



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE
ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO
POLITECNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN COMUNICACIONES**

**”Análisis de tráfico y robustez de redes complejas de
sensores inalámbricos”**

T E S I S

QUE PRESENTA

Ernesto Giovanni Garibay López

PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias

EN LA ESPECIALIDAD DE:

Ingeniería Eléctrica

DIRECTORES DE TESIS:

**Dr. Felipe Alejandro Cruz Pérez
Dr. Mario Eduardo Rivero Ángeles**

Ciudad de México

Junio 2024

Agradecimientos

Agradezco al CONAHCYT por haberme otorgado la beca para estudiar el posgrado, por la posibilidad de seguir preparándome académicamente y profesionalmente, que tan noble institución siga adelante para el futuro científico y académico de México.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | 5 |
| Resumen | 7 |
| Abstract | 8 |
| Introducción | 9 |
| 1. Redes de Sensores Inalámbricos | 11 |
| 1.1. Redes de Sensores Inalámbricos | 12 |
| 1.2. Arquitectura | 14 |
| 1.3. Tecnologías Inalámbricas | 17 |
| 1.4. Técnicas de Acceso Aleatorio | 21 |
| 2. Redes Complejas | 23 |
| 2.1. Redes Complejas | 24 |
| 2.2. Modelos Fundamentales de las Redes Complejas | 25 |
| 2.3. Redes de Escalamiento Libre | 29 |
| 2.4. Métricas de Redes | 31 |
| 2.4.1. Trayectorias y Caminatas | 31 |
| 2.4.2. Conectividad y Robustez | 31 |
| 2.4.3. Algoritmo de Dijkstra | 32 |
| 2.4.4. Longitud de Trayectoria Promedio | 32 |
| 2.4.5. Eficiencia de la Red | 33 |
| 2.4.6. Coeficiente de Agrupamiento | 33 |
| 2.5. Algoritmo de generación para una red de escalamiento libre | 35 |
| 3. Tráfico en Redes de Sensores Inalámbricos con Escalamiento Libre | 37 |
| 3.1. Trabajo Relacionado | 37 |
| 3.2. Modelo del sistema | 38 |
| 3.3. Algoritmo de Generación y Medición del Tráfico | 39 |
| 3.4. Resultados | 45 |
| 3.5. Conclusiones | 48 |
| 4. Falla y Ataque en Redes de Sensores Inalámbricos con Escalamiento Libre | 49 |
| 4.1. Trabajo Relacionado | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2. Algoritmo de Falla Uniforme | 50 |
| 4.3. Algoritmo de Ataque Preferencial | 54 |
| 4.4. Conclusiones y futuros trabajos | 57 |
| 5. Referencias | 58 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | RSI con arquitectura centrada en datos, se muestra como un nodo puede recibir información al mismo tiempo y por caminos distintos. | 15 |
| 2. | Figura que ilustra como los RSI se van generando en conjuntos y un nodo es el que va comunicando a través de otros conjuntos. | 16 |
| 3. | Se muestra como los nodos están distribuidos geográficamente. | 17 |
| 4. | Red de Erdos Renyi con $N = 20$ y $p = 0.3$ | 26 |
| 5. | Función de densidad de probabilidad de una red Erdos Renyi con $N = 500$ y $p = 0.02$ | 26 |
| 6. | Red de Watts Strogatz con $N = 20$, $k = 0.4$ y $\beta = 0.3$ | 27 |
| 7. | Función de densidad de probabilidad de una red de escalamiento libre analítica y simulada con $m = 3, 5$ y 7 . | 36 |
| 8. | Red inicial en el modelo del sistema. | 38 |
| 9. | Conexion de un nuevo nodo en la red inicial, se observa como se forzan las m conexiones a pesar de que no todos los nodos se encuentren en su cobertura. | 39 |
| 10. | Conexion de un nuevo nodo despues de n nodos, aqui al haber mayor presencia de nodos dentro del radio de cobertura, se logra apreciar que las conexiones se mantienen en la cobertura. | 39 |
| 11. | Red establecida despues de n nodos. | 40 |
| 12. | Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una ranura vacía. | 41 |
| 13. | Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una transmisión exitosa. | 42 |
| 14. | Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una colisión, cuando dos nodos conectados transmiten al mismo tiempo. | 42 |
| 15. | Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una colisión, esta vez ocurre por la transmisión de un nodo no conectado y mas nodos transmiten el mismo tiempo. | 43 |
| 16. | Comportamiento de la densidad de probabilidad de la RSI de acuerdo al porcentaje de r_c respecto al radio total. | 45 |

| | | |
|-----|--|----|
| 17. | Probabilidad de recepción exitosa contra probabilidad de transmitir un paquete | 46 |
| 18. | Probabilidad de Colisión contra probabilidad de transmitir un paquete. | 47 |
| 19. | Probabilidad de ranura vacía contra probabilidad de transmitir un paquete | 48 |
| 20. | Imagen ilustrativa de cómo los nodos fallarían uniformemente sin importar su ubicación o su grado. | 50 |
| 21. | Resultados obtenidos de la medición del APL en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos fallan aleatoriamente. | 51 |
| 22. | Resultados obtenidos de la medición de NE en una red RSI con escalamiento libre y de una red simple cuando los nodos fallan aleatoriamente. | 53 |
| 23. | Imagen ilustrativa de cómo los nodos serían atacados por ser los nodos con mayor grado. | 54 |
| 24. | Resultados obtenidos de la medición del APL en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos son atacados de acuerdo a su grado del nodo. | 55 |
| 25. | Resultados obtenidos de la medición de NE en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos fallan aleatoriamente. | 56 |

Resumen

En esta tesis se analiza y estudia el tráfico y la robustez de las redes de sensores inalámbricos con comportamiento complejo para su implementación y aportación en el diseño.

Las redes de sensores inalámbricos es un conjunto de sistemas que permiten monitorear, analizar y predecir diferentes fenómenos físicos a través de aplicaciones industriales, en ciudades inteligentes, comunicaciones móviles, gas y petróleo, entre otras.

El entender el comportamiento de la sociedad, naturaleza y tecnologías se puede lograr gracias al estudio de las interconexiones presentes en nuestra realidad, los esfuerzos se han realizado al elaborar modelos de redes simples que permiten visualizar estos comportamientos, pero con el avance de los datos y la información a través de la historia, se observa que no todo es tan simple como parece y que existen modelos de redes que se asemejan más a la realidad, como en el caso de las redes complejas cuyo comportamiento no es aleatorio sino que presenta comportamientos emergentes y cambiantes.

Dicho lo anterior, las redes de sensores inalámbricos conformados por diversas tecnologías inalámbricas permiten moldearse para crear redes que se interconecten tal como lo hacen diferentes sistemas de la realidad, permitiendo diseñarse sistemas que resulten eficientes a la hora de transmitir información y puedan ser resistentes a las fallas o ataques cibernéticos de hoy en día.

Por esto, es que en esta tesis se estudia el comportamiento de las RSI con comportamiento complejo para analizar sus métricas de desempeño en relación al tráfico, midiendo y simulando su probabilidad de transmisión exitosa, de colisión y ranura vacía, además de analizar estas redes cuando un nodo falla aleatoriamente o cuando los nodos con alto grado resultan inhabilitados por ataques maliciosos, todo esto para encontrar un punto de diseño y evaluar los escenarios donde se puedan implementar las RSI pero con comportamiento emergente.

Abstract

This thesis analyzes and studies the traffic and robustness of wireless sensor networks with complex behavior for its implementation and design contribution.

Wireless sensor networks are a set of systems that allow monitoring, analyzing and predicting different physical phenomena through industrial applications, in smart cities, mobile communications, gas and oil, among others.

Understanding the behavior of society, nature and technologies can be achieved thanks to the study of the interconnections present in our reality, efforts have been made to develop simple network models that allow visualizing these behaviors, but with the advancement of data and information throughout history, it is observed that not everything is as simple as it seems and that there are network models that are more similar to reality, as in the case of complex networks whose behavior is not random but presents emerging and changing behaviors.

That said, wireless sensor networks made up of various wireless technologies can be molded to create networks that are interconnected as do different systems of reality, allowing the design of systems that are efficient in transmitting information and can be resistant to failures or cyber attacks today.

For this reason, in this thesis we study the behavior of WSNs with different behaviors.

Introducción

Actualmente la mayoría de las decisiones se basan en la información obtenida a través de diversos sistemas que permitan monitorear aplicaciones como el tráfico y la infraestructura de las ciudades, monitoreo ambiental, seguridad, entre otras, con estos datos se pueden justificar decisiones económicas, políticas y de innovación en diferentes campos. Pero para llegar a este punto es necesario poder hacer un despliegue correcto de estos sistemas basados en diferentes parámetros tanto administrativos como de ingeniería.

Una de las aplicaciones más utilizadas para lograr obtener datos a partir de fenómenos físicos son las Redes de Sensores Inalámbricos (RSI), donde se interconectan muchas aplicaciones e innovaciones en temas de tecnologías inalámbricas, eficiencia energética, arquitectura, entre otros. Sin embargo, estos sistemas presentan dinamismo y características emergentes propias de las redes complejas.

Al analizar aplicaciones de RSI desde el punto de vista de la teoría de redes, se permite modelar interacciones no lineales, visualizar patrones y estructuras clave que podrían pasar desapercibidas, identificar nodos críticos que podrían afectar la estabilidad y seguridad de los sistemas, optimizar la eficiencia y la resiliencia para identificar configuraciones y diseños que permitan maximizar los recursos.

En esta tesis se estudia el desempeño de las redes de sensores inalámbricos desde el punto de vista de las redes complejas con dos métricas principales involucradas en la transmisión de información, la trayectoria promedio y la eficiencia de la red.

En el capítulo 1 se presentan las redes de sensores inalámbricos, las aplicaciones que han surgido en áreas interdisciplinarias, como las diferentes arquitecturas que se han implementado se pueden agrupar de acuerdo a sus características. Además, desde el punto de vista práctico también se describen las tecnologías inalámbricas disponibles para el despliegue en aplicaciones de largo alcance y bajo consumo energético y finalmente se revisan algunas técnicas de acceso aleatorio más comunes en ambientes inalámbricos.

En el capítulo 2 se describen las redes complejas y sus características que las hacen un tópico particular en la teoría de redes, también se presentan los modelos de redes complejas fundamentales enfocándose principalmente en el generado por Barabási y Albert, se discuten algunas métricas de desempeño en las redes complejas más comunes.

En el capítulo 3 se presentan los antecedentes relacionados con la generación y estudio de las RSI aplicando teoría de redes, describiendo el modelo del sistema que se utilizó para obtener una RSI con características equivalentes al modelo de

Barabási-Albert para posteriormente aplicar esto mismo pero a la medición del tráfico de la red. Con estos resultados se discuten escenarios y se validan estos resultados mediante simulación.

En el capítulo 4 se describen las investigaciones relacionadas al tema de la resiliencia y seguridad de las RSI con enfoque de redes complejas, se presenta el modelo del sistema que se utilizara para medir el impacto que una falla aleatoria y un ataque preferencial tienen en este sistema, para con los resultados obtenidos poder describir situaciones y comparaciones con una red simple.

Finalmente, en el capítulo 5 se concluyen resultados y futuro trabajo relacionado en esta área.

1. Redes de Sensores Inalámbricos

Diversas aplicaciones han surgido gracias a las tecnologías inalámbricas, tal es el caso de las redes de sensores inalámbricos, que permiten habilitar aplicaciones de gran impacto ambiental, económico y de calidad de vida, debido a la eficiencia en recolección de datos en tiempo real que con ello se puede llegar a una toma de decisiones informada.

En esta capítulo se explora en profundidad las redes de sensores inalámbricos, específicamente en las aplicaciones con más presencia hoy en día, la arquitectura, protocolos y técnicas de acceso aleatorio presentes en ellas, por lo que aquí se proporcionará una visión integral de este tipo de redes y la justificación para delimitar el trabajo a aquellas redes con nodos fijos y de alta densidad.

1.1. Redes de Sensores Inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos (RSI) son un tipo de red cuyos nodos tienen las características de contener unidades de procesamiento, dispositivos de comunicación inalámbrica y sensores que miden variables físicas como sonido, temperatura, presión, movimiento entre otros. Son pequeños y de bajo costo, y la información recopilada a través de ellos generalmente se usa para predecir, detectar o monitorear diferente información en aplicaciones como ciudades inteligentes, campos agrícolas, el cuerpo humano, entre otras. A continuación se presentan algunas de estas aplicaciones.

- Seguridad: Para la detección de intrusos, los autores en [5] emplean Sensores Acústicos y Sísmicos Desatendidos para capturar las actividades de soldados, permitiendo la detección de intrusos. La RSI registra y monitorea actividades como el manejo del equipamiento, el caminar, y la recarga de armas en ambientes controlados y en campo. A pesar de que el rango de detección puede ser limitada, los datos adquiridos son procesados para prever el contaminación en terrenos de baja visibilidad o de densa vegetación.
- Sistemas Biomédicos Asistidos: Los autores de [7] desarrollaron una plataforma de monitoreo con conectividad a internet para asistir a pacientes dentro de su hogar para poder detectar padecimientos y dar seguimiento a diagnósticos, por medio de "wearables." bio-sensores insertados quirúrgicamente. Ellos proponen un modelo híbrido con varios niveles de funcionalidad, integrando nodos fijos y móviles. Estos niveles van desde adquisición básica de datos hasta emergencias médicas, alertando a hospitales o centros de ayuda para la coordinación y el resguardo de la vida humana.
- Monitoreo de la calidad del Agua: El agua, el líquido tan vital para la existencia humana, se ha vuelto tema de estudio y de cuidado para la sociedad. Para el monitoreo de la calidad del agua, en [17], los investigadores han desarrollado un RSI para evaluar la calidad del agua. Su sistema llamado PipeSense, es un sistema de control del agua dentro de las tuberías que utiliza una WSN basada en la identificación por radiofrecuencia (RFID). Esta red es capaz de ofrecer información sobre la demanda de agua, su calidad y diversos detalles de mantenimiento, como puntos débiles o fugas en las tuberías. Los sensores RFID de las tuberías recogen datos del sistema y los transmiten a servidores de datos donde los algoritmos ayudan a tomar decisiones.

- Ciudades Inteligentes: En las áreas metropolitanas, la supervisión de diversos parámetros es esencial para el bienestar de los residentes. Las RSI ofrecen numerosas aplicaciones para proporcionar a las autoridades datos en tiempo real que garanticen el funcionamiento eficiente de una ciudad. En particular, el aumento de los desplazamientos de personas genera problemas e ineficiencias de tiempo, sobre todo cuando un número considerable de vehículos convergen en destinos compartidos. Las RSI pueden desempeñar un papel en la vigilancia para aliviar la congestión del tráfico, señalar las plazas de aparcamiento disponibles, etc. [29]

Actualmente se pueden encontrar muchas aplicaciones más de las RSI, a su vez, se demuestra que las RSI son un tema en constante desarrollo y aplicación, sin embargo, los diferentes tipos que se tienen presentan retos como la movilidad, la densidad de nodos, la cobertura de cada nodo, el ruteo de información, entre otros, por lo que en el presente trabajo se toman los nodos de sensores inalámbricos fijos y de alta densidad, tales como en las ciudades inteligentes, en redes de sensores industriales y otras aplicaciones más.

1.2. Arquitectura

Conocer los elementos de una red de sensores inalámbricos es importante para diseñar, desplegar y optimizar este tipo de redes en las aplicaciones que sean necesarias. Los principales componentes son:

Componentes Principales de las Redes de Sensores Inalámbricos

- **Sensor o nodo:** Este componente constará de múltiples partes fundamentales para la red, tales como el sensor, el cual convertirá los parámetros físicos a señales eléctricas que junto con el procesador y la memoria, convertirán esta información lista para poder ser transmitida al módulo de comunicación inalámbrica. El reto de diseñar o seleccionar estos dispositivos será en la capacidad de procesamiento que se desee y en la eficiencia energética necesaria para poder hacer todas estas tareas constantemente.
- **Estación base:** Este equipo dentro de las RSI sirve como una interconexión con otras redes dependiendo de la aplicación, y también es usado de nodos base para el procesamiento de las señales captadas por los sensores, contribuye enormemente a la eficiencia energética de los nodos (y de la red en general) y a disminuir la latencia generada por esta tarea.
- **Infraestructura Inalámbrica:** Actualmente se cuentan con diversas tecnologías inalámbricas que permiten la comunicación entre los sensores de acuerdo a la necesidad (potencia, distancia, cantidad de dispositivos, entre otros), por lo cual, seleccionar un protocolo y/o estándar de la industria permite integrarse al mercado competitivamente y poder interconectarse con demás productos o aplicaciones.
- **Visualización:** Como se mencionó al principio del capítulo, aplicaciones de monitoreo, alerta, administración, entre otros, permite que las RSI pueda utilizarse en muchos ambientes tanto industriales como empresariales, es ahí donde muchos profesionales del área de las tecnologías de información o de las tecnologías de operación necesitan que los datos recolectados por los sensores puedan manipularse y mostrarse para estadísticas o predicciones de cada área, por lo que integrar en las arquitecturas aplicaciones de manejo y visualización de datos son también una parte fundamental en la arquitectura de RSI.

Tipos de Arquitecturas

Para mejorar distintas métricas en las RSI es necesario conocer la distribución de los nodos y la forma en que la información es transmitida, de acuerdo en el enfoque que se le dé a cada red tenemos podemos hacer una clasificación de acuerdo con [6].

- **Centradas en datos** En este tipo de arquitectura, los nodos son desplegados y la información fluye a través de varios caminos, esto debido a que si un nodo necesita enviar información, se comunica con la red por medio de los nodos más cercanos, sin necesidad de identificarse con ellos. La ventaja en esta red es que no requieren sincronización, y el paquete puede llegar con más facilidad al viajar al mismo tiempo por diferentes rutas, sin embargo esto último ocasiona que en el nodo de destino, el paquete llegue duplicado además de ineficientar la energía de la red.

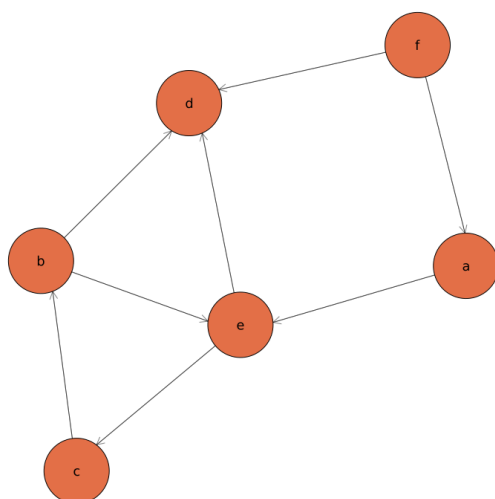


Figura 1: RSI con arquitectura centrada en datos, se muestra como un nodo puede recibir información al mismo tiempo y por caminos distintos.

- **Jerárquicas** Similiar a lo que pasa con las redes alámbricas como en centros de datos o internet, el acercamiento jerárquico es crear conjuntos de redes dentro de si mismos para comunicarse con nodos en la misma red pero en otro conjunto, a diferencia de la arquitectura centrada en datos, transferir información de un nodo a otro se logrará por medio de nodos específicos hasta llegar a la base.

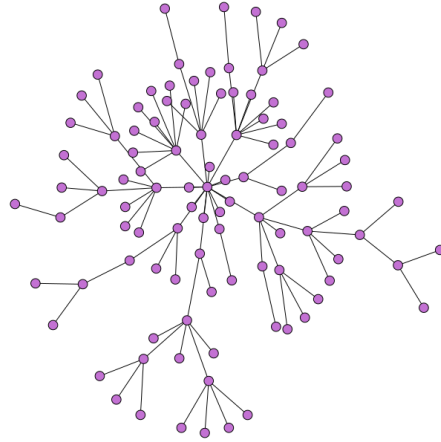


Figura 2: Figura que ilustra como los RSI se van generando en conjuntos y un nodo es el que va comunicando a través de otros conjuntos.

- **Basadas en posición** Para poder utilizar arquitecturas basadas en posición, es necesario obtener el dato geográfico donde están colocados los nodos, ya sea al momento de colocarlos o bien por medio de tecnologías de posicionamiento terrestre. El utilizar este tipo de arquitecturas beneficia ya que se eficiente la energía utilizada al poder calcular las trayectorias para transmitir la información, poder crear rutas redundantes que ayuden a la confiabilidad y mejora la escalabilidad la red.
- **Heterogéneas** Con el desarrollo actual de las diferentes tecnologías, productos, soluciones y normas, es posible que al diseñar una RSI se pueden utilizar diferentes tipos de nodos, por ejemplo, limitados en energía, potencia, cobertura y a su vez poder utilizar nodos con alto procesamiento de información, nodos fijos o nodos móviles. Con esto en mente, una arquitectura heterogénea debe de considerar los recursos disponibles en los nodos y hasta modificar las prioridades de la comunicación en cada etapa de la trayectoria.

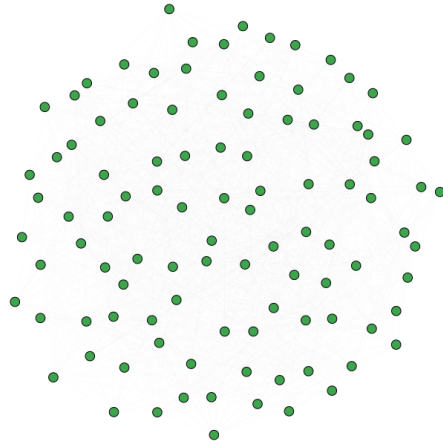


Figura 3: Se muestra como los nodos están distribuidos geográficamente.

1.3. Tecnologías Inalámbricas

Debido al planteamiento del estudio de las redes de sensores inalámbricos analizadas en esta tesis y de las aplicaciones que se realizan principalmente en (aunque no se limitan) grandes áreas geográficas y con una alta densidad de nodos, es importante conocer las tecnologías de Comunicaciones de Largo Alcance y Baja Potencia (LPWA por sus siglas en inglés) que ofrece una amplia cobertura, bajo consumo de energía y bajo costo.

Para poder alcanzar los beneficios mencionados se diseñan las tecnologías de acuerdo con [21]; para largo alcance, llegan a utilizarse bandas Sub-1GHz ya que se encuentran menos congestionadas y presentan menor atenuación y son robustas frente a los desvanecimientos multitrayectoria causados por las superficies sólidas. Otro aspecto es la utilización de diferentes técnicas de modulación para habilitarse aplicaciones en áreas rurales y urbanas. Las modulaciones de banda angosta (narrowband) codifican las señales en bandas muy pequeñas, eficientando la utilización del espectro y reduciendo el ruido. Por otro lado, la técnica de espectro disperso beneficia debido a que dispersa la señal en señales con bandas más extensas pero con la misma densidad de potencia utilizando secuencias ortogonales para que en la detección se decofinquen concurrentemente, algunos estándares como Chirp Spread Spectrum (CSS) y Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) son usados en tecnologías como LoRa y RPMA. Para bajo consumo energético

se utilizan diversas topologías dependiendo de la aplicación ya sea en malla, estrella o árbol, por medio de conectar todos los dispositivos, usar algunos nodos como concentradores o bien conectarse directamente a la estación base son algunos ejemplos de esto. Otro punto importante en la forma en que el ciclo de trabajo (o tiempo activo) de cada nodo puede programarse ya sea para cuestiones legislativas, medio ambientales y de eficiencia energética. Por otro lado, el uso de diferentes técnicas de acceso al medio como CSMA/CD (del inglés Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) o bien, el ampliamente utilizado en LPWA y en las redes estudiadas en el presente trabajo, el protocolo ALOHA, donde simplemente los nodos transmiten sin sensar el medio para mantener el diseño de los transceivers sencillo y de bajo costo, utilizado en tecnologías como SigFox y LoRaWAN. Otro protocolo como el Acceso Multiple por División de Tiempo (TDMA en inglés) basado en MAC es considerado por Ingenu y NB-IoT. Para mantener el menor costo posible, reducir la complejidad del hardware utilizando los puntos anteriormente mencionados, reducir la infraestructura necesaria basandonos en las topologías y utilizar bandas de licencia libre, son puntos importantes en el estudio de esta tesis y en las redes LPWA en general.

Algunos estándares que forman parte de las redes LPWA de acuerdo con [26] son

- IEEE 802.11ah: El estándar 802.11ah es una tecnología que permite la implementación de redes inalámbricas de gran cobertura debido a características como su operación en la banda Sub-1GHz, que permite una mayor penetración a través de obstáculos, el uso de OFDM y OFDMA en la modulación y en el acceso multiple permite aumentar la eficiencia espectral, la resistencia a interferencias y la capacidad de la red. El estándar incluye un modo de baja potencia en el que el ciclo de trabajo se reduce cuando no se detecten transmisiones o recepciones, permite usar topologías tipo malla para prolongar aun mas la cobertura para que dispositivos se conecten directamente entre si y finalmente es compatible con redes WLAN convencionales, por lo que puede integrarse fácilmente a infraestructuras WLAN existentes [25].
- IEEE 802.15.4k: Este es una enmienda del estándar 802.15.4 para ofrecer un rango de cobertura extendido y baja potencia. aqui se propone utilizar modulaciones en fase y frecuencia (PSK y FSK por sus siglas en inglés) para mejorar le eficiencia espectral y la resistencia a la interferencia, añadiendo técnicas de transmisión adaptativas para poder operar en diferentes condiciones de canal. Soporta topologías en malla pero optimizan el funcionamiento

por medio de una distribución eficiente del tráfico de datos, robustez en entornos dinámicos y permitir una alta densidad de dispositivos. Al ser basado en el estándar IEEE 802.15.4, permite mejorar la capa física por medio de una mayor frecuencia operativa, mayor sensibilidad y una mayor mitigación de interferencias. Cabe mencionar que el estándar es retrocompatible con versiones anteriores, permitiendo una reducción de costos en redes con este estándar existente [21].

- **Ingenu RPMA:** Es una tecnología patentada por Ingenu. RPMA utiliza una técnica de acceso aleatorio única llamada Acceso Múltiple de Fase Aleatoria (RPMA por las siglas en inglés), la cual permite que múltiples dispositivos transmitan simultáneamente en el mismo canal sin interferencia mutua, lo hace mediante una combinación de modulación en amplitud y de fase para maximizar la eficiencia espectral y la confiabilidad. RPMA opera sobre la banda no licenciada de 2.4 GHz lo que hace reducir los costos asociados a los despliegues. Además, este estándar está diseñado para minimizar el consumo de energía mediante algoritmos de ahorro de energía y técnicas de gestión de potencia. Para protección de datos incorpora redundancia y técnicas de corrección de errores en cada transmisión, mediante transmisiones en múltiples frecuencias y retransmisión de paquetes perdidos. Para fines prácticos, Ingenu RPMA proporciona herramientas avanzadas de gestión de red que permite la monitorización, configuración y actualización remota de los dispositivos de una red con RPMA, disminuyendo costos, aumentando escalabilidad y facilitando el mantenimiento [1].
- **Sigfox:** Entre las tecnologías LPWA se puede encontrar a Sigfox, dentro de lo que se destaca esta tecnología inalámbrica es la utilización de la modulación de ultra banda ancha (UNB del inglés Ultra Narrow Band), lo que hace que opera con baja potencia una banda extremadamente estrecha, logrando largo alcance. Al igual que otros estándares, Sigfox opera en la banda de Sub-gigahertz. Para alcanzar bajo consumo de potencia, su comunicación es unidireccional, simplificando el diseño pero añadiendo mecanismos como cifrado de extremo a extremo y autenticación de dispositivos, además se optimiza la transmisión mediante el envío de pequeños paquetes de hasta 12 bytes [2].
- **LoRaWAN:** Por medio de la modulación patentada de LoRa basada en chirp spread spectrum (CSS) logra una alta resistencia a las interferencias y mayor penetración de obstáculos. LoRaWAN ofrece la implementación por medio

de topologías de red estrella o estrella extendida, y gracias a estas topologías es que se ofrecen tres clases de dispositivos; los clase A tiene un consumo de energía más bajo ya que solo le está permitido comunicarse con estaciones base en tiempos específicos, los clase B y C ofrecen características adicionales como sincronización y recepción, pero aumentan su consumo de energía. Para lograr comunicaciones seguras, LoRaWAN incorpora mecanismos como encriptación de extremo a extremo, autenticación, entre otros, y al igual que RRPMA, ofrece plataformas de administración y monitoreo para una mejor experiencia y visualización de la red [10].

- NB-IoT: Se basa en el reutilizamiento de los sistemas LTE, para permitir un fácil y flexible despliegue en las infraestructuras existentes y permitir su coexistencia con las nuevas tecnologías. NB-IoT utiliza subportadoras estrechas en la banda de frecuencia licenciada (por ejemplo, 200 kHz), lo que permite una eficiente utilización del espectro y una mejor inmunidad al ruido. Además, utiliza una modulación específica, como la modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying) o QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), para la transmisión de datos, lo que mejora la robustez de la señal en entornos ruidosos. Para el acceso múltiple utiliza el esquema de acceso múltiple por división de frecuencia (en inglés, FDMA) que junto a su modulación hace posible que diferentes dispositivos puedan transmitir datos en diferentes subportadoras simultáneamente, aumentando la eficiencia espectral. Una cualidad importante es su despliegue en tres formas; la forma "en banda" utiliza un bloque del ancho de banda de LTE, en el modo de "banda de guarda" se opera en un bloque de las bandas de separación sin usar de LTE y el modo independiente utiliza el espectro del sistema global para comunicaciones móviles (GSM), al tomar 180 KHz de la portadora de 200 KHz de GSM, con 10 KHz de separación en cada extremo [13].

1.4. Técnicas de Acceso Aleatorio

El desarrollo de las comunicaciones inalámbricas nos ha presentado diferentes formas de poder resolver los problemas de las colisiones y la eficiencia del espectro es por eso que algunas técnicas de acceso aleatorio comunes de acuerdo con [9] son presentadas a continuación.

- **ALOHA:** Este protocolo permite que múltiples usuarios compartan un medio de transmisión de manera asíncrona y sin espera, enfocado principalmente a entornos de comunicaciones de datos de baja velocidad y baja prioridad, por lo que su uso puede ser limitante pero a la vez atractivo por su bajo costo de elaboración y despliegue. Es el protocolo de acceso aleatorio más simple donde los nodos transmiten la información inmediatamente sin algún tipo de observación del canal, lo que lo lleva a tener una tasa de transmisión exitosa del **18.4 %**, la cual es la capacidad del canal de ALOHA puro. Existe una variación de este protocolo que reduce el intervalo de colisión y aumenta la capacidad al **36.8 %**.
- **CSMA:** Implementado en tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee, el protocolo de acceso múltiple con detección de portadora (del inglés, CSMA) se basa en la observación del estado del canal antes de iniciar la transmisión. El proceso principal es que los nodos escuchen la portadora para detectar actividad en el medio, si no se encuentra alguna transmisión, el nodo envía la información, de lo contrario, esperará un tiempo aleatorio antes de intentarlo para disminuir las colisiones. Para optimizar el protocolo, se han implementado adaptación de parámetros como el tiempo de espera, el umbral de sensibilidad y algoritmo de backoff para adaptarse a las condiciones de la red y maximizar el rendimiento del sistema en términos de throughput, latencia y eficiencia energética. Sin embargo, CSMA presenta limitaciones en entornos de alta latencia, alta congestión del canal, o bien, puede encontrar obstáculos cuando la densidad de nodos aumenten.
- **OFDMA:** Actualmente de los protocolos de acceso al medio más utilizados en tecnologías como 5G, LTE, Wi-Fi 5, entre muchos otros más, el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA en inglés) divide el ancho de banda de frecuencia disponible en múltiples subportadoras ortogonales las cuales se asignan de manera dinámica a diferentes usuarios o flujos de datos, lo que aumenta la eficiencia y permite una alta densidad de dispositivos, además la asignación se hace de forma dinámica de acuerdo

con las condiciones de la red y las demandas de tráfico. Cada subportadora se modula utilizando técnicas de modulación como QPSK, 16-QAM o 64-QAM. Utiliza técnicas de cancelación de interferencias para mitigarlas entre subportadoras adyacentes. Sin embargo OFDMA puede ser más susceptible al ruido, dentro del diseño se encuentran encabezados de control que pueden consumir ancho de banda y energía.

Como se presentó en este capítulo, las redes de sensores inalámbricos se encuentran en muchas aplicaciones en diversas áreas, pero lo que habilita estas aplicaciones es el diseño y el caso de uso que se le da a la red. En el próximo capítulo se desarrollará el porque aplicaciones como las RSI utilizando tecnologías LPWA caen dentro de lo que se denominan redes complejas.

2. Redes Complejas

Como se desarrolló en el capítulo anterior, las redes de sensores inalámbricos poseen características especiales que permiten aprovechar diferentes recursos para lograr las aplicaciones deseadas en múltiples campos, una de ellas es la topología que pueden tomar, partiendo del hecho que mover la información es una tarea importante dentro de cualquier red, por lo que en este capítulo se estudiará los fundamentos de las redes complejas y simples, sus aplicaciones, las métricas que se encuentran ligadas a la ciencia de redes y qué resulta tan importante dentro del modelo de Barabási-Albert en las redes del mundo real.

2.1. Redes Complejas

Definamos una red (en ocasiones llamado grafo) G como una estructura de datos que consiste de N nodos conectados por medio de L enlaces. La cantidad de nodos conectados a un nodo j lo llamaremos grado del nodo k_j , además, bajo esta premisa se tiene que

$$\sum_{j=1}^N k_j = 2L \quad (1)$$

Para cualquier tipo de redes. Esto indica que la suma de los grados de la red, al contar con una trayectoria de A a B y viceversa, tenemos que equivale al doble de los enlaces de la red, y el promedio de grado sería sencillamente $k_a = 2L/N$. Con estas observaciones podemos mostrar diferentes tipos de redes que se interconectan para dar lugar a interesantes topologías ya sean regulares, aleatorias o de escalamiento libre.

A continuación se muestran algunos sistemas que exhiben el comportamiento de redes complejas

- **Internet:** Se puede catalogar como una red compleja debido a la cantidad de nodos y su autoorganización para dinámicamente enrutar y transmitir datos de manera eficiente, además, su resiliencia y tolerancia a fallos junto con la evolución temporal hacen al internet parte de las aplicaciones del mundo real de las redes complejas. [4]
- **Redes Móviles:** Debido a la infraestructura descentralizada, escalable y autónoma de las redes celulares, junto con la dinámica en la formación de enlaces que provocan que la cantidad de enlaces se concentren en pocos nodos son un claro ejemplo de las características que identifican a las redes celulares como una red compleja, además que su evolución y la forma en que los protocolos existentes dan autonomía a los equipos a la hora de funcionar en conjunto en cualquier zona geográfica.[23]
- **Redes Vehiculares:** La dinamicidad en la que se ve expuesta la infraestructura de las redes vehiculares ad hoc (VANET) exhiben características de topología cambiante y adaptativa, donde los sensores de los vehículos actúan como nodos en la red que intercambian información sobre el tráfico, condiciones del camino y emergencias. Además al igual que en las redes móviles, factores como el ancho de banda y la velocidad de movimiento añaden complejidad a este tipo de aplicaciones.[20]

Las redes pueden tomar cualquier topología, pero las principales características de las redes complejas por las que son tratadas como un tema aparte dentro de la ciencia de redes es que tienen propiedades no triviales y emergentes, los nodos no están conectados de forma aleatoria, la distribución del grado tiende a observar nodos más conectados que otros formando agrupamientos densamente conectados. Con esto en mente y las aplicaciones mencionadas anteriormente, es por lo que en este trabajo se estudian las redes complejas ya que exhiben un comportamiento más aplicable en diversos sistemas reales.

2.2. Modelos Fundamentales de las Redes Complejas

- Erdos-Renyi (ER) El modelo Erdos Renyi supone una red $G_p(N)$ con N nodos y L enlaces que se formaran a partir de una probabilidad p , es decir, cada nodo formara enlaces equiprobables a los demas nodos. Este tipo de redes aunque es parte de los modelos fundamentales de las redes complejas, suele tener la propiedad de ser estadísticamente regular o bien, ser una red simple. Otra característica importante es que este tipo de redes suelen ser descritas en su totalidad por su grado promedio [8].

La distribución de grado de éste tipo de redes puede verse desde la perspectiva de que el modelo es un experimento de Bernoulli con $N - 1$ eventos independientes. Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad del grado de un nodo arbitrario en una red tipo $G_p(N)$ es

$$P[k_i = k] = C_k^{N-1} p^k (1 - p)^{N-1-k} \quad (2)$$

donde p^k son los casos donde los k nodos lograron conectarse con probabilidad p , $(1 - p)^{N-1-k}$ es la probabilidad complementaria y C_k^{N-1} es la forma en que pueden tomarse k enlaces del número total de enlaces posibles $N - 1$. A su vez, para $N \rightarrow \infty$ podemos aproximar a una distribución de Poisson

$$P[k] = e^{-pN} \frac{(pN)^k}{k!} \quad (3)$$

donde finalmente podemos observar que el grado promedio tiene la forma $E[k] = pN$.

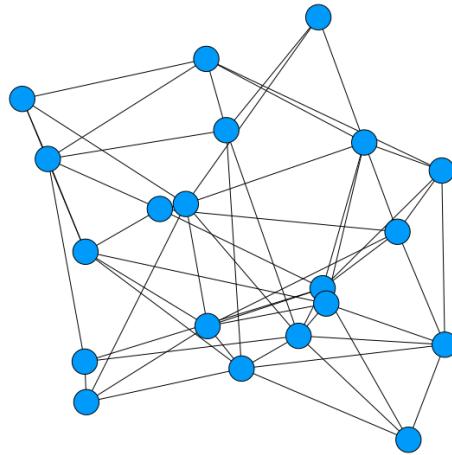


Figura 4: Red de Erdos Renyi con $N = 20$ y $p = 0.3$

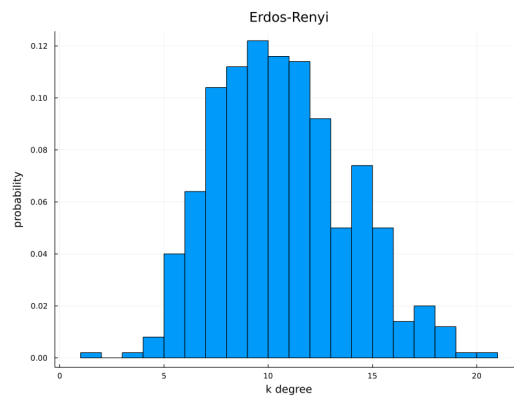


Figura 5: Función de densidad de probabilidad de una red Erdos Renyi con $N = 500$ y $p = 0.02$

■ Watts-Strogatz (WS)

El modelo de Watts-Strogatz marca otra característica importante sobre las redes del mundo real. Basado en los trabajos de Milgram y su artículo "Seis grados de separación"[27], se propuso un modelo donde la distancia entre nodos era pequeña pero además, la probabilidad de que nodos que conectan a un mismo nodo estén conectados entre sí, sea pequeña. Los pasos para la construcción de una red de esta naturaleza son:

- Sea una red regular (con topología definida, ejemplo, un anillo) con N nodos los cuales están conectados a sus primeros K vecinos, obteniendo así una red totalmente conectada.
- Cada enlace se volverá a reconectar con una probabilidad β , haciendo que las conexiones previamente establecidas puedan cambiar y conectarse a distintos nodos.

A diferencia de la red tipo ER, una red tipo WS logra un mayor coeficiente de agrupamiento, el cuál será discutido más adelante, pero en pocas palabras, que exista una mayor interacción entre nodos que se conecten a un nodo común.

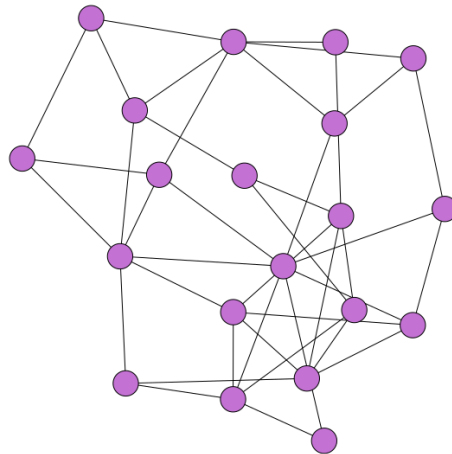


Figura 6: Red de Watts Strogatz con $N = 20$, $k = 0.4$ y $\beta = 0.3$

Se ha observado la evolución natural de los modelos, donde empezamos con un modelo aleatorio con largas distancias, después un modelo que empieza

con una estructura inicial y acorta las distancias y el promedio de los nodos y finalmente una red con un grafo inicial que se conectará aleatoriamente de acuerdo a la cantidad de nodos conectados a el, manteniendo la estructura aleatoria pero con un modelo de mundo pequeño.

2.3. Redes de Escalamiento Libre

Las redes de escalamiento libre o también conocidas como el modelo de Barabási-Albert, fueron propuestas en 1999 como resultado del análisis de las relaciones en una red de actores, la World Wide Web y una red de energía eléctrica [3]. Con el desarrollo de la tecnología y el almacenamiento de la información, se pudo desarrollar la teoría detrás de diversos tipos de redes las cuales no coinciden con el modelo de Erdos-Renyi ni con el modelo de Watss-Strogatz. Las diferencias respecto a estas redes son: en los primeros modelos, la cantidad de nodos era fija, en contraste a las redes reales que tienden a añadirse más nodos cada determinado tiempo. Las redes reales no presentan una unión uniforme hacia otros nodos, de hecho, un actor más famoso tiende a aparecer en más películas lo que lleva a actuar con una mayor diversidad de actores, una página de internet (contemporáneamente una red social) tiende a tener mayores visitas y es por ello que se monetiza la publicidad, pues de estos nodos con mayor popularidad tienden a unir a otras páginas menos populares pero en mayor cantidad. Dadas estas diferencias, una red de escalamiento libre presenta dos características fundamentales:

1. Crecimiento: Se tiene una red con m_o nodos iniciales conectados aleatoriamente, en cada intervalo de tiempo, un nuevo nodo i que formará $m (\leq m_o)$ nuevos enlaces con los nodos presentes en la red inicial.
2. Unión preferencial: Para poder seleccionar al nodo al que habrá que conectarse, se hará por medio de su grado. Por lo que, la probabilidad de conectarse a un nodo i es

$$P_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (4)$$

donde k_i es el grado del nodo y $\sum_j k_j$ es la suma de los grados de todos los nodos.

Para obtener la distribución de grado de una red de escalamiento libre partiremos de la ecuación que gobierna la tasa de cambio de un nodo i ingresado a la red en un tiempo $t_i < t$.

$$\frac{\partial k_i(t)}{\partial t} = m \frac{k_i}{2mt + 2m_o} \quad (5)$$

cuya solución es

$$\ln \frac{k_i(t)}{k_i(t_i)} = \int_t^{t_i} \frac{m}{2mu + 2m_o} du = \frac{1}{2} \frac{2mt + 2m_o}{2mt_i + 2m_o} \quad (6)$$

dado que la red inicial m_o es pequeña cuando $t \rightarrow \infty$ y que $k_i(t_i) \simeq m$ por lo tanto, el grado de un nodo en un tiempo t es

$$k_i(t) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Ahora, para obtener la función de densidad de probabilidad de la distribución, tenemos que

$$Pr[k_i \leq k] \simeq Pr \left[m \sqrt{\frac{t}{t_i}} \leq k \right] = Pr \left[\frac{m^2}{k^2} t \leq t_i \right] \quad (8)$$

y la probabilidad que un nodo i sea añadido en un tiempo $t \leq x$ es

$$P[t_i \leq x] = \frac{x}{N} \quad (9)$$

por lo tanto

$$Pr[k_i(t) \leq k] \simeq 1 - \frac{\frac{m^2}{k^2} t}{t + m_o} \quad (10)$$

Se sabe que $Pr[k_i(t) = k] = Pr[k_i(t) \leq k] - Pr[k_i(t) \leq k - 1]$. Finalmente

$$Pr[k_i(t) = k] \simeq \frac{m^2 t}{t + m_o} \left(\frac{1}{(k-1)^2} - \frac{1}{k^2} \right) \approx \frac{2m^2}{k^3} \quad (11)$$

De aquí se observe que el modelo de escalamiento libre presenta una caída exponencial con exponente $\tau = 3$, sin embargo, en redes reales se ha contrado que el exponente puede variar de $2 \leq \tau \leq 3$.

Este tipo de redes al ayudar a modelar las relaciones que existen en la naturaleza se necesita cuantificar algunas de sus propiedades de las cuales se hablará en la siguiente sección.

2.4. Métricas de Redes

Al aplicar una red compleja a una red de comunicaciones como se realiza en el presente trabajo, es importante poder medir el desempeño, optimizar y diseñar, por lo que se tratarán algunas de las métricas más importantes y los métodos utilizados en estas.

2.4.1. Trayectorias y Caminatas

En los sistemas de comunicaciones actuales, el poder transmitir información a través de dispositivos interconectados es un problema en el que se aplican métodos de enrutamiento. Actualmente, algunos de los protocolos más conocidos en la Internet para la interconexión de redes son el protocolo OSPF y el BGP. Pero definir como se realizará el envío más eficiente tiene que ver con por cuantos nodos un paquete pasará (también llamados saltos). Es por eso que se definen dos conceptos en las métricas donde la longitud de estos saltos está presente.

- **Trayectoria:** Una trayectoria es el camino que un paquete realiza de un nodo A a un nodo B sin repetir los nodos por los que pasa. Poder describir la cantidad de trayectorias posibles en una red totalmente conectada puede tender a ser complicado, pero una imagen mental la podemos obtener a partir de un grafo con topología de árbol, donde del nivel más alto hacia las hojas más alejadas, tiende a ser mucho más fácil de describir.
- **Caminata:** Una caminata es aquella donde el camino que recorre la información de una fuente A a un nodo B puede pasar por una serie de nodos sin importar si ya se ha pasado antes.

Con estos se puede definir una primera métrica conocida como el diámetro de la red, el cual equivale a la máxima longitud de las trayectorias más cortas.

2.4.2. Conectividad y Robustez

Una red se puede clasificar como conectada si existe al menos una trayectoria entre cada par de nodos, y si no existe, la red se encuentra desconectada. En una red G la conectividad se observa desde dos puntos: una se relaciona a la mínima cantidad de nodos que se requieren para desconectar a G , denotada por $\kappa(G)$ y la otra perspectiva es por la mínima cantidad de enlaces que dejando de existir desconectarían la red, denotada por $\lambda(G)$. De acuerdo con Van Mieghem (2011) estas cantidades se relacionan por

$$\kappa(G) \leq \lambda(G) \leq k_{min}(G) \quad (12)$$

donde $k_{min}(G)$ se refiere al grado minimo de la red G .

Con esto en mente, el objetivo es describir el diseño de una red confiable que a pesar de fallas en nodos o enlaces, la conectividad no se vea afectada, por ello, si tomamos el grado promedio de una red como $\kappa(G) \leq k_a = 2L/N$ esto indicaría que para alcanzar un grado mayor de robustez, la red podría contener enlaces redundantes que impidan la desconexión.

2.4.3. Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra es un algoritmo de búsqueda de camino más corto en un grafo con pesos no negativos. Su objetivo es encontrar la ruta más corta desde un nodo de origen a todos los demás nodos del grafo.

El algoritmo comienza asignando una distancia de 0 al nodo de origen y una distancia infinita a todos los demás nodos. A continuación, se elige el nodo con la distancia mínima y se actualizan las distancias de los nodos adyacentes no visitados. Si la distancia desde el nodo actual hasta un nodo adyacente es menor que su distancia actual, se actualiza la distancia del nodo adyacente. Este proceso se repite hasta que se han visitado todos los nodos o se ha llegado al nodo de destino.

El algoritmo de Dijkstra es ampliamente utilizado en aplicaciones de redes, como enrutamiento de paquetes en Internet y en la optimización de rutas en sistemas de transporte. También se ha utilizado en campos como la biología computacional y la optimización de procesos industriales. Con el algoritmo 1 se ilustra por medio de un pseudocódigo.

2.4.4. Longitud de Trayectoria Promedio

Esta métrica resulta de obtener el promedio de enlaces que deben ser atravesados para llegar de un nodo a otro.

En una red, al encontrarse varios nodos interconectados y a su vez existir diferentes caminos para llegar de un punto a otro, la longitud de la trayectoria se define por el camino mas corto que los conecta. Es entonces que la longitud de la trayectoria promedio es calculada mediante el promedio de estos caminos mas cortos en cada par de la red.

Para una red, la longitud de trayectoria promedio (L) es calculada como:

Algorithm 1 Algoritmo de Dijkstra

```
1: Inicializar conjunto de nodos no visitados  $Q$ 
2: Inicializar distancia desde el nodo inicial  $S$  hasta cada nodo como  $\infty$ 
3: Inicializar distancia desde el nodo inicial  $S$  hasta él mismo como  $0$ 
4: Crear un conjunto vacío  $S$  para almacenar los nodos visitados
5: while  $Q$  no esté vacío do
6:   Seleccionar el nodo  $u$  de  $Q$  con la distancia más corta
7:   Agregar  $u$  a  $S$ 
8:   for all vecinos  $v$  de  $u$  do
9:     if  $v$  no está en  $S$  then
10:      Calcular una nueva distancia tentativa  $d$  para  $v$ 
11:      if  $d$  es menor que la distancia actual almacenada para  $v$  then
12:        Actualizar la distancia de  $v$  como  $d$ 
```

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d(i, j) \quad (13)$$

Donde N representa el numero total de nodos en la red y $d(i, j)$ refiere a la longitud del camino mas corto entre los nodos i y j .

2.4.5. Eficiencia de la Red

La Eficiencia de una red es importante en el estudio del desempeño de las redes debido a que nos indica que tan efectivamente la red utiliza sus recursos para la transmision de informacion. Para definir esta medida E se tomará que la eficiencia es inversamente proporcional a la distancia entre i y j ya que si una distancia es demasiado grande, no se está encontrando el camino más corto por lo que los recursos no serán aprovechados eficientemente, para obtenerlo tomamos:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d(i, j)} \quad (14)$$

2.4.6. Coeficiente de Agrupamiento

Esta metrica ayuda a conocer el nivel de interaccion que existe alrededor de un nodo en una red. Para describirlo basta con conocer el numero de enlaces Z entre los vecinos n_k de un nodo k sobre la cantidad posible de enlaces $n_k(n_k - 1)/2$

$$c_G(k) = \frac{2z}{n_k(n_k - 1)} \quad (15)$$

A su vez, esta métrica nos ayuda a conocer el estado de interacción global de una red, al promediar los coeficientes de agrupamiento.

$$C_G = \frac{1}{N} \sum_1^N c_G(k) \quad (16)$$

El valor de C_G nos puede indicar la tendencia de la topología de la red, si $C_G = 1$ los nodos de la red tienen una interacción completa al tener enlaces por cada par de nodos presentes (también conocida como una red totalmente conectada) y si $C_G < 1$ la red tendrá más nodos con pocos enlaces, por lo que tenderá a acercarse a una topología tipo árbol.

2.5. Algoritmo de generacion para una red de escalamiento libre

Para generar una red de escalamiento libre, tal como se describió en la seccion 1.2, se debe de tener en cuenta: 1) Una red inicial de tamaño m_0 2) cada nuevo nodo en la red generara m conexiones nuevas y 3) se conectará a los nodos con una probabilidad que dependerá del grado del nodo. Esto se explica en el algoritmo siguiente.

Algorithm 2 Modelo de Barabási-Albert

- 1: Crear un grafo inicial con m_0 nodos y sin aristas
 - 2: **for** $i = m_0 + 1$ hasta n **do**
 - 3: Agregar el nodo i al grafo
 - 4: Elegir $m \leq m_0$ nodos existentes en el grafo de manera proporcional a su grado
 - 5: **for** cada nodo j elegido **do**
 - 6: Agregar una arista entre el nodo i y el nodo j
-

En la figura 7 se muestra una comparativa entre el modelo analítico y una simulación del comportamiento de la red tipo Barabási-Albert. La diferencia entre el caso real y el analítico radica en la cantidad de nodos que hay en la red, en las simulaciones se generaron 10000 nodos, por lo que encontrar a nodos con alto grado se limitará de acuerdo a la cantidad de nodos totales en la red, esto es que los nodos con grados muy altos tienden a tener baja probabilidad de aparecer.

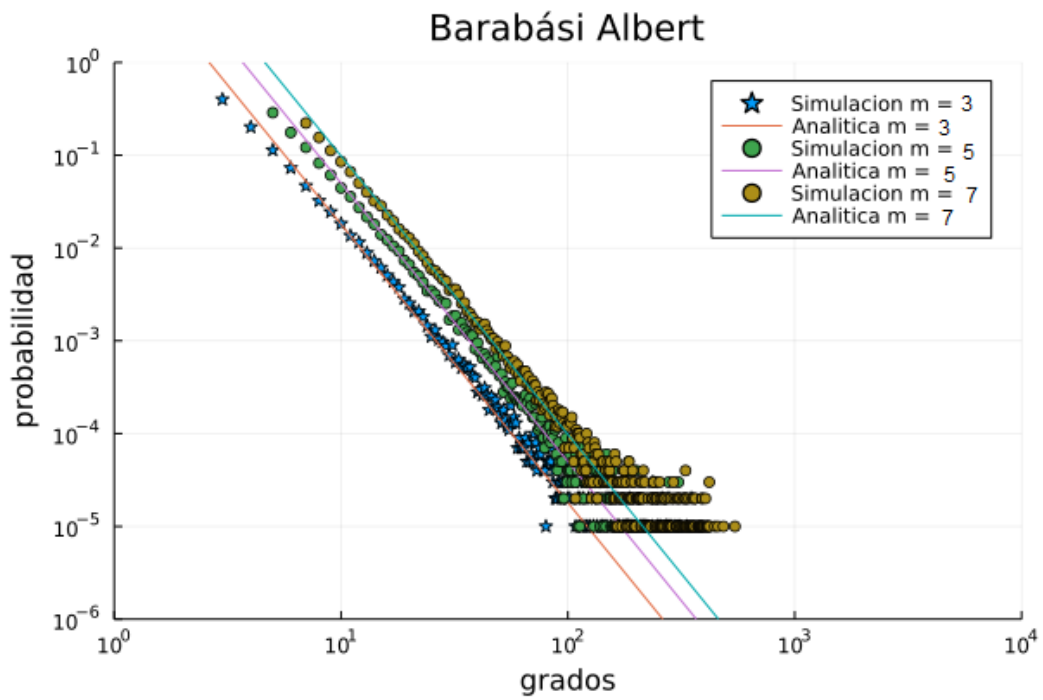


Figura 7: Función de densidad de probabilidad de una red de escalamiento libre analítica y simulada con $m = 3, 5$ y 7 .

3. Tráfico en Redes de Sensores Inalámbricos con Escalamiento Libre

En el presente capítulo se comentan algunas investigaciones recientes sobre el comportamiento del tráfico en redes de sensores inalámbricos bajo distintos protocolos que eficientan los recursos inalámbricos. Posteriormente se muestra el modelo del sistema propuesto en esta tesis además de analizar las métricas de la longitud de trayectoria promedio (APL) y la eficiencia de la red (NE) de acuerdo a la relación entre el área total y el área de cobertura de cada nodo.

3.1. Trabajo Relacionado

El análisis de tráfico en las Redes de Sensores Inalámbricos es usado para [30] proponer un nuevo protocolo MAC que mejore el desempeño por medio de la variación de los ciclos de trabajo mientras los nodos se encuentran en periodos de alto o bajo tráfico. En ocasiones, el tráfico resulta ser crítico en diversas aplicaciones, como en las de tipo industrial, en [24] es donde se propone un protocolo MAC para usar el ancho de banda de tráfico que no es crítico cuando aparezca tráfico de mayor importancia. En [12] se diseña un protocolo con control de taza para poder manejar tráfico elástico como inelástico en redes de sensores, con el estudio del tráfico de la clase FIFO, se desarrolló un esquema de distribución de recursos para mejorar el ancho de banda usado en redes inalámbricas [31]. Conocer el tráfico de las RSI también ayuda en eficientar la potencia en cada sensor y aprovechar el ruteo de los paquetes aumentando el QoS de este tipo de redes, como se realizó en [16], además, tomando en cuenta que diversas RSI necesitan diferentes requerimientos como baja latencia y alta integridad de los datos, el tráfico se analizó para proponer un esquema de ruteo basado en el concepto de potencial [15].

3.2. Modelo del sistema

Sea un área de radio r_{BS} con una red G_0 de tamaño mayor a m y los nodos pertenecientes a esta red tendrán grados distintos de cero. Cada instante de tiempo t un nodo se va agregando al área geográfica y reconocerá a sus vecinos ya que los nodos dentro del radio de cobertura del nuevo nodo comparten su ubicación y su grado, por lo que cada nodo que ingrese al área tendrá que formar al menos m conexiones. La forma en que cada nodo se conecta a los demás dependerá del grado de los vecinos. El desarrollo en cada etapa se muestra con las figuras 8, 9, 10 y 11.

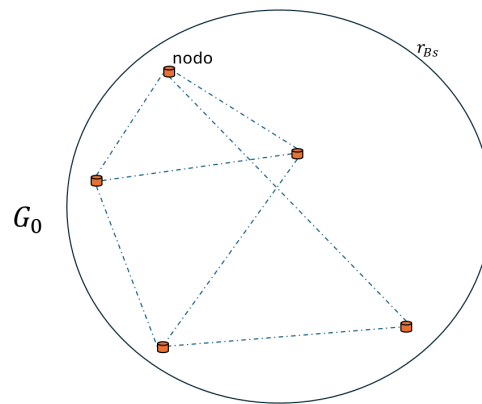


Figura 8: Red inicial en el modelo del sistema.

Con el pseudocódigo 3 se propone la forma en que la red fué simulada

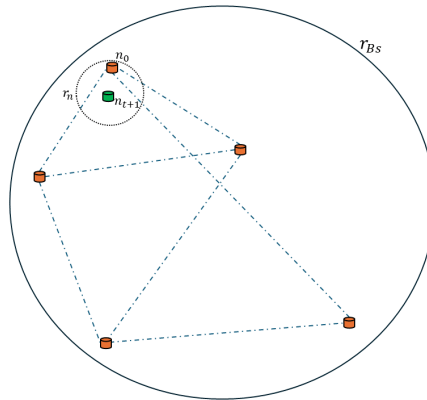


Figura 9: Conexión de un nuevo nodo en la red inicial, se observa como se forzan las m conexiones a pesar de que no todos los nodos se encuentren en su cobertura.

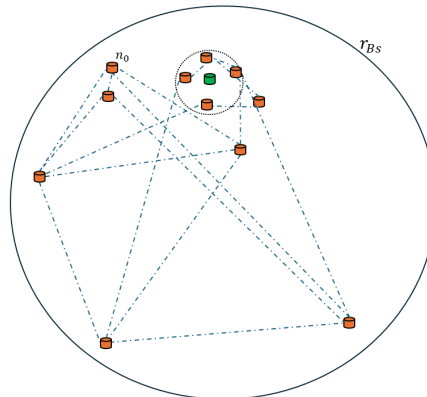


Figura 10: Conexión de un nuevo nodo después de n nodos, aquí al haber mayor presencia de nodos dentro del radio de cobertura, se logra apreciar que las conexiones se mantienen en la cobertura.

3.3. Algoritmo de Generación y Medición del Tráfico

Con la red establecida como se mencionó en la sección anterior se procede a explicar la generación de tráfico. Utilizando la perspectiva de un solo nodo, se encuentra que dentro de su radio de cobertura r_n existen nodos a los que se encuentra conectado y nodos a los que no. En un instante de tiempo los nodos generan paquetes para transmitir con probabilidad τ , bajo el modelo básico de ALOHA, todos los nodos que necesiten enviar un paquete lo hacen con esa probabilidad. Tomando

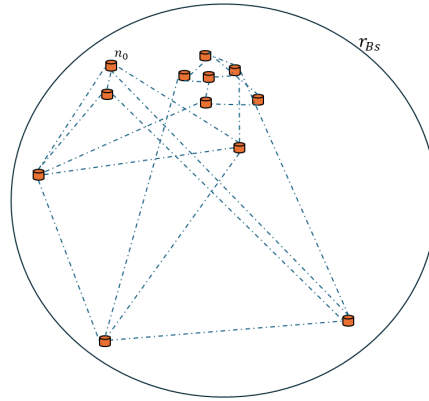


Figura 11: Red establecida despues de n nodos.

Algorithm 3 Red de Sensores Inalámbricos con Escalamiento Libre

```

procedure RSI CON ESCALAMIENTO LIBRE( $m_0, N$ )
  Se declaran los  $N$  nodos totales con  $m$  enlaces por cada uno
  Se forma una red inicial con  $m_0$  nodos
  for  $i = m_0 + 1 : N$  do
    Encuentra los nodos en el radio de del nodo  $rc$ 
    if Si los nodos alrededor son menor o igual a  $m$  then
      El nodo  $i$  se conecta con todos alrededor
    else
      while La cantidad de nodos conectados son menor a  $m$  do
        Se genera un vector  $np$  con las probabilidades
        de conexión de los nodos ( $d_j / \sum d$ )
        Se genera un numero aleatorio entre 0 y 1  $p_j$ 
        y se compara con el acumulado  $p$  del primer
        nodo vecino  $j$  del vector  $np$ 
        if  $p_j < p$  y  $j$  no se ha conectado con  $i$  then
          Se marca la conexión en la matriz de conexiones
          Se aumentan los grados del nodo  $i$  y  $j$ ,
          y se aumentan las conexiones hechas
        else
          Se aumenta el acumulado  $p$  del nodo vecino  $j + 1$ 
  Se obtiene la red de Escalamiento Libre con el algoritmo de Barabasi-Albert

```

en cuenta esta situación se toman en cuenta tres casos: si el nodo al que estamos estudiando llega un solo paquete de un nodo con el cual se encuentra conectado, contará como una transmisión exitosa; si un nodo que no está conectado, dos o más nodos ya sean conectados o no al nodo de interés envían un paquete en el mismo instante de tiempo, se provocará una colisión y finalmente, puede ocurrir que en un instante de tiempo ningún nodo realice una transmisión, bajo estos tres casos se calculan las probabilidades de recepción exitosa P , de colisión P_C y de ranura vacía P_0 . Para ilustrar los fenómenos se pueden observar las figuras 12, 13, 14 y 15.

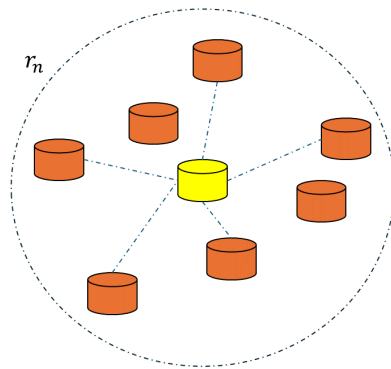


Figura 12: Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una ranura vacía.

Con el algoritmo 4 se describe la medición del tráfico en la red.

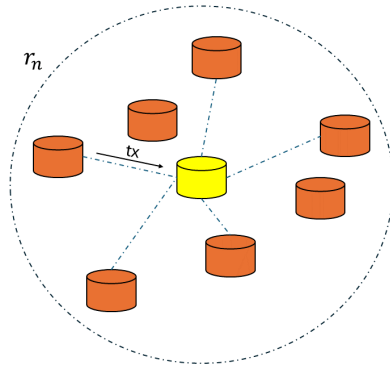


Figura 13: Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una transmisión exitosa.

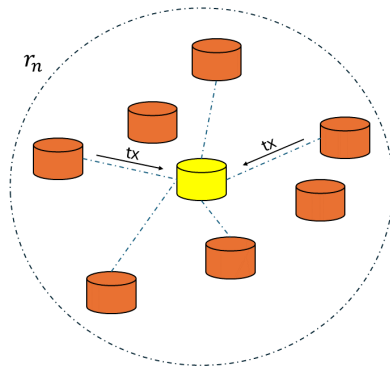


Figura 14: Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una colisión, cuando dos nodos conectados transmiten al mismo tiempo.

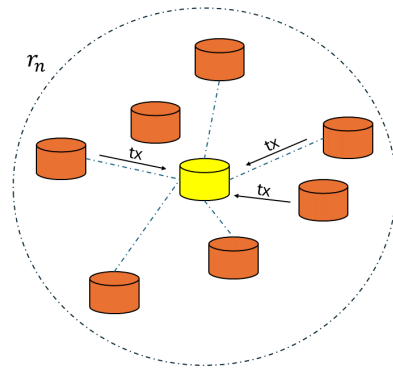


Figura 15: Cobertura de un nodo y el comportamiento de los nodos dentro de su cobertura cuando se incrementa la probabilidad de una colisión, esta vez ocurre por la transmisión de un nodo no conectado y mas nodos transmiten el mismo tiempo.

Algorithm 4 Algoritmo de medición de Tráfico en una Red

procedure TRAFICO(G)

Número de nodos N matriz de conexiones W

probabilidad de transmitir un paquete τ ranuras de tiempo $tSlots$

for $i = 1 : N$ **do**

Se detectan los nodos conectados al nodo i y a su vez
los nodos en su radio de cobertura.

for $t = 1 : tSlots$ **do**

for Cada nodo conectado o dentro del radio de cobertura **do**

if Solo un nodo conectado manda un paquete **then**

La probabilidad de transmisión exitosa P

para el nodo i aumenta en $1/tSlots$

else if Un nodo no conectado o mdos o mas nodos conectados o
no y que estan dentro del radio de cobrtura del nodo i mandan un paquete **then**

La probabilidad de colisión P_c

para el nodo i aumenta en $1/tSlots$

else if Ningun Nodo manda un paquete **then**

La probabilidad de ranura vacía P_0

para el nodo i aumenta en $1/tSlots$

else if Solo un nodo conectado manda un paquete **then**

La probabilidad de recepción exitosa P para el nodo i
aumenta en $1/tSlots$

Se obtienen los promedios de todos las probabilidad P, P_0 y P_c
respecto a la cantidad de nodos N

3.4. Resultados

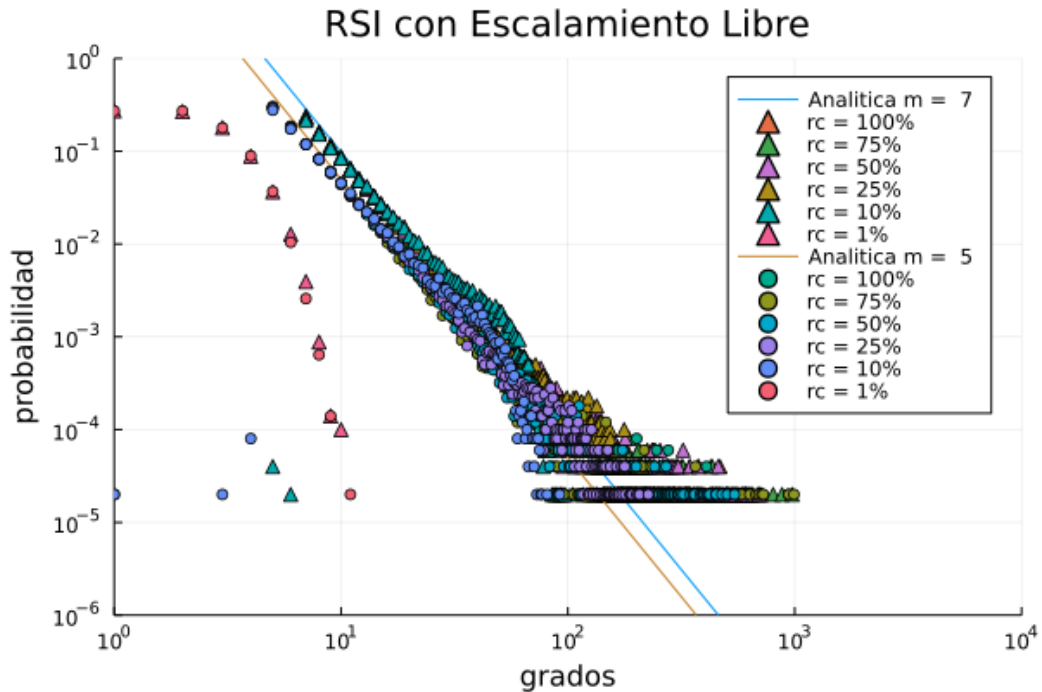


Figura 16: Comportamiento de la densidad de probabilidad de la RSI de acuerdo al porcentaje de rc respecto al radio total.

En la figura 16 se observa el comportamiento de la RSI de acuerdo a su radio de cobertura, variando el porcentaje que cubre el radio de un solo nodo respecto al radio total. Aquí se observa que el radio de cobertura de los nodos es independiente del comportamiento de escalamiento libre hasta cierto radio de cobertura, a partir del 10 % respecto al radio total, se presentan excepciones en la distribución de grado. Con la cantidad de nodos m que se conecta cada nuevo nodo, se infiere con la gráfica que también es independiente a m y que tiene los mismos efectos de acuerdo al radio de cobertura.

Analizando la figura 17 y tomando en cuenta un área con radio de $500m$ y variando el área de cobertura de cada nodo, podemos observar que cuando $m = 3$ la probabilidad es $P = 0.0063$, cuando $m = 5$ se tiene que $P = 0.0102$, finalmente en $m = 7$ la probabilidad es $P = 0.0143$ todo esto cuando $\tau = 0.0025$ y el radio de cobertura es del 20 % del radio total. Donde se encuentra entre el

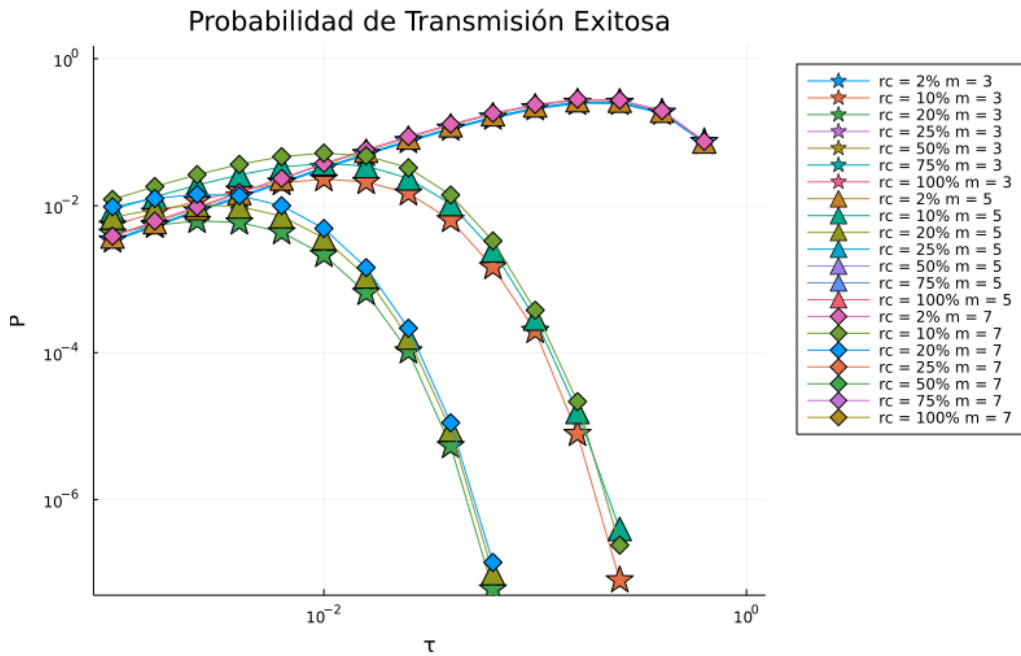


Figura 17: Probabilidad de recepción exitosa contra probabilidad de transmitir un paquete

límite del comportamiento de una red de escalamiento libre y se puede hallar la máxima probabilidad de transmisión es cuando $r = 10\%$ del radio total y la probabilidad de transmitir un paquete es de $\tau = 1\%$, aquí cuando $m = 3$ tenemos que $P = 0.023$, cuando $m = 5$, $P = 0.0376$ y en $m = 7$, $P = 0.052$. Cuando se tiene un radio mayor a este porcentaje, la probabilidad de éxito es cercana al cero debido a la cantidad de nodos conectados y que se encuentran alrededor de cada nodo, en el otro extremo, disminuir el radio de cobertura se puede aumentar la probabilidad de éxito, sin embargo, como se mencionó en la sección anterior, disminuir el radio a un porcentaje menor del 10% provoca que la red no tenga un comportamiento de red compleja, perdiendo propiedades importantes.

Al observar los resultados de 18 y 19 se observa que el comportamiento de las colisiones y de no recibir ningún paquete es independiente de las conexiones generadas m por cada nodo, y se centra más en los aspectos geográficos y de cobertura relacionados con la cantidad de nodos que no están conectados pero se encuentran dentro del radio de cobertura, los cuales al transmitir interfieren con la comunica-

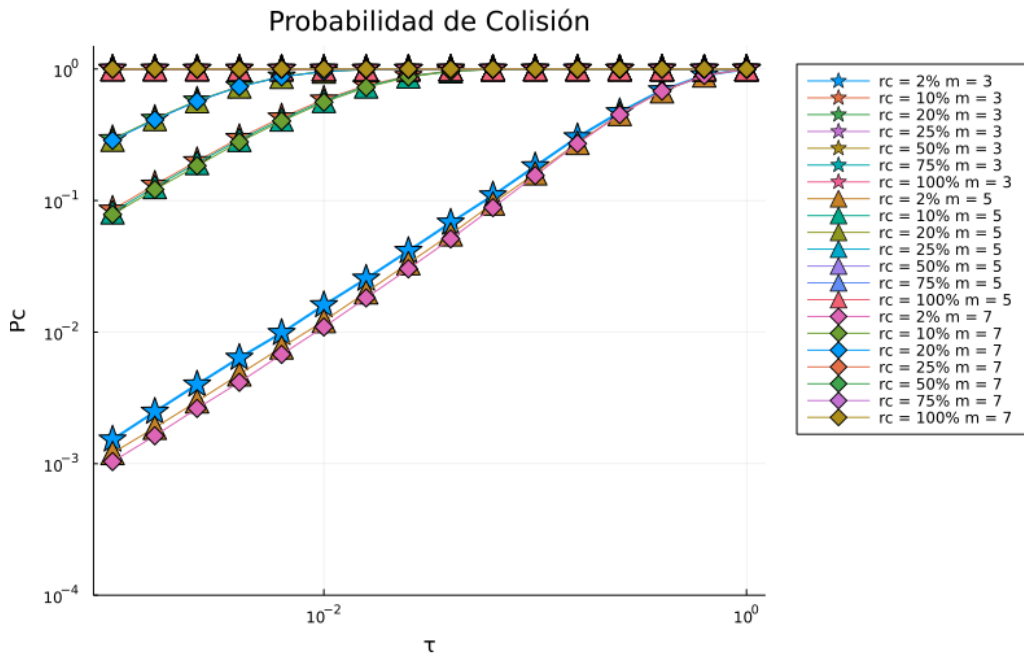


Figura 18: Probabilidad de Colision contra probabilidad de transmitir un paquete.

ción entre los nodos.

Situaciones donde podemos encontrar los resultados anteriores se pueden hallar en aplicaciones de RSI de cualquier tipo de cobertura, siempre y cuando el radio de cobertura de cada nodo y la selección de m se tomen en consideración a la hora del diseño. Además, en ambientes densos, este modelo del sistema se considera consistente ya que el protocolo de acceso al medio influirá más en las métricas de transmisión que en la topología de la red misma.

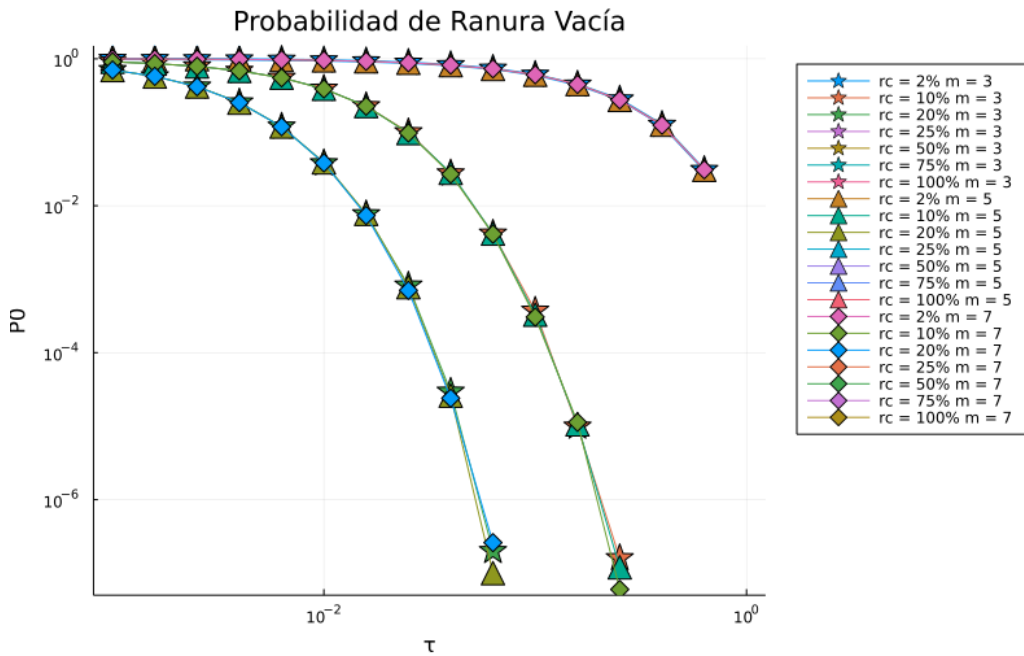


Figura 19: Probabilidad de ranura vacía contra probabilidad de transmitir un paquete

3.5. Conclusiones

Independientemente del valor de m usar las propiedades emergentes en sistemas como las redes de sensores inalámbricos muestran que las limitaciones son únicamente de acuerdo al radio de cobertura del nodo y del área geográfica donde se despliegue esta tecnología, usando $rc \geq 10\%$ del área total.

Al igual que considerar el rc para mantener el comportamiento de escalamiento libre, este valor impactará también la forma en que se transmitirá la información a pesar que la red se diseñe con diferentes m .

Para futuros trabajos se recomienda guiarse de lo presentado pero tomando en cuenta limitaciones como cambios en el protocolo de acceso al medio, coberturas con geometría irregular, modelos de tráfico que puedan ayudar a optimizar los valores presentados así como considerar nuevas geometrías irregulares para encontrar puntos críticos en aplicaciones con más variables.

4. Falla y Ataque en Redes de Sensores Inalámbricos con Escalamiento Libre

En este capítulo se muestran los trabajos relacionados a la seguridad y robustez de las RSI con comportamiento de redes complejas de acuerdo a métricas físicas y lógicas, como el área y los protocolos. Se muestran los modelos utilizados para analizar los escenarios como una falla uniforme o un ataque preferencial. Finalmente se discuten las observaciones y los escenarios donde se pueden encontrar estos resultados.

4.1. Trabajo Relacionado

Las redes de escalamiento libre son robustas por la naturaleza de la generación, pero al ser aplicadas en las RSI, existen muchos riesgos en la red, de acuerdo con [22] algunos de ellos son piggybacking, aplicado en RSI, agentes maliciosos pueden integrarse a la red y usarla para fines ilícitos, un agente malicioso puede hacerse pasar por un nodo de la RSI, lo que puede llevar a una sustracción de datos.

El tema de la seguridad en las RSI, ha llevado a investigar nuevas formas de mejorar la robustez de las redes de escalamiento libre, como en [14] donde la generación de la red se basa en la posición del nodo y la vulnerabilidad que pueda tener en esa zona. Los autores de [19] han propuesto un algoritmo para aumentar la robustez, pero introduciendo dos parámetros para ir cambiando los enlaces y los grados de tal forma que siga siendo una red de escalamiento libre pero con mayor protección.

No solo los ataques afectan a las RSI, sino también las fallas, es por eso que en [11] se muestran mediante simulación y análisis matemático los efectos de fallas en cascada y los ataques de acuerdo al grado. En [18] con un nuevo modelo de fallas en cascada usando una nueva métrica traducida como intermediación (betweenness) se logró conocer que de acuerdo a los valores del exponente de esta métrica, atacar a los nodos con alto grado hace que la falla en cascada ocurra, si el exponente está por encima del umbral, mientras que si el exponente está por debajo del umbral, atacar los nodos con menor grado hace que la red se paralice. Investigando el impacto de él tráfico y las fallas en una red de escalamiento libre, los autores en [28] miden el impacto de las fallas en redes con tráfico heterogéneo.

4.2. Algoritmo de Falla Uniforme

Partiendo del modelo del sistema explicado en el capítulo 3, para simular las fallas aleatorias que pueden ocurrir en este tipo de aplicaciones y midiendo el impacto en las métricas como el APL y la NE, una vez que la red se forma, aleatoriamente un nodo falla y se desconecta de la red, eliminando los enlaces que formó hacia los otros nodos.

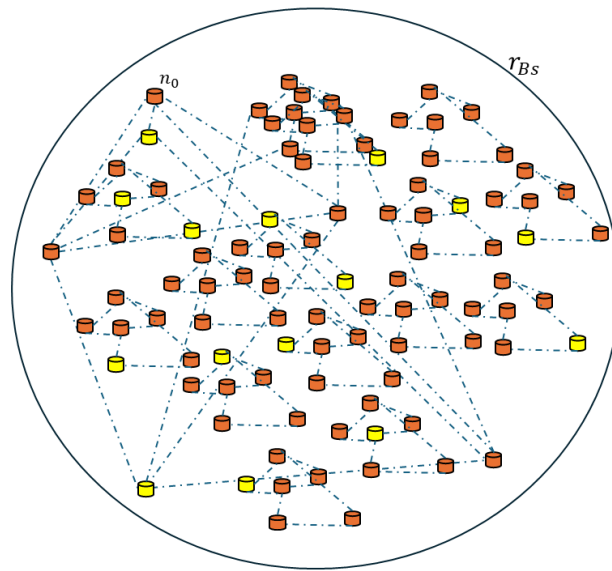


Figura 20: Imagen ilustrativa de como los nodos fallarían uniformemente sin importar su ubicación o su grado.

Algorithm 5 Algoritmo de falla uniforme

procedure FALLA UNIFORME(G, N)

Se hace un barrido para conocer el estado de cada nodo

for $i = 1 : N$ **do**

Se genera un número aleatorio

if El nodo i falla **then**

Se identifican los vecinos del nodo i

Se eliminan las conexiones hechas de este nodo

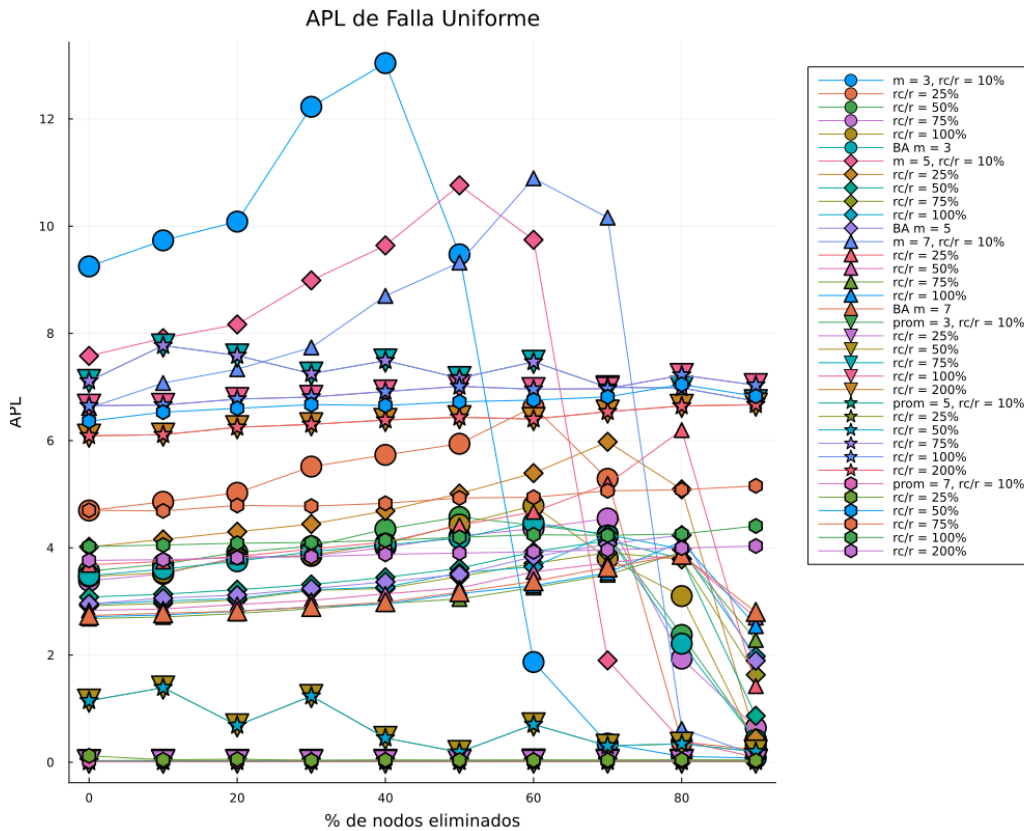


Figura 21: Resultados obtenidos de la medición del APL en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos fallan aleatoriamente.

En la gráfica 21 podemos observar los resultados de 2 tipos diferentes de redes una de ellos es las redes de sistemas inalámbricos con comportamiento de escalamiento libre y la otra red que se tiene es una red aleatoria que se va a diferenciar por medio de el promedio de nodos en cada iteración. Los resultados de las rsi se muestran con un círculo, un rombo y un triángulo hacia arriba con $m = 3, 5$ y 7 respectivamente los resultados de las redes aleatorias se pueden encontrar con los símbolos triángulo hacia abajo, estrella y hexagono con promedios de 3 5 y 7 conexiones por cada nuevo nodo respectivamente.

Observando los resultados de las RSI cuando $m = 3$ y una red tipo barabási albert cuando $m = 3$ y al variar los radios de cobertura se observa que cuando en radio de cobertura de cada nodo va disminuyendo, el APL aumenta esto como resultado de que al disminuir el radio de cobertura se limitan las conexiones

geográficamente por lo que en una red de Barabási-Albert donde no hay restricción en la forma en que se conectan los nodos se pueden encontrar caminos más rápidos para llegar de un punto a otro pero con redes de coberturas más pequeños los enlaces aumentarán si queremos llegar en diferentes trayectorias lo mismo ocurre independientemente del valor de m . Los cambios se notan en el valor del APL respecto a el valor de m , ya que al ir aumentando m las limitaciones geográficas se ven compensadas al permitir que en los nodos que se van añadiendo a la red puedan conectarse con más nodos a su vez generando trayectorias más cortas independientemente de la parte geográfica. Al observar las redes aleatorias a pesar de que su APL resulta ser menor en algunos casos respecto a las redes complejas propuestas, este no es un indicativo que la red aleatoria sea mejor, sino que nos da una idea de que al momento de ir eliminando nodos este tipo de redes aleatorias va generando agrupamientos dentro de su propia red total limitando un análisis más completo en la forma de que se puede transmitir información, también si ajustamos el area de cobertura en estas redes aleatorias a un punto equiparable al del modelo original de Barabási-Albert este tipo de redes resultan tener trayectorias más largas.

Por otro lado, la métrica de la eficiencia de la red (NE) mostrada en la figura 22 ofrece información sobre como son aprovechados los componentes de la red para transmitir información, buscando un valor alto de esta métrica. Analizando la NE del modelo original de Barabási-Albert con sus respectivos ajustes del radio de cobertura de cada nodo, notamos variaciones importantes tanto en el valor de m cen el modelo original, a mayor valor de m se tiene un mejor valor de NE , además para valores de $rc < 50\%$ disminuye drásticamente el valor de la NE . Este escenario se explica ya que al aumentar el radio de cobertura, se alcanza el ideal de que se pueden formar más enlaces que puedan llegar más rápido de un nodo A a un nodo B sin importar la situación geográfica, como virtualmente se logró en internet a través de diversos mecanismos que permiten comunicarse en diferentes partes del mundo de una manera rápida y confiable, y al ir disminuyendo este radio de cobertura por nodo, ponemos una limitación real de las RSI, y a pesar de esta limitación real, comparada con las redes aleatorias, poder tener un valor de NE equiparable al que se tiene con radios de cobertura menores al 50% , los nodos en las redes aleatorias deberán de tener un radio de cobertura de al menos el 100% del valor del radio del área ubicada, y adicionalmente, el disminuir el radio de cobertura provoca una caída drástica del valor de NE en las redes simples.

En cuanto al comportamiento de las redes simples y el modelo de esta tesis debido a la pérdida de nodos se observa que en las redes simples el valor de NE

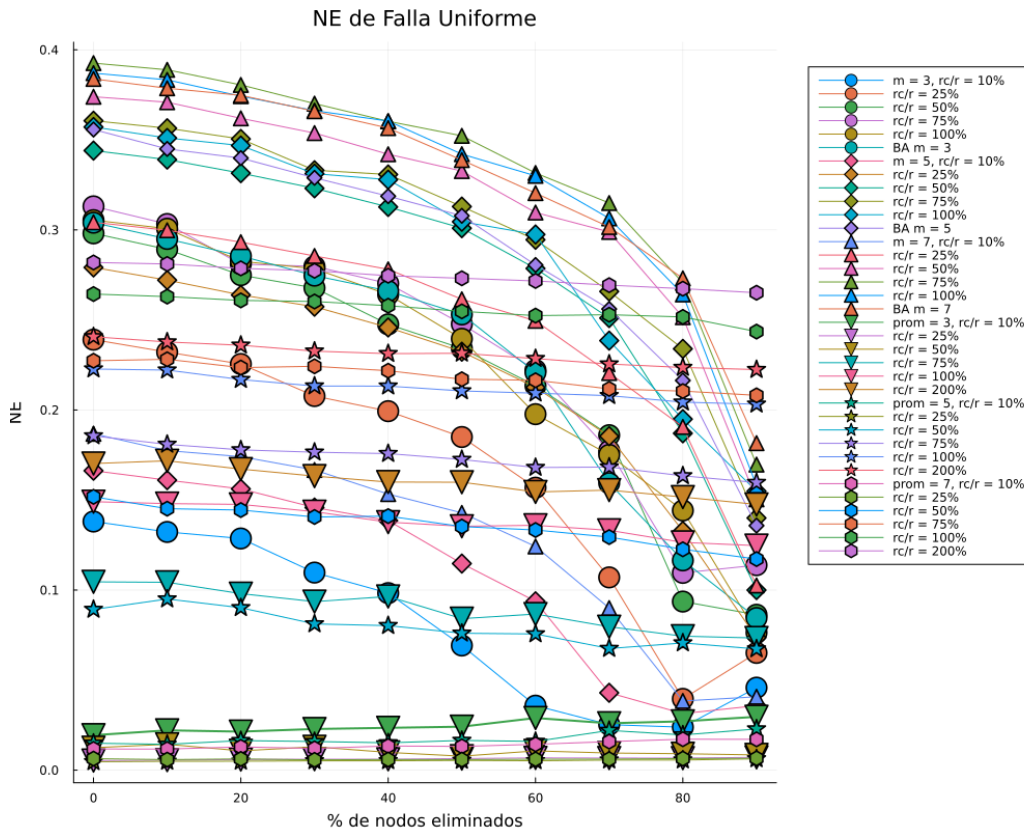


Figura 22: Resultados obtenidos de la medición de NE en una red RSI con escalamiento libre y de una red simple cuando los nodos fallan aleatoriamente.

fluctua menos que el del modelo ya que más nodos llegan a tener el mismo número de conexiones, en contraste con la RSI con comportamiento complejo que con el pasar del tiempo, habrá una concentración mayor en solo unos cuantos nodos, y aumentar la cantidad de nodos que fallan atenta con la estabilidad de la red ya que en algunos escenarios, los nodos con mayor concentración pueden fallar y desconectar trayectorias significativas para la transmisión de información.

Con los datos obtenidos podemos considerar en aplicaciones que las RSI con escalamiento libre cuyos nodos puedan fallar por cuestiones energéticas, espectrales por errores humanos, entre otros escenarios, demuestra ser más eficiente y robusta para la planeación de despliegues de estas arquitecturas.

4.3. Algoritmo de Ataque Preferencial

Dado que el modelo de Barabasi-Albert la mayoría de los enlaces se concentran en pocos nodos, un agente malicioso podría querer desestabilizar la red y una de las formas más inmediatas sería atacando a los nodos de mayor grado.

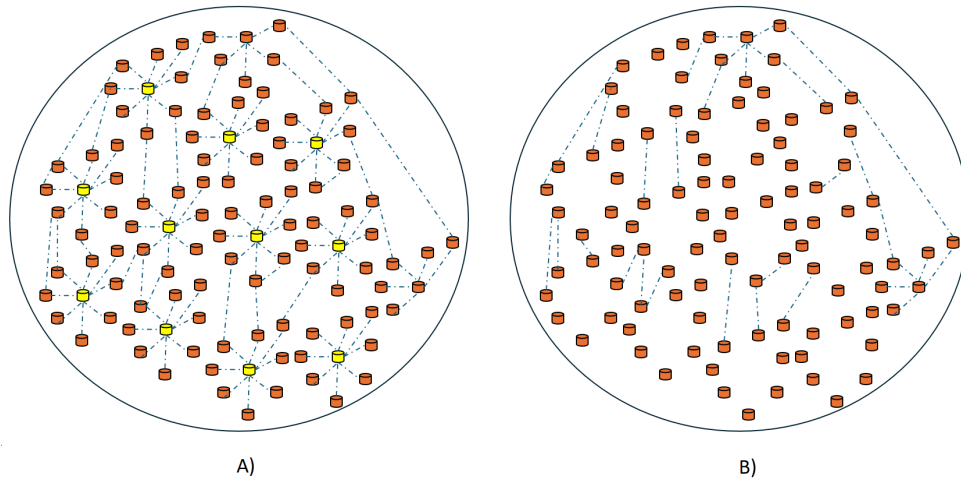


Figura 23: Imágen ilustrativa de como los nodos serían atacados por ser los nodos con mayor grado.

Algorithm 6 Algoritmo de Ataque preferencial

procedure ATAQUE PREFERENCIAL(G, N)

Se tiene la red formada y monitoreada

Los nodos con mas enlaces son más propensos a fallar

for $i = 1 : N$ **do**

Se calcula la probabilidad de falla de acuerdo a la cantidad den nodos conectados hacia el nodo i

if El nodo i falla **then**

Se identifican los vecinos del nodo i

Se eliminan las conexiones hechas de este nodo

Al igual que la sección anterior, el valor de APL resulta ser mejor si es bajo, sin embargo, no siempre es así debido a que en las redes pueden formarse agrupamientos y que la medición aplique directamente solo a estos pequeños grupos de nodos, como podemos encontrar en las redes aleatorias en la gráfica 24, donde

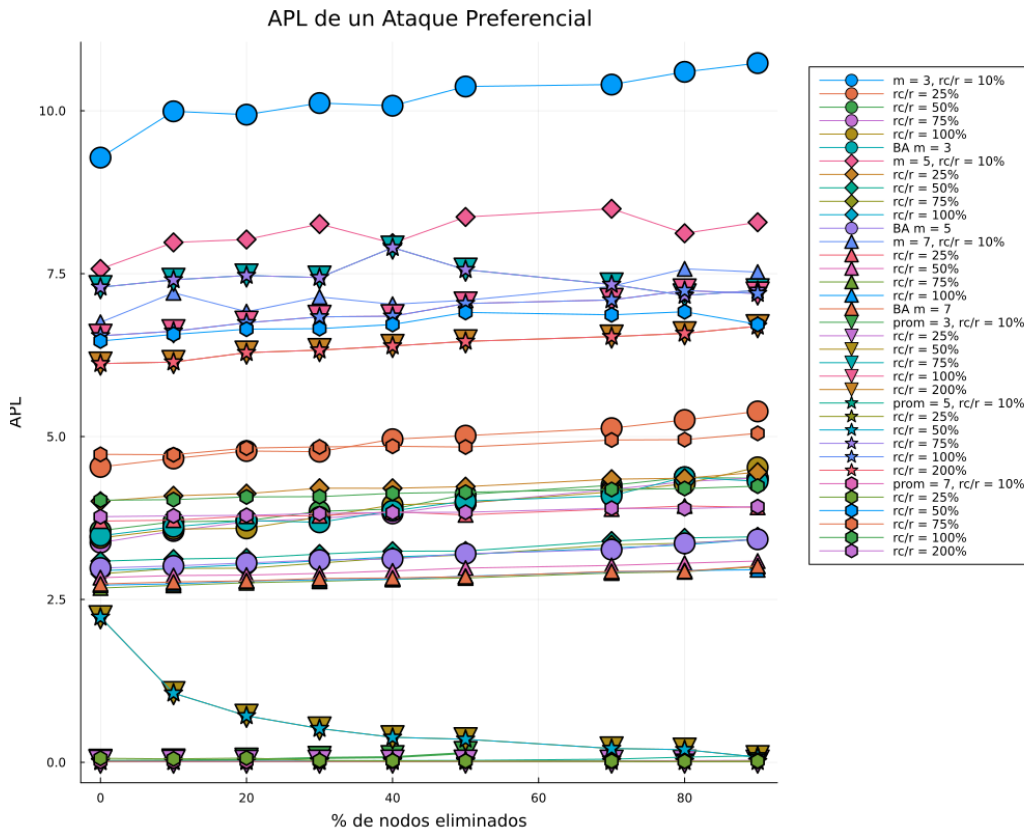


Figura 24: Resultados obtenidos de la medición del APL en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos son atacados de acuerdo a su grado del nodo.

pareciera que son una topología confiable pero al ir eliminando nodos, para radios de cobertura del 50% al tener muy pocos nodos con altos grados, estos al ser eliminados van formando agrupamientos que hacen imposible la transmisión de información entre grupos ya que la trayectoria deja de existir. Por otro lado el modelo de Barabási-Albert se mantiene consistente en sus variaciones cuando se eliminan nodos de alto grado, pero cuando variamos el radio de cobertura con el modelo de esta tesis, para radios menores al 25% el APL aumenta significativamente, esto nuevamente por las limitaciones geográficas, la cantidad de enlaces que se forman tiende a disminuir pero hace que haya más caminos entre nodos, evitando agrupamientos como en el caso de las redes simples.

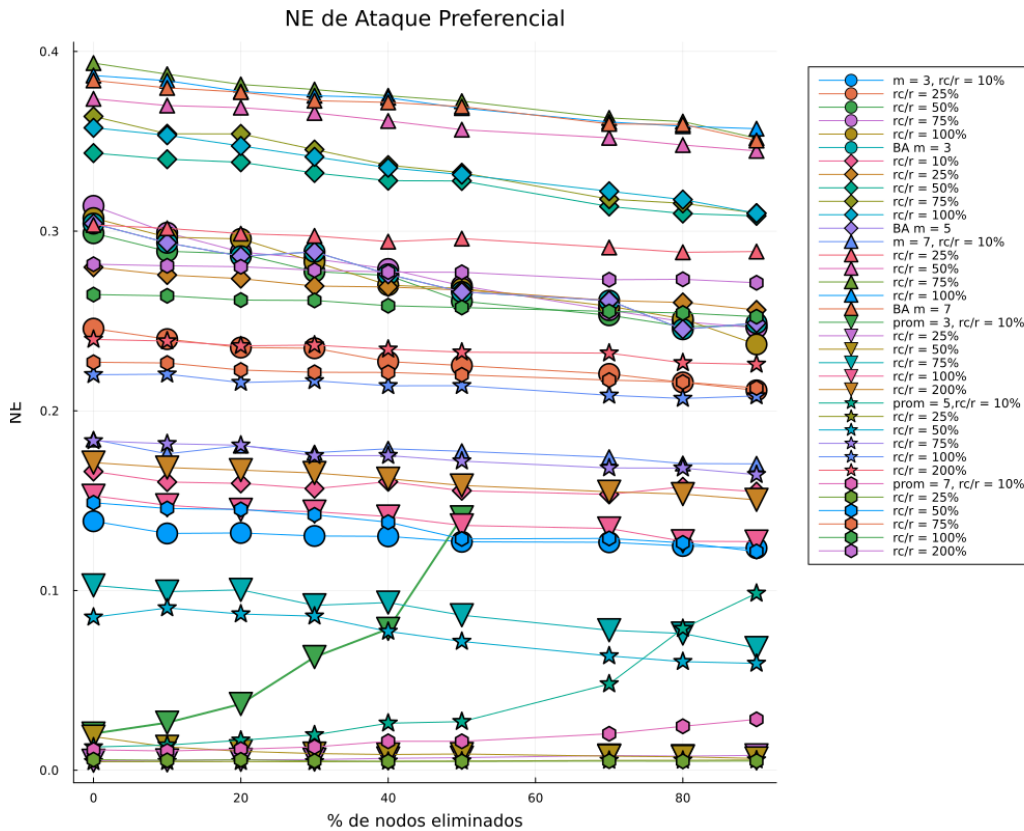


Figura 25: Resultados obtenidos de la medición de NE en una red RSI con escalamiento libre y de una red aleatoria cuando los nodos fallan aleatoriamente.

Con la figura 25 observamos la eficiencia de la red a la vez que los nodos con alto grado son atacados. Aquí podemos observar que al ser pocos los nodos con alto grado, nuestros modelos de redes complejas mantienen una disminución de la eficiencia consistente a pesar de tener un alto grado de ataque (o eliminación), muy diferente a como se ve en la métrica cuando fallan aleatoriamente los nodos. Por otro lado las redes simples no son consistentes en situaciones donde el radio de cobertura es menor al 50 % provocando que la red deje de existir en eliminaciones grandes, esto pasa porque al tener una alta concentración de nodos con el mismo grado, al irlos atacando provoca que la red en algún punto deje de estar conectada y que los agrupamientos se hagan cada vez más pequeños, por lo que su robustez se ve comprometida rápidamente si un agente malicioso deseara atacar a este tipo de redes.

En este escenario podemos ver que en aplicaciones de RSI con comportamiento de escalamiento libre la existencia de concentradores de datos (nodos con altos grados) ofrece mayor resiliencia en el mundo actual del incremento de los ataques cibernéticos, manteniendo consistencia en las observaciones respecto a m y el radio de cobertura.

4.4. Conclusiones y futuros trabajos

Las redes simples enfrentan problemas al convertirse en aplicaciones reales ya que una de los principales problemas que presentan se relaciona con la cobertura de cada nodo. Con las redes complejas esto no es así ya que exhibe comportamiento de escalamiento con una cobertura de apenas 10 % del valor total del área, siendo flexible a la hora de proponer diseños. Por otro lado, las RSI con escalamiento libre exhibieron mayor robustez y eficiencia cuando los nodos fallaban aleatoriamente, resultando ser que para afectar severamente su eficiencia, > 70 % de nodos deben de fallar, lo que resulta en algo poco posible con la manufactura, tecnología y mano de obra especializada en la actualidad.

Cuando se ataca a los nodos con mayor grado, la métrica del *APL* se mantiene en radios de cobertura > 25 % métrica del modelo original. Sin embargo la robustez se mantiene independiente de m y de rc aunque el valor de *NE* si se verá comprometido debido a las limitaciones geográficas que la tecnología de los nodos inalámbricos ofrezca. Las redes simples son muy susceptibles a ataques de este tipo por lo que no se recomienda su aplicación cuando se traten de situaciones que necesiten robustez o una baja densidad de nodos.

Para futuras trabajos se pueden analizar estas mismas métricas bajo ataques como eliminar a nodos que tengan el mismo grado, simular situaciones donde la falla no sea aleatoria y sea debido a su fuente de alimentación, proponer una cobertura de comportamiento real en los nodos, añadiendo fenómenos como las pérdidas por trayectoria, desvanecimientos e inclusive aplicando diferentes protocolos de acceso al medio.

5. Referencias

Referencias

- [1] Mukarram A. M. Almuahaya y col. “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”. En: *Electronics* 11.1 (2022). ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics11010164. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>.
- [2] Mukarram A. M. Almuahaya y col. “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”. En: *Electronics* 11.1 (2022). ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics11010164. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>.
- [3] Albert-László Barabási y Réka Albert. “Emergence of Scaling in Random Networks”. En: *Science* 286.5439 (1999), págs. 509-512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.286.5439.509>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.286.5439.509>.
- [4] Stefan Bornholdt y Heinz Georg Schuster. *Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN: 3527403361.
- [5] William Earl Boyson y col. “Performance model for grid-connected photovoltaic inverters.” En: (sep. de 2007). DOI: 10.2172/920449. URL: <https://www.osti.gov/biblio/920449>.
- [6] Almir Davis y Hwa Chang. “A SURVEY OF WIRELESS SENSOR NETWORK ARCHITECTURES”. En: *International Journal of Computer Science & Engineering Survey* 3 (2012), págs. 1-22. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61268282>.
- [7] Radu Dobrescu y col. “Integration of WSN-based platform in a homecare monitoring system”. En: jul. de 2010, págs. 165-170.
- [8] Paul L. Erdos y Alfréd Rényi. “On random graphs. I.” En: *Publicationes Mathematicae Debrecen* (2022). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253789267>.
- [9] Hossam Fahmy. “Concepts, Applications, Experimentation and Analysis of Wireless Sensor Networks”. En: (ene. de 2021). DOI: 10.1007/978-3-030-58015-5.

- [10] Jetmir Haxhibeqiri y col. “A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application”. En: *Sensors* 18.11 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18113995. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>.
- [11] Wang Jian-Wei y Rong Li-Li. “Effect Attack on Scale-Free Networks due to Cascading Failures”. En: *Chinese Physics Letters* 25.10 (oct. de 2008), pág. 3826. DOI: 10.1088/0256-307X/25/10/084. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0256-307X/25/10/084>.
- [12] Jiong Jin y col. “Handling inelastic traffic in wireless sensor networks”. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 28.7 (2010), págs. 1105-1115. DOI: 10.1109/JSAC.2010.100915.
- [13] Matthieu Kanj, Vincent Savaux y Mathieu Le Guen. “A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 22.4 (2020), págs. 2408-2446. DOI: 10.1109/COMST.2020.3022751.
- [14] G. Keerthana, Anandan Panneerselvam y Nandha Gopal N. “Enhancing the Robustness and Security Against Various Attacks in a Scale: Free Network”. En: *Wireless Personal Communications* 117 (abr. de 2021). DOI: 10.1007/s11277-020-07356-5.
- [15] Jeong-Hun Lee e Ilkyeong Moon. “Modeling and optimization of energy efficient routing in wireless sensor networks”. En: *Applied Mathematical Modelling* 38.7 (2014), págs. 2280-2289. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.044>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13006562>.
- [16] Abinash Mahapatra, Kumar Anand y Dharma P. Agrawal. “QoS and energy aware routing for real-time traffic in wireless sensor networks”. En: *Comput. Commun.* 29.4 (feb. de 2006), págs. 437-445. ISSN: 0140-3664. DOI: 10.1016/j.comcom.2004.12.028. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2004.12.028>.
- [17] Adnan Nasir, Boon Hee Soong y Selvakumaran Ramachandran. “Framework of WSN based human centric cyber physical in-pipe water monitoring system”. En: *2010 11th International Conference on Control Automation Robotics & Vision* (2010), págs. 1257-1261. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16896626>.

- [18] Xingzhao Peng y col. “Invulnerability of scale-free network against critical node failures based on a renewed cascading failure model”. En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 421 (2015), págs. 69-77. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.11.024>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437114009753>.
- [19] Tie Qiu y col. “Robustness Optimization Scheme With Multi-Population Co-Evolution for Scale-Free Wireless Sensor Networks”. En: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 27.3 (2019), págs. 1028-1042. DOI: 10.1109/TNET.2019.2907243.
- [20] Xinyu Qu y col. “Complex Network Analysis of VANET Topology With Realistic Vehicular Traces”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.4 (2020), págs. 4426-4438. DOI: 10.1109/TVT.2020.2976937.
- [21] Usman Raza, Parag Kulkarni y Mahesh Sooriyabandara. “Low Power Wide Area Networks: An Overview”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 19.2 (2017), págs. 855-873. DOI: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [22] *Securing Wireless Networks*. <https://www.cisa.gov/news-events/news/securing-wireless-networks>. Accessed: 2024-02-21.
- [23] Charalampos Sergiou y col. “Complex Systems: A Communication Networks Perspective Towards 6G”. En: *IEEE Access* 8 (2020), págs. 89007-89030. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993527.
- [24] Wei Shen y col. “PriorityMAC: A Priority-Enhanced MAC Protocol for Critical Traffic in Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks”. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (2014), págs. 824-835. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15493662>.
- [25] Le Tian y col. “Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research”. En: *Journal of Network and Computer Applications* 182 (2021), pág. 103036. ISSN: 1084-8045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103036>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480452100062X>.
- [26] Hai Wang y Abraham O. Fapojuwo. “A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications”. En: *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 19.4 (2017), págs. 2621-2639. DOI: 10.1109/COMST.2017.2721379.

- [27] Duncan J. Watts y Steven H. Strogatz. “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”. En: *Nature* 393 (1998), págs. 440-442. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3034643>.
- [28] J.J. Wu, Z.Y. Gao y H.J. Sun. “Effects of the cascading failures on scale-free traffic networks”. En: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 378.2 (2007), págs. 505-511. ISSN: 0378-4371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.12.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437106013240>.
- [29] Fotios Zantalis y col. “A Review of Machine Learning and IoT in Smart Transportation”. En: *Future Internet* 11 (2019), pág. 94. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:146100556>.
- [30] Y. Z. Zhao, Connie Y. Miao y M. Ma. “An Energy-Efficient Self-Adaptive Duty Cycle MAC Protocol for Traffic-Dynamic Wireless Sensor Networks”. En: *Wireless Personal Communications* 68 (2012), págs. 1287-1315. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255141644>.
- [31] Shanyu Zhou, Hulya Seferoglu y Erdem Koyuncu. “Blocking avoidance in wireless Networks”. En: *2016 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*. 2016, págs. 1-6. DOI: [10.1109/ITA.2016.7888173](https://doi.org/10.1109/ITA.2016.7888173).