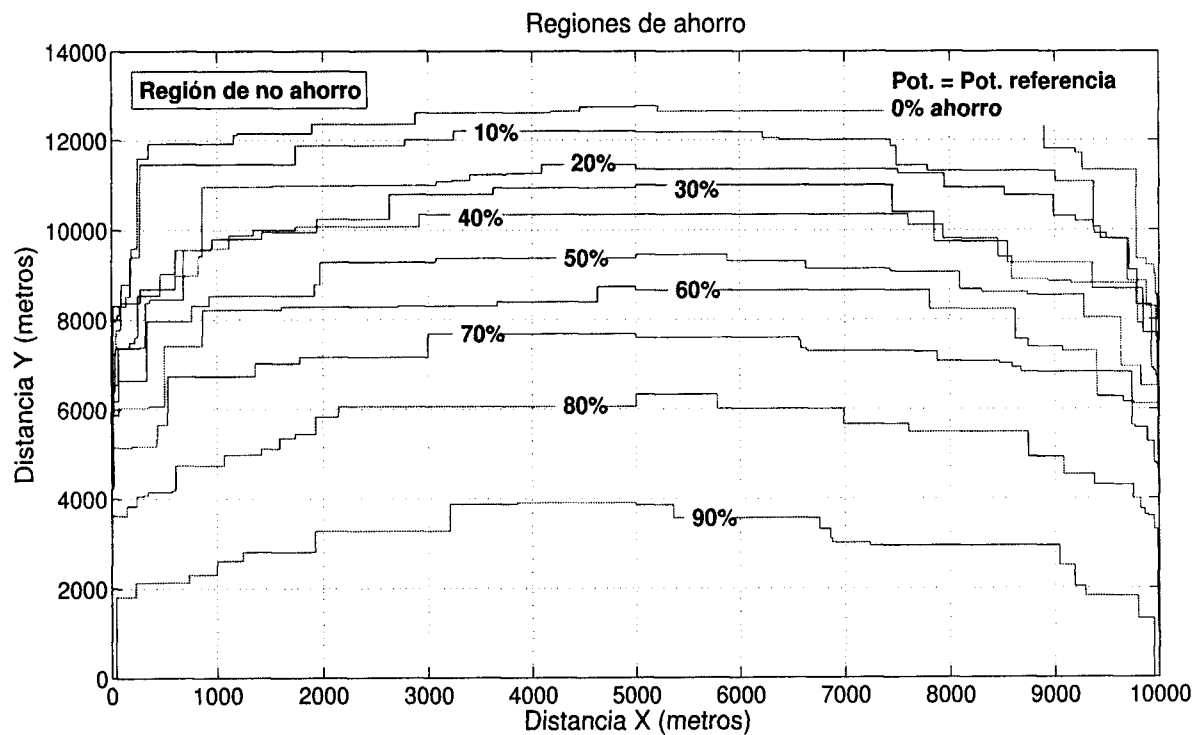


Figura 3.20: Regiones de ahorro en cinco saltos

Número de saltos 5

Exponente de pérdida 4

Sensitividad de los nodos -110 dBm.

Distancia entre transmisor y receptor 10 Km.

Número de iteraciones 100000

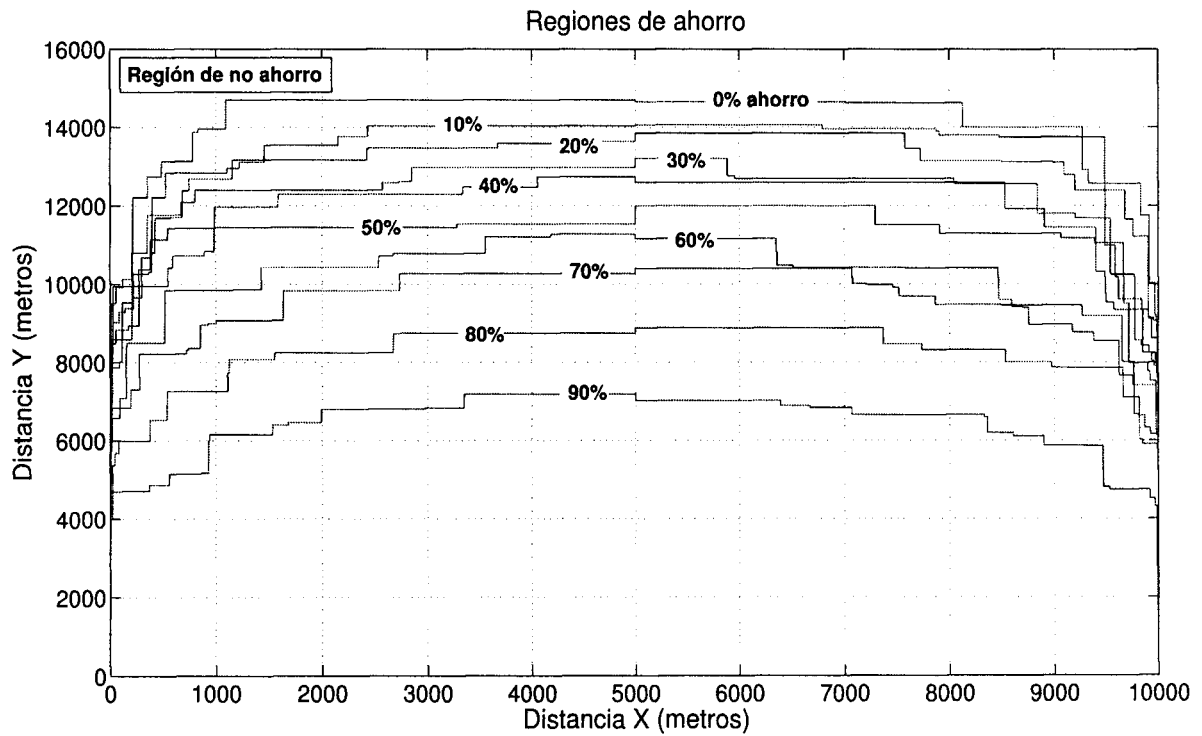


Figura 3.21: Regiones de ahorro en cinco saltos

## Capítulo 4

### Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis sobre la eficiencia en terminos de potencia de transmisión de un enlace multisalto, y bajo que condiciones se puede obtener un determinado porcentaje de ahorro de potencia dependiendo de las posiciones de los nodos en la red. Con ayuda de una herramienta de software se desarrolló la simulación de distintos escenarios.

Los resultados de este trabajo se presentan de manera puntual a continuación:

- En trabajos e investigaciones anteriores se ha demostrado ampliamente que una transmisión multisalto ofrece cierto ahorro en el consumo de potencia de transmisión, sin embargo en este análisis se observa que el nivel de ahorro de energía depende de la posición que ocupen los nodos dentro de la red en un determinado momento.
- Con base en una simulación computacional se logró determinar en el plano de la red, la forma y tamaño de la región física que definen el área dentro la que deben estar ubicados los nodos de una ruta multisalto, para que esta represente cierto ahorro de potencia de transmisión, en comparación a una transmisión directa entre transmisor y receptor.
- De la misma manera se determinaron la forma y el tamaño de las regiones que representan un porcentaje de ahorro de potencia específico. De esta manera se pueden conocer las áreas dentro de las cuales deben colocarse los nodos, en la implementación de una red inalámbrica multisalto para obtener un determinado consumo de potencia.
- Llama la atención que bajo las condiciones impuestas por los parámetros con los que se realizó en análisis, el ahorro de potencia que se puede lograr con una transmisión multisalto, llega hasta niveles de 80 % y 90 % lo que en aplicaciones como las redes de sensores, es de gran utilidad.

## Capítulo 5

### Trabajos Futuros

A partir de este trabajo se presentan algunas sugerencias para trabajos futuros.

- El cálculo de la potencia de transmisión necesaria para cubrir cada uno de los saltos, en este trabajo, se realizó en base al modelo de espacio libre. Puede realizarse un análisis similar con un modelo de propagación distinto para alguna aplicación específica.
- Se puede modificar el método de control de potencia que se utilizó en esta investigación. Existen en el estado del arte muchas estrategias de control de potencia de transmisión que pueden implementarse en un análisis como este.
- El mismo estudio hecho en este trabajo puede realizarse en un futuro de manera más específica. Los parámetros como la sensibilidad de los nodos, la frecuencia, etc. fueron fijados en valores específicos para construir un escenario general, por lo que pueden ajustarse los valores de estos parámetros para adaptarlos a problemas más especiales.

## Bibliografía

- [1] J. Gomez and A. Campbell, "Conserving Transmission Power in Wireless Ad Hoc Networks", *Dept. of Electrical Engineering and Center for Telecommunications Research, Columbia University*.
- [2] B. Müller, "Filling Stations for Cell Phones", *Siemens Publications*.
- [3] H. Yanikomeroglu, "The New Wireless Paradigm: Multihop Relay Networks and Cooperative Communications", *IEEE VTC Fall 2008*, 2008.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Caryirci, "A Survey on Sensor Networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, 102-114, 2002.
- [5] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal and M. Srivastava, "Topology management for sensor networks: exploiting latency and density", *Proc. ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Network. and Comput. (MOBIHOC), Lausanne, Switzerland*, 135-145, 2008.
- [6] T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. F. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, J. Hui, and B. Krogh, "Energy-Efficient Surveillance System using Wireless Sensor Networks", *In ACM MobiSys*, 270-283, 2004.
- [7] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. C. Ruiz, O. Marcillo, J. B. Johnson, J. M. Lees, and M. Welsh, "Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano", *In IEEE Internet Computing, Special Issue on Data-Driven Applications in Sensor Networks, volumen 10*, 18-25, 2006.
- [8] CC1000 A unique UHF RF Transceiver. *www.chipcon.com*.
- [9] CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver. *www.chipcon.com*.
- [10] M. Gorricho and J. L. Gorricho, "Comunicaciones Móviles", *Ediciones UPS, Serie Polítext 119 95*, 2002.
- [11] T. S. Rappaport, "Wireless Communications, Principles and Practice", *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, 2002.



- [12] B. Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press, 2005.
- [13] K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati, "Wireless Sensor Networks, Technology, Protocols, and Applications", John Wiley & Sons, 2007.
- [14] I.F. Akyildiz, Su Weilian, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A survey on sensor networks", *Communications Magazine, IEEE*, 102-114, 2002.
- [15] W. Kastner, G. Neugschwandtner, S. Soucek, H.M. Newmann, "Communication Systems for Building Automation and Control", *Proceedings of the IEEE, Volume 93*, 1178 - 1203, 2005.
- [16] D. Egan, "The emergence of ZigBee in building automation and industrial control", *Computing & Control Engineering Journal V*, 14 - 19, 2005.
- [17] Agarwal, Y., Schurgers C., and Gupta R., "Dynamic Power Management using On Demand Paging for Networked Embedded Systems", *In Proc. of Asia-South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC)*, 2005.
- [18] Pering, T., Raghunathan, V., and Want R., "Exploiting radio hierarchies for power-efficient wireless device discovery and connection setup", *In Proceedings of the IEEE International Conference on VLSI Design*, (January 2005).
- [19] Pering T., Agarwal Y., and Gupta R., "CoolSpots: Reducing the Power Consumption of Wireless Mobile Devices with Multiple Radio Interfaces", *CSE, UC University and Intel Research*, 2006.