



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

Descubrimiento de vecinos usando rejillas de
ranuras en redes IoT

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
**MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA
COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

EDUARDO LÓPEZ BOLAÑOS

Directores de Tesis:

Dr. Javier Gómez Castellanos

Dr. José Jaime Camacho Escoto

Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., enero de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Descubrimiento de vecinos usando rejillas de ranuras en redes IoT

Eduardo López Bolaños

13 de enero de 2020

Directores:

Dr. Javier Gómez Castellanos
Dr. José Jaime Camacho Escoto

*A mi esposa, Yesi bonita;
mis padres,
y hermanas.*

Agradecimientos

Primeramente, agradezco la atención de los sinodales que aceptaron revisar este trabajo. Al Dr. Jaime Camacho, por aceptar ser cotutor de esta tesis y por las diversas lecciones brindadas, ya fuera en el salón de clases u otorgando asesorías en su oficina. A la Dra. María Elena Lárraga por tener una grata presencia durante mi estadía en el posgrado, desde el momento en que evalué mi entrevista del proceso de admisión hasta la última de sus observaciones a este trabajo siempre mostró una gran dedicación. Al Dr. Francisco García Jiménez por su gran esmero en puntualizar detalles cuya finalidad es mejorar la formación académica. Al Dr. Víctor Rangel por mostrar lo complejo que son las redes. Gracias. ¡Sin duda el tiempo que dedicaron es invaluable!

Así mismo, de una manera muy especial quiero agradecer al Dr. Javier Gómez Castellanos con quien surgió la idea de desarrollar el presente tema de tesis. Gracias por los cursos impartidos y por su paciencia, dedicación y tiempo a pesar de tener una gran responsabilidad a cargo del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación de la UNAM. ¡Muchísimas gracias!

No me queda duda de que mis padres están complacidos por haber concluido este reto. Muchas gracias por haberme brindado el regalo de la vida. Gracias por su motivación para buscar ser una persona íntegra y de éxito. ¡Gracias Ma! ¡Gracias Bron!

Agradezco también a mis hermanas, Mariana y Andrea, que me apoyaron en esta aventura, siempre intentando convertir mi habitación en un gimnasio por la ausencia, pero valorando los momentos juntos cuando las visitas eran posibles.

Por otro lado, agradezco la dicha de compartir grandes momentos de la vida a lado de Yesi bonita. Si bien al inicio de este proceso nos encontrábamos siendo novios, ahora tenemos la dicha de ser esposos. Sin duda has sido un pilar fundamental en este recorrido, que nos distanció unos cientos de kilómetros, pero al final lo superamos sellándonos de por vida. ¡Te amo!

Ha llegado el turno de agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de

VI

México por todas las facilidades que ofrece esta casa de estudios, entre ellas, brindar como sede del posgrado al IIMAS el cual es un muy cálido lugar del cual no dan ganas de irse. Un hogar que me permitió conocer a muchas personas tan alegres. ¡Gracias Lulú, Amalia y Ceci!

También muchas gracias a mis compañeros de generación por haberme acompañado en el trayecto de la maestría: Juan(Pancho Romino), Olga(Alguitas), Daniel(Baloo), Gibrán(mi niño), Miguel(Amigui), Ricardo(Sr. Consejero), Mariana, Raúl, Alejandro(Chihuahua), Luiso, Julieta y Anthony. Con ustedes me divertía todos los días y el momento más triste era cuando teníamos que partir porque se cerraba el edificio.

En un apartado muy significativo y especial entran Aquilino y Carlos(RoCa). ¡Qué buena aventura! Gracias por brindarme su gran amistad, conocimiento y compartir muy gratos momentos. Ojalá que la vida nos dé para seguir colaborando.

Por otro lado gracias al equipo de fútbol del posgrado Troncos F.C. donde tuve la oportunidad de conocer a más personas especiales como lo son: Dani Quintos, Héctor Guzmán, Francesc Wilhelmi, Pedro, Joselo, Noguez, Miguel Garrido, Toño y Carlos. ¡Qué espléndidas tardes de mucho fútbol a su lado!

Gracias al grupo de 'Panelianos en CdMx': Buba, Mijail y Canillas; por ser ese factor externo con el que había una obligada reunión los miércoles: fútbol, videojuegos, makis, chascarrillos y buen ambiente. Me hicieron sentir muy cerca de casa.

Por último, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de apoyo económico mensual y de servicio médico otorgada a lo largo de los 2 años de duración del posgrado. Así mismo, agradezco al proyecto PAPIIT-IN117017 por las facilidades otorgadas para asistir al evento ASSET en MobiCom 2019. Muchas gracias.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración de cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Resumen

Los ciclos de trabajo en las redes informáticas se definen como el porcentaje de tiempo en que los dispositivos permanecen activos para transmitir y/o recibir una señal respecto a la duración total de un marco de trabajo. En las redes de sensores inalámbricas se busca que los ciclos de trabajo sean muy bajos ya que éstas se despliegan en ambientes en los que es difícil otorgarles mantenimiento y regularmente son alimentadas por baterías o algún mecanismo que les provee energía de su entorno.

Por otro lado, el descubrimiento de vecinos es un proceso indispensable tanto en la parte inicial del despliegue de una red inalámbrica como en cualquier otra etapa del proceso operativo.

En esta tesis se expone el diseño, caracterización y simulación de una técnica de descubrimiento de vecinos para nodos que operan con bajos ciclos de trabajo con la finalidad de minimizar el tiempo en el que los nodos conocen su vecindario. En el internet de las cosas este proceso exige a los dispositivos descubrirse mutuamente no sólo para tener conocimiento de la topología de red sino también para realizar correctamente las tareas de encaminamiento e intercambio de datos. Por esta razón se buscan alternativas que optimicen los enfoques clásicos como los largos periodos de escucha y recepción que derivan en mayor gasto de energía. Para alcanzar esta meta, se desarrolla un concepto definido como *rejilla*, para resolver el problema de asincronismo en los relojes de los dispositivos de la red y así minimizar el consumo de potencia de los sensores.

La contribución de este trabajo es la elaboración de una técnica de descubrimiento de vecinos que opera en redes con restricciones de consumo energético. Así mismo, se plantea la correspondiente caracterización de los modelos matemáticos y se ejecutan las simulaciones y evaluaciones que cotejen las expectativas del planteamiento teórico.

Los resultados muestran una reducción porcentual que alcanza hasta un 95 % de disminución del tiempo del descubrimiento de acuerdo al tamaño de la red.

X

Palabras clave:

redes, descubrimiento de vecinos, ciclos de trabajo bajos, modelación, implementación.

Índice general

Resumen	IX
Índice de figuras	XIV
Introducción	XV
1. Estado del arte	1
1.1. Trabajo relacionado	2
2. Desarrollo	7
2.1. Técnica de la rejilla	7
2.1.1. Diseño de la rejilla	9
2.1.2. Cardinalidad de la rejilla	11
2.1.3. Ciclos de trabajo de los dispositivos	13
2.1.4. Funcionamiento de la técnica de la rejilla	14
2.1.5. Enfoques de la técnica	15
2.2. Modelos Teóricos	18
2.2.1. Modelos para nodos tipo A-A	18
2.2.2. Modelos para nodos A-B	19
2.2.3. Modelos para nodos B-B	24
3. Experimentación y resultados	27
3.1. Experimentación entre nodos tipo AA	28
3.1.1. Enfoque probabilístico	28
3.1.2. Técnica de la rejilla	29
3.2. Experimentación entre nodos tipo AB	30
3.2.1. Enfoque probabilístico	31
3.2.2. Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria	33

3.2.3. Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio	35
3.3. Experimentación entre nodos tipo BB	37
3.3.1. Enfoque probabilístico	37
3.4. Redes con diversos nodos	37
3.4.1. Enfoque probabilístico	38
3.4.2. Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria	39
3.4.3. Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio	39
4. Conclusiones	43
4.1. Trabajo futuro	44
Bibliografía	47

Índice de figuras

1.1. Estrategia de transmisión de <i>beacon</i> para maximizar la probabilidad de encuentro cuando las ranuras de los nodos no están alineadas.	4
2.1. Desfase entre los inicios de los marcos de dos nodos debido al asincronismo de sus relojes.	8
2.2. Rejilla de un marco de 10 ranuras.	8
2.3. Superrejilla para un marco de 10 ranuras, se muestran los desfases posibles entre los marcos y las ranuras en las que los dispositivos desfasados pueden empatar en el marco n ó $n + 1$	9
2.4. Comportamiento de la Ecuación 2.2, de la cual se puede extraer cuál es el tamaño mínimo de las superrejillas.	12
3.1. Comparación de marcos de coincidencia entre dos nodos tipo AA con enfoque probabilístico y enfoque apriorístico i.d. técnica de la rejilla para marcos de 100, 500 y 1000 ranuras.	31
3.2. Comparación del modelo teórico y resultados de la simulación en el enfoque probabilístico para dos nodos tipo A y B con marco de 100, 500 y 1000 ranuras.	34
3.3. Comparación del modelo teórico y resultados de la simulación en el enfoque apriorístico - aleatorio con memoria para dos nodos, uno tipo A y el otro B.	35
3.4. Resultados del enfoque apriorístico - pseudoaleatorio para dos nodos, uno tipo A y el otro B, en una simulación de 100,000 pruebas.	36
3.5. Comparación entre el modelo teórico y los resultados de la simulación en el enfoque probabilístico para dos nodos tipo B.	38
3.6. Marcos promedio requeridos por cada enfoque para descubrir su vecindario completo al variar la cantidad de dispositivos tipo B en la red.	40

3.7. Resultados de la simulación para los tres enfoques mostrados cuando las redes con descubrimiento total de vecinos aceptan a un nuevo elemento. 41

Introducción

Actualmente, la gran facilidad con la que se puede desplegar una red entre diversos tipos de aparatos, ha permitido que exista una gran interconexión en diversas escalas; desde grandes enlaces satelitales que conectan los distintos continentes, hasta instrumentos de tamaño nanoscópico que pueden transportar sustancias a cualquier lugar del cuerpo humano.

Sin duda, en el día a día, los seres humanos generan redes a través de dispositivos electrónicos de uso constante como lo son: relojes, asistentes personales, teléfonos inteligentes, reproductores de música, sensores de monitoreo, vehículos, electrodomésticos. Prácticamente se logra que una gran cantidad de utensilios con el *hardware* adecuado para transmitir y recibir información puedan vincularse entre sí. Lo anterior derivó en la formulación del concepto: Internet de las Cosas [IoT].

En las redes de IoT, que la mayor de las veces son autónomas y operan con baterías, el descubrimiento de vecinos es indispensable tanto en la parte inicial del despliegue como en cualquier otra etapa del proceso operativo. Los enfoques clásicos empleados para transmitir y recibir señales en la búsqueda de la topología completa de la red consumen gran cantidad de energía en las labores de sensado del medio y envío de paquetes. Así mismo, la dificultad de brindar frecuente mantenimiento a algunos dispositivos por su ubicación, la limitada energía que pueden contener las baterías o la lenta recolección de potencia del ambiente son algunas de las dificultades que presentan las redes inalámbricas de IoT respecto al consumo de energía.

El desarrollo del presente trabajo de tesis tuvo como axiomas los argumentos anteriores; de esta manera, se busca encaminar la línea de trabajo de las redes de datos para que puedan operar con un gran ahorro energético y así mantener a la vanguardia el uso de los grandes avances tecnológicos que se emplean cotidianamente.

Justificación

En las redes de datos, existen protocolos que operan a nivel de la capa de acceso al medio [MAC] enfocados en reducir el consumo de energía de los dispositivos de la red durante su funcionamiento. Un trabajo pionero en desarrollar esta técnica de optimización es el protocolo S-MAC[1].

Posteriores al trabajo mencionado, surgieron otras contribuciones como: X-MAC[2], RI-MAC[3] y A-MAC[4], en los cuales, la prioridad también es optimizar el consumo de energía de los dispositivos o nodos de la red, logrando eficiencia respecto a los trabajos anteriores con algunas variantes en cada protocolo.

Sin embargo, en todos estos protocolos sólo se habla de que es requerido llevar a cabo el proceso de descubrimiento de vecinos más no de cómo realizar esta operación, o en algunos casos se asume que los dispositivos tienen ya conocimiento de esta información.

Así mismo, dada la aparición de tecnologías con recursos energéticos limitados, éstos tienen que operar con ciclos de trabajo bajos, es decir, el hardware de estos equipos permanece la mayor parte de tiempo en un estado de consumo mínimo o nulo de energía y entran en funcionamiento sólo en periodos cortos de tiempo.

Lo anterior se debe al continuo desarrollo de las tecnologías del Internet de las cosas, donde los dispositivos de bajo consumo energético se enfocan en operar en escenarios donde las redes son descentralizadas y autoorganizadas y se prescinde de elementos centrales, ya sea porque la cantidad de dispositivos rebasa la capacidad de coordinación o simplemente porque no es posible la presencia de los mecanismos para tomar lecturas simultáneas. Esto ha traído el desarrollo de aplicaciones en áreas como la atención médica, los edificios inteligentes, la manufactura de artículos con producción en cadena y el transporte inteligente[5]. Es dentro de estos escenarios sin infraestructura donde los dispositivos deben de realizar el descubrimiento de vecinos con la premisa de la restricción del consumo de energía.

De las primeras ideas que vienen a la cabeza para resolver el problema de descubrimiento de vecinos, es designar ciertas ranuras fijas del ciclo de operación donde sólo se enciendan los sensores, de tal forma que éstos coincidan en dichos espacios previamente definidos en tiempo constante, $O(1)$. Sin embargo, el problema de esto radica en que al ser dispositivos autónomos no se tiene conocimiento sobre el momento en que el otro dispositivo entrará en operación; generándose así un desfase en los relojes, y en consecuencia, los nodos no se descubrirían como vecinos.

Una segunda aproximación para atacar el problema es utilizar un método probabilístico, en el que los dispositivos elijan de manera aleatoria las ranuras en las que trabajarán al iniciar cada ciclo. De esta manera, el éxito de coincidir en cierta posición dependerá del azar, habiendo casos en los que el encuentro ocurra muy pronto y otros en los que no. Para considerar un valor uniforme en esta técnica se utiliza un valor promedio para caracterizar el tiempo de encuentro de los vecinos.

La motivación de esta tesis es minimizar el tiempo de encuentro de los vecinos en dispositivos que trabajan con pocos recursos energéticos.

Hipótesis

Una técnica de optimización de ranuras de transmisión hace posible disminuir el tiempo de encuentro entre vecinos para nodos que operan con un ciclo bajo de trabajo.

Meta

Diseñar, desarrollar, caracterizar y simular una técnica que realice el descubrimiento de vecinos en nodos que operan con pocos recursos energéticos, minimizando el tiempo en el que los nodos conocen su vecindario.

Metas específicas

- Caracterización, mediante su correspondiente modelo analítico; y simulación de un modelo de búsqueda de vecinos aleatoria.
- Desarrollo de la técnica enfocada en modelos de redes con ciclos de trabajo bajos mediante la cual se puede descubrir el vecindario de cierto nodo.
- Construcción del modelo analítico para la técnica mencionada en el punto anterior y comparación con el modelo obtenido de la búsqueda aleatoria.
- Simulación de la técnica propuesta y comparación de resultados con el modelo que utiliza búsqueda aleatoria.

Planteamiento del problema

Para alcanzar la meta señalada se tienen las siguientes consideraciones:

- Los nodos de la red son capaces de entrar en tres modos de operación:
 - a) Estado activo, en el cual se realiza la transmisión de la señal y se da el mayor consumo de energía.
 - b) Estado pasivo o perezoso (*idle*), en el que el nodo es capaz de escuchar y recibir señales utilizando una menor cantidad de energía que el estado activo.
 - c) Estado dormido, en el cual el nodo no puede realizar ninguna operación de comunicación y el consumo de energía es mínimo.
- La duración del funcionamiento de los dispositivos estará segmentada en ranuras de tiempo (*slots*) de duración fija d con identificadores consecutivos enteros.
- Un conjunto de r ranuras de tiempo forman un *frame* o marco f , el cual también es identificado por un número entero consecutivo.
- Dentro de un marco, los nodos pueden entrar en estado activo/pasivo sólo en ciertas ranuras y el resto del ciclo permanecer en estado dormido. Se define el ciclo de trabajo de un nodo como el cociente del número de ranuras en las que el nodo se encuentra en estado activo/pasivo dividido entre el número de ranuras totales que tiene un marco.
- Dentro de la red, puede darse la existencia de dos tipos de nodos cuya diferencia es el ciclo de trabajo de operación.
- Se considera que el periodo de ranura es igual para todos los nodos, es decir, las ranuras tienen la misma duración y éstas inician y terminan de manera coordinada, pero cada nodo inicia su marco en diferente instante lo que da origen a los desfases entre los dispositivos.

El tipo de red que se considera para la operación de la técnica desarrollada es una red de sensores inalámbrica, *wireless sensor network* [WSN] que opera en modo Ad-Hoc. Lo anterior permite que la red de dispositivos opere sin infraestructura, generando una amplia escalabilidad en el tamaño de la red. Además, la técnica es extendible a tecnologías empleadas en IoT del tipo *radio frequency identification tag* [RFID-tag] activo.

Además, se define el tiempo de encuentro e_n como el número de marcos que requiere una red de n nodos para encontrar a los $n-1$ nodos restantes. De esta forma, e_n es la función objetivo que se desea minimizar.

Metodología

Los dispositivos de red se modelarán como nodos $u \in V$ de un grafo y los enlaces entre los nodos se modelarán como el conjunto de aristas $(u, v) \in E$ con $u \neq v$. De esta forma, una red estará formada por un conjunto de nodos y aristas $G(V, E)$. Se dice que un nodo v es vecino de otro nodo u si existe una arista en E que conecte a los nodos u y v , es decir $(u, v) \in E \rightarrow v \in N(u)$, donde $N(u)$ es el conjunto de nodos que se encuentran a un salto de u .

Enseguida, se expondrán un par de enfoques para analizar el tiempo requerido en el descubrimiento del vecindario de una red. El primero, denominado *Enfoque probabilístico*, corresponde a un método probabilístico y el segundo, llamado *Enfoque apriorístico*, corresponde a un método que utiliza la *Técnica de la rejilla* introducida en este trabajo. Para ambos enfoques se realizarán las simulaciones correspondientes, en las cuales se consideran los ciclos bajos de trabajo usando tipos de nodos diferentes, además de la existencia de un tiempo aleatorio para el inicio de operación entre los nodos (pequeño desfase, *sh*) denominado *shift*.

En las simulaciones del primer enfoque se emplea un método probabilístico en el cual, de acuerdo a su ciclo de trabajo, los nodos eligen de manera aleatoria las ranuras en las cuales se encienden para intentar coincidir con su vecino y entablar comunicación durante cierto marco.

Para las simulaciones del segundo enfoque los dispositivos sólo se encienden en ciertos índices de trabajo definidos mediante una *rejilla*, basada en el ciclo de trabajo del nodo, la cual se calcula de manera previa para que sin importar el desfase que se tenga entre los nodos haya al menos una ranura de coincidencia y se pueda garantizar la comunicación entre los dispositivos.

Una vez obtenidos los resultados se realiza una comparación entre las simulaciones de ambos enfoques y se cuantifica la disminución del tiempo consumido en el descubrimiento del vecindario de la red del enfoque clásico contra el enfoque que utiliza la técnica propuesta.

Así, una ventaja del funcionamiento de la técnica propuesta es que se extiende a cualquier otro algoritmo que implique el descubrimiento de vecinos en la red, como lo son los algoritmos S-MAC, X-MAC, RI-MAC y A-MAC, por lo que se podrá garantizar una optimización de tiempo para cada uno de ellos.

Contribución y relevancia

La relevancia de este trabajo de investigación consiste en la propuesta de una técnica que opera de manera previa a cualquiera de los protocolos de bajo con-

sumo energético [1], [2], [3], [4] para realizar el descubrimiento de los vecinos de la red en un tiempo mínimo. De esta manera, lo que se obtiene es una técnica de optimización de tiempo con la que una vez asegurado el descubrimiento del vecindario completo, se puede utilizar cualquier otro protocolo, disminuyendo el consumo energético, ya que los protocolos conocidos para la optimización manejan operaciones de sensado y descubrimiento con alto gasto de potencia.

La técnica propuesta en esta tesis, a pesar de considerar totalmente aleatorio el tiempo de inicio de operación, plantea que un ciclo de trabajo o marco está dividido en ranuras, para las cuales el dispositivo sólo entrará en modo activo en cierto número de éstas y el resto permanecerá en modo pasivo para no consumir energía. De esta manera, queda definido el ciclo de trabajo de los dispositivos como el porcentaje del total del tiempo del marco que el nodo esté encendido. Así, nuestra técnica minimiza la cantidad de marcos necesarios para el conocimiento de la red completa operando de forma apriorística para lograr coincidencias entre los nodos y con esto competir contra un paradigma aleatorio en el cual no se establece un orden para que los nodos despierten y conozcan a sus vecinos.

Organización del trabajo

Para el desarrollo de esta tesis se sigue el siguiente orden: En el Capítulo 1, se presenta el estado del arte referente a trabajos que tratan sobre la búsqueda de vecinos en redes; en el Capítulo 2, se argumenta y describe el método de búsqueda de vecinos utilizando la técnica propuesta acompañado de su correspondiente modelo analítico con la finalidad de realizar una comparativa con el modelo probabilístico; posteriormente, en el Capítulo 3, se presenta la experimentación realizada, así como los resultados obtenidos.

Capítulo 1

Estado del arte

La definición más aceptada respecto al concepto de descubrimiento de vecinos corresponde a que: *Es el proceso de identificar todos los nodos con los que un dispositivo determinado puede comunicarse directamente.*

El descubrimiento de vecinos, *neighbor discovery* [ND] es un proceso indispensable tanto en la parte inicial del despliegue de una red inalámbrica como en cualquier otra etapa del proceso de operación. Lo anterior, por un posible aumento de dispositivos en la red o simplemente para garantizar la comunicación entre los dispositivos. De igual forma, requiere efectuarse para prevenir colisiones y encaminar de mejor manera la información entre los nodos.

Debido al veloz desarrollo de dispositivos aplicados al Internet de las cosas, algunas de las áreas en las que ha aportado esta tecnología son: la agricultura, el monitoreo ambiental, el desarrollo industrial, la biomedicina, la milicia, entre otras.

Al iniciar el desarrollo de las redes de sensores inalámbricas, la forma principal de operación de los dispositivos consistía en mantenerse activos de forma continua ya que el ambiente de aplicación es relativamente sencillo. Sin embargo, rápidamente las WSN evolucionaron hacia redes autorganizadas lo que permitió que los sensores operaran con energía muy limitada.

La principal dificultad en el desarrollo de protocolos efectivos para el descubrimiento de vecinos radica en obtener un balance entre el ahorro de energía y la mitigación del tiempo de descubrimiento del vecindario completo. Esto como una consecuencia de la forma en que los dispositivos operan con periodos alternados de estados activos y pasivos para hacer eficiente su consumo de energía.

Así, los principales retos que deben considerarse en el desarrollo de protocolos del ND son:

- Restricción energética.
- Asincronismo en el tiempo de la red.
- Longitud de los ciclos de trabajo.

Las principales métricas empleadas para cuantificar el rendimiento de los protocolos usados en el descubrimiento de vecinos son:

- Retardo de descubrimiento (*discovery delay*): Este concepto es la métrica principal para comparar el rendimiento de los protocolos; hace referencia al tiempo requerido para lograr el descubrimiento de vecinos.
- Soporte de granularidad en los ciclos de trabajo (*granularity in duty cycle support*): Se refiere al principio computacional en el que es más fácil trabajar con unidades más pequeñas, ya que así es posible sólo seleccionar aquello que nos interesa y descartar lo que no es adecuado para el contexto. En este sentido la idea corresponde a que los ciclos de trabajo sean atomizados y permitan la preservación de energía.
- Robustez contra desfase de reloj (*robustness against clock drift*): Esta métrica corresponde a la fortaleza que debe tener el protocolo de descubrimiento cuando haya un desfase en los relojes de los dispositivos.
- Diversidad de descubrimiento (*discovery diversity*): Para los casos en los que las redes trabajan con varios canales se busca que el proceso de descubrimiento se pueda lograr en varios canales para minimizar la probabilidad de que la acción de búsqueda falle debido a interferencias en los canales inalámbricos.

1.1. Trabajo relacionado

Con el paso del tiempo han aparecido muchos protocolos para lograr ND. Éstos se han clasificado de acuerdo a varias características.

1. Protocolos directos: Aquellos procedimientos en los cuales un nodo es descubierto por otro dispositivo vecino sólo si el vecino escucha directamente la señal del nodo.

Protocolos indirectos: Este enfoque es caracterizado porque usa los protocolos directos para formar bloques y aprovechar la colaboración entre los nodos descubiertos directamente para encontrar nuevos vecinos de forma indirecta.

En un nivel más profundo una segunda clasificación considera a los protocolos directos como elementales en el procedimiento de búsqueda de vecinos, por lo que éstos se pueden categorizar en:

2. Protocolos probabilísticos: Se considera que en esta categoría los dispositivos carecen de memoria (*memoryless*) y éstos basan el éxito del descubrimiento en torno a los eventos favorables. Como unidad de medida consideran el caso promedio para medir su rendimiento en cuanto al retardo, sin embargo, existen casos en los que estos protocolos toman demasiado tiempo, aumentando la latencia, por lo que pueden ser no confiables.

Protocolos determinísticos: Esta categoría considera que los nodos operan de acuerdo a una agenda de trabajo diseñada cuidadosamente para garantizar que cualquier par de nodos pueda despertar en una ranura común. El principal reto de estos protocolos consiste en cómo diseñar las agendas de operación activa y garantizar el descubrimiento.

Algunas subcategorías de trabajos desarrollados como protocolos probabilísticos son:

- *Baseline Aloha-like protocols* [6] [7]
- *Probabilistic protocols with directional antennas* [10] [11]
- *Aloha-like protocols with collision detection and unknown number of neighbors* [8]
- *Neighbor discovery in multi-channel wireless networks* [12] [13] [14]
- *Aloha-like protocol with multi-packet reception* [9]
- *Neighbor discovery in wireless sensor networks* [15] [16]

Del listado anterior describiremos la línea de trabajo del último punto ya que ésta sigue las condiciones que tenemos para el presente trabajo de tesis:

En [15] consideran una red con un gran número de sensores desplegados en una determinada área, donde el método de descubrimiento es caracterizado por

un proceso de Markov modelado con un autómata finito que está en función de la probabilidad de su distribución que es considerada de tipo Poisson.

Por otro lado, en [16] se enfocan en el proceso de mantener la información a partir de un previo descubrimiento de vecindario inicial. Su trabajo se concentra en un algoritmo para el continuo descubrimiento de nuevos vecinos mediante el uso de mensajes SYNC enviados en modo *broadcast*.

Por otro lado, algunas subclases de trabajos desarrollados mediante enfoques determinísticos son:

- *Quorum-based approaches* [1] [17] [18]
- *Co-primality-based approaches*:
 - *Disco* [19]
 - *U-Connect* [20]
- *Searchlight* [21]

De las clasificaciones anteriores, es atractivo *disco*, el trabajo hecho en [19], en el cual se realiza una adaptación del teorema chino del residuo para plantear las agendas de operación de los nodos; y más aún, proponen que cada nodo envíe un *beacon* al inicio y final de cada ranura de operación activa maximizando así la probabilidad de que las ranuras superpuestas hagan asequible el descubrimiento de vecinos. Lo anterior se puede visualizar en la Figura 1.1.

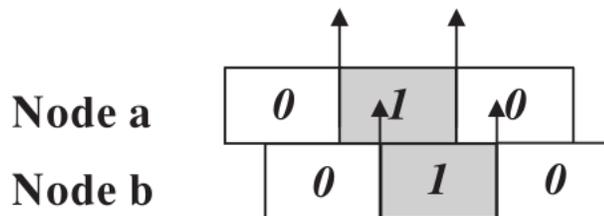


Figura 1.1: Estrategia de transmisión de *beacon* para maximizar la probabilidad de encuentro cuando las ranuras de los nodos no están alineadas.

Como se ha comentado en esta sección, los protocolos probabilísticos debido a que carecen de un estado de memoria tienden a ser estacionarios y logran un buen comportamiento en el caso promedio, aunque los niveles de garantía en el descubrimiento no son certeros.

También se mencionó que los protocolos determinísticos tienen un buen resultado en los peores casos debido a su premeditado diseño de las agendas de trabajo, pero usualmente se espera un retardo mayor para el descubrimiento de los vecinos.

Como consecuencia de los puntos anteriores surge la pregunta natural de cómo encontrar una solución híbrida entre los dos tipos de enfoques en los cuales se consiga un balance deseado entre el peor caso y el tiempo promedio de retardo para lograr el ND. Lo anterior lleva a la búsqueda de cómo introducir un componente probabilístico en una agenda de trabajo determinística.

En este trabajo de tesis, la propuesta con la que se busca lograr la disminución en el tiempo de encuentro del vecindario completo se basa de manera primaria en una agenda de trabajo diseñada de manera previa, con la que enseguida los nodos realizarán el descubrimiento directo de vecinos y se complementará el proceso mediante el paso de información para realizar búsquedas indirectas. Por todos los componentes anteriores podemos asumir que el protocolo que detallaremos en el Capítulo 2 es un *protocolo híbrido*.

Capítulo 2

Desarrollo

El siguiente capítulo se divide en dos secciones. En la primer sección, 2.1, se describe la técnica de elección de ranuras de transmisión que da las bases para el diseño y desarrollo de un enfoque de descubrimiento de vecinos que optimiza el tiempo de encuentro comparado con otros métodos de búsqueda. Una vez descrito este proceso en la Sección 2.2 se realiza el correspondiente análisis teórico de los diversos enfoques de búsqueda de vecinos que se describen en este trabajo.

2.1. Técnica de la rejilla

La principal consideración que se tiene en este trabajo para el descubrimiento de vecinos es que el tiempo está segmentado en pequeñas unidades conocidas como ranuras y que un conjunto de r ranuras forman un marco, S . Las ranuras de cada marco son numeradas consecutivamente comenzando con el índice cero. A partir de estos conceptos se define lo siguiente:

El *ciclo de trabajo* D_c de un nodo está determinado por el número de ranuras que permanece el dispositivo en estado activo/pasivo (s_{on}) respecto a la cantidad de ranuras r que integran un marco, es decir, $D_c = \frac{s_{on}}{S}$. Este valor se expresa como un porcentaje. Por ejemplo:

Un dispositivo que siempre se encuentra encendido tiene un ciclo de trabajo del 100 %.

Por el contrario, un nodo que permanezca en estado dormido a lo largo de todo el marco es un dispositivo con ciclo de trabajo del 0 %.

Si un marco tiene 200 ranuras y el dispositivo se activa en 30 de esas ranuras,

el ciclo de trabajo es del 15%.¹

Es importante observar que dos nodos pueden operar con el mismo ciclo de trabajo y tener tamaños de marcos distintos.

A pesar de que se asume que los relojes de los nodos no están sincronizados, para el desarrollo de la técnica de la rejilla se supondrá que los tiempos de desfase (*shifts*) entre los inicios de los ciclos de trabajo para cualesquiera dos nodos son unidades enteras de ranuras. Esto se puede visualizar en la Figura 2.1.

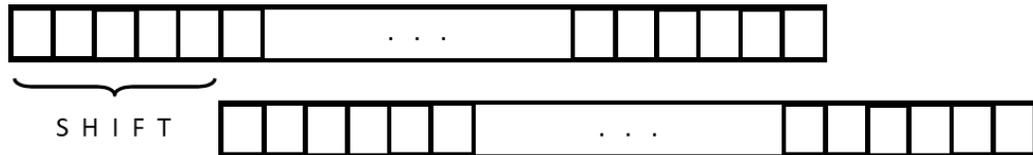


Figura 2.1: Desfase entre los inicios de los marcos de dos nodos debido al asincronismo de sus relojes.

Como planteamiento inicial de la técnica propuesta y con base en lo anterior se desarrolla la siguiente:

Una *rejilla* es un subconjunto de ranuras de un marco. En lo sucesivo se denominará *superrejilla* Ξ si para todos los nodos que elijan el mismo subconjunto de índices por rejilla y considerando cualquier *shift* arbitrario entre los dispositivos², el conjunto elegido permite que al traslapar los marcos de los nodos en un lapso de tiempo en particular, se obtiene en un instante (lo que dure la ranura) al menos una intersección entre las ranuras resaltadas por las rejillas, aún cuando los índices de identificación sean distintos pudiendo ser incluso del siguiente marco.

Para clarificar el concepto de superrejilla se pueden apreciar las Figuras 2.2 y 2.3.

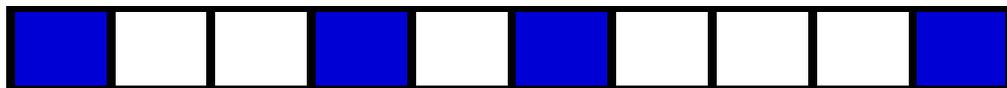


Figura 2.2: Rejilla de un marco de 10 ranuras.

En la Figura 2.3 si existiera un desfase de diez ranuras (*sh-10*), éste empataría con el siguiente marco como si se tratara de un *shift* de cero ranuras (*sh-0*). Por

¹Este mismo ciclo se obtiene si el marco fuera de 100 ranuras y el nodo se activa en sólo 15.

²El desfase *sh* entre los marcos puede tener tamaño: $0 \leq sh < S$.

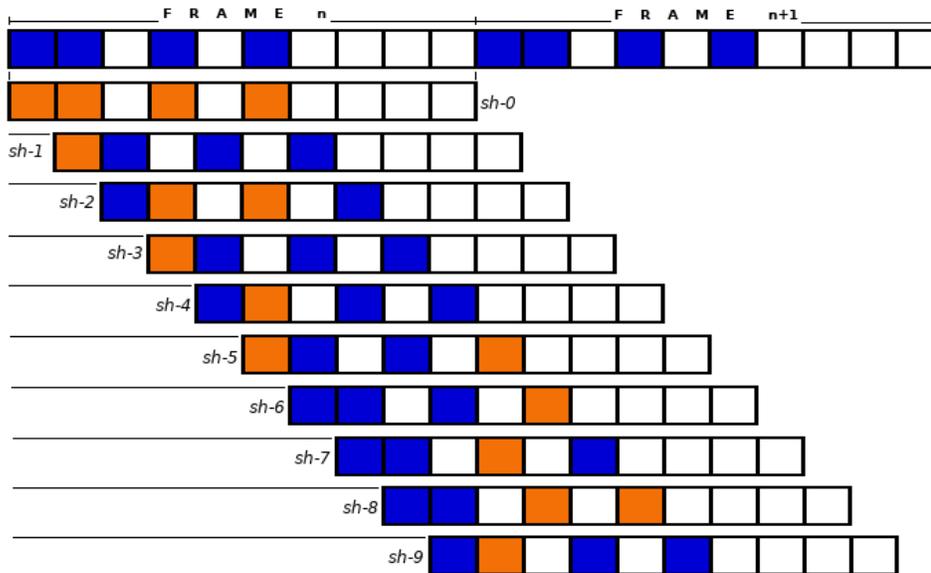


Figura 2.3: Superrejilla para un marco de 10 ranuras, se muestran los desfases posibles entre los marcos y las ranuras en las que los dispositivos desfasados pueden empatar en el marco n ó $n + 1$

esta razón no se consideran *shifts* de tamaño mayor o igual que el tamaño del marco.

También se contempla en la Figura 2.3, que para todos los marcos que se encuentran desplazados de cero a nueve posiciones ($sh-0\sim 9$), se tiene alguna ranura de coincidencia con los marcos señalados como n y/o $n + 1$.

Puesto que la elección de ranuras de la rejilla es la clave para lograr la eficiencia energética, se busca que el tamaño de ésta sea el mínimo. A continuación se aborda cómo obtener una superrejilla y enseguida cómo lograr que sea la más pequeña posible.

2.1.1. Diseño de la rejilla

Como se había mencionado, los ciclos de trabajo están determinados por el cociente que existe entre las ranuras en las que el dispositivo se encuentra operando s_{on} y el tamaño total del marco S . El valor de este numerador es ajeno al tamaño requerido para la superrejilla; sin embargo, se cumple que la cardinalidad de la rejilla será una cota superior para delimitar el porcentaje del ciclo de operación en

los dispositivos.

Al determinar los índices necesarios en una superrejilla, se debe considerar que:

Para cada *shift* i entre dos marcos, se tiene un *inverso* que corresponde al desfase con índice $S - i$, tal que $0 \leq i \leq S$; para el marco anterior o consecutivo de alguno de ellos. Por ejemplo:

En la Figura 2.3 puede observarse que si se toma como referencia el marco que lleva un desfase de nueve ranuras ($sh-9$) con respecto al marco n , se tiene que este marco desfasado tiene un *shift* relativo al marco $n + 1$ de una ranura ($sh-1$). Se dice entonces que $sh - 1$ y $sh - 9$ son inversos y además éstos tienen el mismo número de coincidencias con los marcos tomados como referencias.

Lo anterior permite que el problema sea simétrico; de esta manera en lugar de buscar superrejillas considerando la longitud total del marco es suficiente considerar la mitad del marco, es decir: $\frac{S}{2}$.

La característica principal que debe considerarse para elegir a los k índices que pertenecerán a la superrejilla Ξ para un cierto tamaño de marco S , es que al obtener todas las combinaciones $\binom{k}{2}$, la unión de las diferencias absolutas obtenidas entre los números que aparecen en cada pareja sea el conjunto consecutivo de 1 hasta $\lceil \frac{S}{2} \rceil$, como lo expresa la Ecuación 2.1:

$$\{|k_j - k_i| : k_i, k_j \in \Xi \text{ con } i \neq j\} = \left\{1, 2, \dots, \lceil \frac{S}{2} \rceil\right\} \quad (2.1)$$

De acuerdo al requisito sobre los índices de la rejilla mencionado antes y bajo la premisa de que se busca una superrejilla del menor tamaño posible, ya que los índices considerados para Ξ representan ranuras de operación activa en los nodos, se tiene la siguiente:

Para obtener el menor de los elementos del conjunto requerido, en la rejilla deben de aparecer al menos un par de índices consecutivos k_i, k_{i+1} , mientras que para obtener el mayor de los elementos para el conjunto precisado ($\lceil \frac{S}{2} \rceil$), éste se obtendrá de la diferencia entre el mayor y el menor de los índices de la rejilla Ξ . Los demás valores para el conjunto deseado saldrán de las diferencias entre valores dentro del rango marcado por los límites comentados, definiéndose así el rango máximo para los índices de la rejilla.

Supóngase que se da el caso de que la diferencia entre los índices mayor y menor fuera más grande que el límite $\lceil \frac{S}{2} \rceil$ y que este valor se produzca con la diferencia de un índice mayor al más pequeño, esto produciría que aparecieran más valores de diferencias y que la rejilla no fuera mínima. Así que, basta con recorrer los límites hasta donde se obtenga el elemento mayor del conjunto esperado

y estos valores delimitarán el rango para la obtención de la rejilla. En caso de que el elemento mayor no apareciera entonces se deben incrementar los índices de la rejilla.

Un algoritmo sencillo para obtener los elementos de una superrejilla para marcos de tamaño S se describe a continuación:

Algoritmo 1. *Búsqueda sencilla de superrejilla*

1. Tomar n números consecutivos a partir de 1, con $1 \leq n \leq \left\lceil \frac{S}{2} \right\rceil + 1$. Este subconjunto será denominado *cubierta* y la cardinalidad de este conjunto será denominada *rango base*.
2. Agregar al conjunto un elemento cuya diferencia con el elemento mayor de la cubierta sea el rango base sólo si este elemento no rebasa al límite $\left\lceil \frac{S}{2} \right\rceil + 1$.
3. De manera análoga, repetir el paso anterior hasta alcanzar un valor $k_i \leq \left\lceil \frac{S}{2} \right\rceil + 1$. En caso de que el último elemento no haya sido el valor $\left\lceil \frac{S}{2} \right\rceil + 1$ deseado, éste se agrega al conjunto.

Analicemos el siguiente ejemplo:

Obtener una superrejilla para un marco de 40 ranuras. Aquí se tiene $S = 40$.

1. Cubierta: $\{1, 2, 3, 4\}$. Rango base: 4.
2. $\{1, 2, 3, 4\} \cup \{8\} \cup \{12\} \cup \{16\} \cup \{20\}$
3. $\{1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 20\} \cup \{21\}$

Así, $\Xi = \{1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 20, 21\}$.

El Algoritmo 1 se utilizó en el cálculo de la superrejilla de la Figura 2.3.

2.1.2. Cardinalidad de la rejilla

Para lograr que la superrejilla obtenida mediante el Algoritmo 1 sea de tamaño mínimo, se observa el comportamiento de la Ecuación 2.2, la cual describe la cardinalidad de la rejilla para marcos de tamaño S con base en el número de elementos n de la cubierta mencionada en el paso 1 del algoritmo.

$$|\Xi| = \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{S}{2} \right\rceil - n}{n} \right\rceil + n \quad (2.2)$$

Donde:

$|\Xi| = c$: Cardinalidad de la rejilla

S : Tamaño del marco

n : Tamaño de la cubierta

A continuación, se muestra en la Figura 2.4, el comportamiento de la Ecuación 2.2 para algunos marcos destacados de hasta 1000 ranuras de tamaño y los puntos dónde se alcanzan los mínimos.

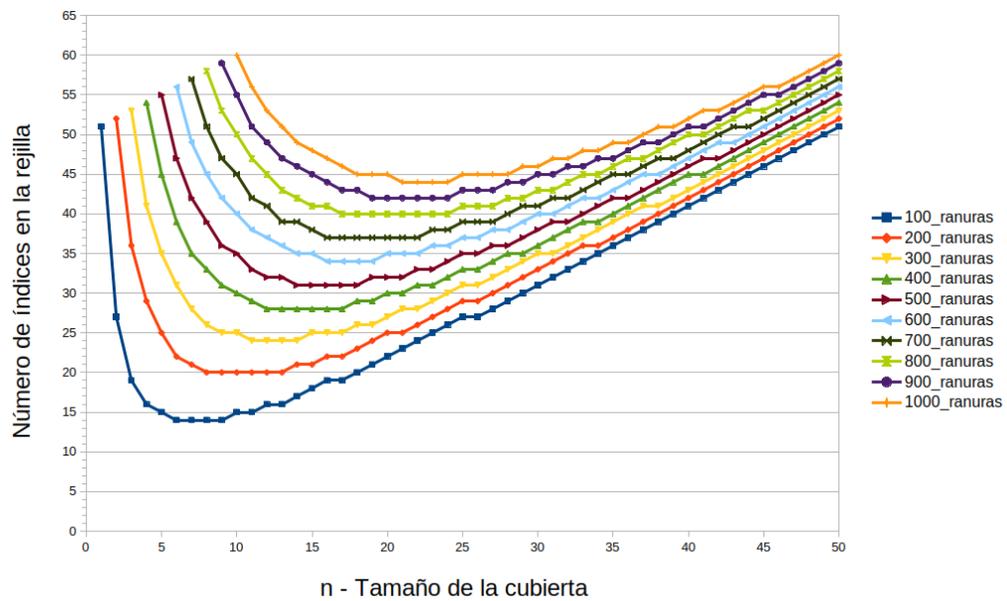


Figura 2.4: Comportamiento de la Ecuación 2.2, de la cual se puede extraer cuál es el tamaño mínimo de las superrejillas.

Así mismo, en la Tabla 2.1, señala la cardinalidad de las superrejillas mínimas para los distintos tamaños de marcos que se graficaron:

Tamaño de marco [S]	Índices de rejilla [c]
100	14
200	20
300	24
400	28
500	31
600	34
700	37
800	40
900	42
1000	44
10000	141

Tabla 2.1: Número mínimo de índices necesarios para las superrejillas según el tamaño de su marco de acuerdo a lo modelado por la Ecuación 2.2.

De acuerdo a la gráfica mostrada en la Figura 2.4 estos mínimos se alcanzan con diferentes tamaños de cubiertas, por lo que las superrejillas pueden ser distintas. Así mismo, el Algoritmo 1 propuesto es sólo una técnica rápida para encontrar rejillas, sin embargo no es la única manera de encontrarlas.

2.1.3. Ciclos de trabajo de los dispositivos

Para la técnica de optimización propuesta en este trabajo de tesis, se consideran dos tipos de nodos: los primeros serán definidos como nodos tipo *A* y los segundos serán denominados nodos tipo *B*.

Los nodos tipo *A* son dispositivos que operan en todas las ranuras que determina la superrejilla de acuerdo al tamaño del marco. Por otro lado, los nodos tipo *B* sólo se encienden durante una ranura del marco.

Así, la cantidad de ranuras con las que cuente un marco será la clave para determinar los ciclos de trabajo de los nodos tipo *A* o tipo *B*. Como ejemplos se tienen:

Para la superrejilla mostrada en la Figura 2.3, un nodo *A* opera con un ciclo de trabajo del 40 %, mientras que un nodo *B* lo hace con un 10 %; por otro lado, para el caso comentado en el ejemplo de la página 11, un nodo *A* tiene un ciclo de trabajo del 22.5 % y un nodo *B* opera con un ciclo de trabajo del 2.5 %.

Conforme se va incrementando la cantidad de ranuras de los marcos, los ciclos de operación irán disminuyendo tanto para los nodos tipo *A* como para los nodos

tipo B. Para ilustrar la idea puede observarse la Tabla 2.2.

Tamaño de marco [<i>S</i>]	Índices de rejilla [<i>c</i>]	Ciclos de trabajo	
		Nodo A	Nodo B
10	4	40 %	10 %
40	9	22.5 %	4 %
100	14	14 %	1 %
200	20	10 %	0.5 %
300	24	8 %	0.33 %
400	28	5 %	0.25 %
500	31	6.2 %	0.2 %
600	34	5.66 %	0.16 %
700	37	5.28 %	0.14 %
800	40	5 %	0.12
900	42	4.66 %	0.11
1000	44	4.4 %	0.1 %
10000	141	1.41 %	0.01 %

Tabla 2.2: Valores de los ciclos de trabajo para nodos tipo A y B según el tamaño de los marcos.

Como el presente trabajo está enfocado a redes de sensores con recursos limitados energéticos, se considerarán los casos a partir de que los nodos tipo B tienen un ciclo menor o igual al 1 %. Por lo que los casos base serán considerando marcos de 100 ranuras.

Pudieran definirse algunos nodos con ciclos de trabajo intermedios a los propuestos como máximo (tipo A) y mínimo (tipo B) dentro de la categoría de bajo consumo energético, sin embargo, se considerarán los extremos ya que se busca plantear una cota inferior para el proceso de descubrimiento de vecinos.

2.1.4. Funcionamiento de la técnica de la rejilla

Recordemos que el objetivo principal que persigue esta técnica es permitir que todos los nodos de la red puedan realizar el descubrimiento de su vecindario en el menor tiempo posible.

Gracias a la forma en que se ha definido el concepto de superrejilla se tiene que, sin importar los diversos desfases que haya entre los nodos de tipo A, éstos tendrían al menos una ranura en común en la cual estarían operando de forma

activa y podría iniciarse el intercambio de comunicación. Sin embargo, puesto que se traslada este problema a redes donde sus nodos buscan consumir la cantidad mínima de energía, la mayoría de éstos son de tipo B.

Es por esto que para el desarrollo de nuestra técnica se debe considerar en la red que a lo más aparece un nodo tipo A, que sirve como referencia y que en algún momento con alto grado probabilidad se convertirá en un nodo *clusterhead*; y el resto de los dispositivos que aparecen son nodos tipo B.

El caso más sencillo en el que se explica el funcionamiento de la técnica es cuando se tiene un nodo A y un nodo B en la red. El desfase que pudiera haber se considera con referencia hacia A y a partir de éste debe observarse el inicio de sus respectivos marcos: A permanecerá activo en todos los índices que indique la superrejilla y B elige sólo uno de los índices de la rejilla. La elección del índice para B puede ser de diversas formas, de momento sólo se contempla que el primer índice elegido no sea aquél con el que se tenía la coincidencia con los índices en los que A está encendido (debido al *shift*)³; lo destacado de este proceso es que el nodo B sólo se encendió en una sola ranura del marco y esto representa un gran ahorro energético. Lo que sigue a este proceso es que el nodo B para el siguiente marco elija otra ranura para encenderse. Por el diseño de la superrejilla se deduce que la dificultad de entablar un encuentro entre los nodos depende de la forma en que el nodo B elija la ranura de operación dentro de los índices que tiene la rejilla.

Lo anterior se generaliza para escenarios en los que la cantidad de nodos B aumenta en la red.

A continuación se describe la forma en la que los nodos B eligen la ranura de la rejilla para intentar tener coincidencia con otros nodos de la red.

2.1.5. Enfoques de la técnica

Considerando que la hipótesis del presente trabajo se concentra en reducir el tiempo de descubrimiento del vecindario completo de cada nodo de la red respecto a la cota media marcada por el proceso de búsqueda aleatoria; a continuación, se describen los enfoques cuyos modelos e implementaciones se compararán:

Enfoque probabilístico

Este enfoque marca el modelo que se pretende superar en cuanto a la mínima cantidad de tiempo requerido para que todos los nodos de la red encuentren su

³Si no existiera un desfase entre los nodos, se garantiza que el encuentro entre A y B ocurre en el primer marco.

vecindario completo.

La idea de este enfoque considera nuevamente, como se explicó para la Figura 2.1, que el inicio de los marcos entre nodos está desfasado por una cantidad entera de ranuras. Principalmente, la idea de este enfoque es que dependiendo del tipo de nodo del que se trate, éste elegirá el número de ranuras en las que puede operar según su ciclo de trabajo de forma aleatoria con probabilidad uniforme para cualquier ranura en cada marco.

Con la elección de las ranuras por parte de los nodos tipo A y B se espera que éstos coincidan en una ranura de operación para un cierto instante y así se dé el descubrimiento del vecindario hasta que esté completo.

En términos comunes, se podría decir que este modelo es totalmente aleatorio en comparación a los siguientes dos enfoques que se presentan, ya que para los próximos enfoques la elección de las ranuras se hace sólo de los índices previamente calculados mediante la superrejilla. Es por esto que se les denomina enfoques apriorísticos⁴.

Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria

Como se comentó en el párrafo anterior, este enfoque y el siguiente se han diseñado de manera anticipada contemplando el uso de la superrejilla. La sutil diferencia entre cada uno de estos enfoques es la manera en que los nodos B eligen su correspondiente ranura del marco para intentar encontrar a algún vecino. Por otro lado, los nodos tipo A, se encienden de forma constante para cada marco en las ranuras que indica la superrejilla.

Para el primero de ellos aleatorio con memoria, los nodos B eligen una ranura de trabajo del conjunto de la rejilla con probabilidad uniforme; y en caso de no tener éxito para coincidir con algún vecino (A o B) para ese marco, el nodo descarta ese índice y utiliza otro de los restantes de la rejilla, aumentando la probabilidad de que ocurra un encuentro con alguno de sus vecinos conforme transcurre la secuencia de marcos.

De esta manera, gracias al diseño de la superrejilla, en la cual se garantiza que al menos existe una ranura en la cual pueden coincidir los nodos, se asegura que el peor caso para que un nodo B encuentre a un nodo A es utilizar todos los índices de la rejilla en el peor orden, es decir: $O(n)$.

⁴Este concepto tiene dos acepciones, la primera: “relacionado con apriorismo”, lo cual se define como “método en que se emplea sistemáticamente el razonamiento yendo de las causas a los efectos y de lo universal a lo particular”; o la segunda: “que es concebido *a priori*” en la cual, la locución latina significa “Con anterioridad a un hecho o a una circunstancia determinados”

Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio

El segundo enfoque apriorístico que se presenta es: *pseudoaleatorio*. Para éste se define el siguiente concepto:

Superframe: Corresponde a una secuencia pseudoaleatoria del orden en que deben utilizarse todos los índices de una superrejilla. Se obtiene a partir de dos semillas, un identificador único, *universally unique identifier* [UUID]⁵ de los nodos y un contador secuencial referente a las veces que se ha generado el superframe para el dispositivo.

En este enfoque, el orden de los índices está determinado por las semillas con las que se calculan los superframes. Para el caso en que se tuviera sólo un nodo A y uno B, el comportamiento para este encuentro sería muy similar al mostrado por el enfoque aleatorio con memoria. Sin embargo, la gran relevancia de este enfoque comienza cuando aparece más de un nodo B en la red. Aquí se asume un intercambio de información fundamental durante la transmisión que se entable en el encuentro de dos nodos. Éstos comparten la información de las dos semillas que sirvieron para la generación del superframe que calcularon y usaron; así como el índice de la secuencia que emplearon durante dicho encuentro, con lo cual se puede calcular el *shift* relativo que existe entre los nodos que es almacenado como un valor relevante.

Así, una vez que haya una coincidencia entre dos nodos y alguno de ellos o los dos inclusive tengan información respecto a otro vecino que hayan encontrado previamente, ésta se comparte entre los nodos y posteriormente el nodo que haya recibido información modifica el próximo índice⁶ que utilizará en el siguiente marco, respetando el resto de la secuencia, para que con una probabilidad de $\frac{1}{2}$ se pueda encontrar a otro vecino y con esto el proceso de descubrimiento de vecindario se realice ágilmente.

Con lo anterior es posible predecir los índices en que un nodo estará trabajando debido a que la secuencia es pseudoaleatoria definida a partir de ciertos parámetros y no aleatoria como lo manejan los enfoques probabilístico y aleatorio con memoria.

A continuación se mostrarán los diversos modelos teóricos que aparecen para las combinaciones entre nodos planteadas. El propósito de los siguientes análisis es calcular los valores que caracterizan cada modelo para realizar su correspondiente comparación entre el enfoque probabilístico y los enfoques apriorísticos.

⁵Puede referirse a la dirección MAC: *media access control* de los dispositivos.

⁶Haciendo el respectivo ajuste de *shift*, índice de superframe, identificador y contador del nodo.

2.2. Modelos Teóricos

2.2.1. Modelos para nodos tipo A-A

En esta sección se proponen los modelos correspondientes al enfoque probabilístico y a la técnica de la rejilla para llevar a cabo el análisis del retardo de descubrimiento para el caso en que se dispone de dos nodos tipo A.

Enfoque probabilístico

Sea s_{on} la cantidad de ranuras que se encienden los nodos tipo A y r la cantidad de ranuras que tiene un marco, El valor esperado para que dos nodos A se encuentren en el n -ésimo marco está dada por la Ecuación 2.3.

$$E[f] = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left(1 - \frac{r - s_{on} P s_{on}}{r P s_{on}}\right) \cdot \left(\frac{r - s_{on} P s_{on}}{r P s_{on}}\right)^{n-1} \quad (2.3)$$

Donde:

- $i P j$ se refiere al concepto de permutación calculada como: $\frac{i!}{(i-j)!}$

Usando la Ecuación 2.3 se puede calcular el valor esperado de los marcos requeridos para dos nodos de tipo A. Se muestran los resultados en la Tabla 2.3 para los distintos tamaños de marco:

Tamaño de marco [r]	Ranuras de encendido [s_{on}]	Valor esperado de marco de encuentro
100	14	1.114456
200	20	1.121746
300	24	1.141796
400	28	1.138463
500	31	1.148004
600	34	1.149116
700	37	1.145311
800	40	1.138752
900	42	1.146784
1000	44	1.152070
10000	141	1.153307

Tabla 2.3: Resultados del valor esperado calculados a partir de la Ecuación 2.3

Puede apreciarse en los resultados de la Tabla 2.3 que conforme va aumentando la cantidad de ranuras de los marcos así también incrementa el valor esperado del marco de encuentro, sin embargo el orden de incremento es en el orden de los milisegundos. Además, se destaca que hay puntos donde hay un pequeño decaimiento en la tendencia que se deben a que el número de ranuras de encendido no tiene el incremento proporcional al tamaño del marco, ya que la Ecuación 2.2 involucra el operador techo.

Técnica de la rejilla

Analizando el mismo modelo comentado en 2.2.1 pero ahora con el empleo de la técnica de la rejilla se tiene que por la definición dada en la página 8 para cualquier tamaño propuesto de marco, si dos nodos operan en todas las ranuras que señala la superrejilla, entonces basta con que transcurra sólo un marco para que se dé el descubrimiento de los nodos.

$$\text{Marcos de encuentro entre dos nodos tipo A} = O(1)$$

Haciendo una comparativa se tiene que el empleo del uso de la técnica de la rejilla muestra un mejor comportamiento ya que el valor ofrecido es constante y menor que el obtenido a través del enfoque probabilístico.

2.2.2. Modelos para nodos A-B

A continuación se presentan los modelos teóricos para el caso en que se tiene un nodo tipo A y un nodo tipo B. Recordando nuevamente que los últimos operan en una única ranura de los marcos.

Enfoque probabilístico

Como primer paso se establece la función de probabilidad de éxito de encuentro para el n -ésimo marco. Lo cual es posible a través de la Ecuación 2.4, donde nuevamente, r representa el tamaño del marco y s_{on} es el número de ranuras en las que opera un nodo tipo A, de acuerdo a su rejilla, y las cuales marcan las posibilidades que tiene el nodo B para elegir y establecer un encuentro entre ambos. El primer término de la ecuación es la probabilidad de éxito y el segundo término es la probabilidad de fracaso elevada a la $n - 1$ que representa el número de intentos previos antes de tener éxito.

$$P(f = n) = \frac{s_{on}}{r} \left(\frac{r - s_{on}}{r} \right)^{n-1} \quad (2.4)$$

Utilizando la definición de valor esperado, Ecuación 2.5, es posible aproximar el valor del marco en que se encontrarán los dos nodos como:

$$\mathbf{E}[f] = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot P(f = n) = \frac{r}{s_{on}} \quad (2.5)$$

A continuación se presenta la Tabla 2.4 con el número de marcos estimados para el encuentro de los nodos A y B de acuerdo al tamaño de sus marcos:

Tamaño del marco [r]	Índices de rejilla [s_{on}]	Marco estimado de encuentro escenario A-B
100	14	7.14285
200	20	10
300	24	12.5
400	28	14.28571
500	31	16.12903
600	34	17.64705
700	37	18.91891
800	40	20
900	42	21.42857
1000	44	22.72727
10000	141	70.92198

Tabla 2.4: Número promedio de marcos para el encuentro de dos nodos A y B usando el enfoque probabilístico

Los resultados de la Tabla 2.4 indican una tendencia creciente en el número de marcos estimados para tener un encuentro entre los nodos tipo A y B conforme aumenta el número de ranuras. Estos resultados son clave para compararlos con los obtenidos con el uso de los enfoques apriorísticos mostrados a continuación.

Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria

Para analizar los enfoques apriorísticos se deben considerar el tamaño del marco y algún cierto *shift*, ya que se puede tener más de una ranura de coincidencia

dado que la superrejilla garantiza la existencia de al menos una ranura en la que los nodos empatan.

Esto se aprecia cuando hay un desfase de cero ranuras $sh = 0$, el nodo B puede elegir trabajar en cualquiera de las ranuras que indique la superrejilla y tendrá coincidencia con el nodo A. Analicemos el siguiente caso:

La Tabla 2.5 muestra el número de ranuras de opciones de coincidencia entre un nodo A y un nodo B dependiendo del desfase. Se analiza para el caso de un marco de 100 ranuras, donde $\Xi = \{1, 2, 3, 4, 8, 16, 26, 31, 34, 35, 40, 43, 47, 51\}$.

<i>Sh</i>	# Coincid.	<i>Sh</i>	# Coincid.	<i>Sh</i>	# Coincid.	<i>Sh</i>	# Coincid.
0	14	25	2	50	2	75	2
1	4	26	1	51	1	76	2
2	2	27	3	52	1	77	2
3	3	28	1	53	1	78	1
4	4	29	1	54	1	79	1
5	3	30	2	55	1	80	1
6	2	31	3	56	1	81	1
7	2	32	3	57	2	82	2
8	4	33	2	58	1	83	2
9	3	34	1	59	1	84	2
10	1	35	2	60	1	85	2
11	1	36	1	61	3	86	2
12	3	37	1	62	1	87	2
13	2	38	1	63	1	88	3
14	2	39	3	64	1	89	1
15	2	40	1	65	2	90	1
16	2	41	1	66	1	91	3
17	2	42	1	67	2	92	4
18	2	43	2	68	3	93	2
19	1	44	1	69	3	94	2
20	1	45	1	70	2	95	3
21	1	46	1	71	1	96	4
22	1	47	1	72	1	97	3
23	2	48	1	73	3	98	2
24	2	49	1	74	1	99	4
Promedio de coincidencias en el marco:						1.96	

Tabla 2.5: Ranuras de coincidencia entre nodos A y B considerando su desfase.

Puede apreciarse en la Tabla 2.5, tal como se comentó en la página 10, la simetría del número de ranuras de coincidencias. Recordando que: $|S| = r$, para un *shift* i su respectivo inverso se calcula como $r - i$. Así, para la tabla anterior, $r = 100$ y algunos inversos serían: $sh - 1$ y $sh - 99$; $sh - 10$ y $sh - 90$; $sh - 32$ y $sh - 68$; además, se aprecia que $sh - 50$ es su propio inverso ya que este valor es la mediana de los posibles desfases que puede tener un marco de 100 ranuras ($sh - 1$ $sh - 99$).

Recordemos también que para cada distinto tamaño de los marcos, la superrejilla no es única, por lo que dependiendo del subconjunto elegido en el marco, el número de coincidencias varía; sin embargo, los promedios de coincidencias son muy cercanos, por lo que cualquier representante puede servir para revisar el comportamiento de la técnica.

Una vez analizado lo anterior, se hace un análisis del modelo del enfoque aleatorio con memoria.

Sea i_d la cantidad de ranuras en las que A y B coinciden dado que hay un desfase de d ranuras entre A y B y sea c la cardinalidad de la superrejilla. La probabilidad de que A y B se encuentren en el n -ésimo marco, dado que hay un desfase de d ranuras entre ambos, está dada por la Ecuación 2.6:

$$P(f = n) = \frac{i_d \cdot [(c - i_d) P(n - 1)]}{c P n} \quad (2.6)$$

De esta manera es posible estimar el marco en el que se encontrarán A y B dado un desfase de d ranuras entre ambos haciendo uso de la definición del valor esperado como se muestra en la Ecuación 2.7

$$\mathbf{E}[f_d] = \sum_{n=1}^c n \cdot P(f = n) \quad (2.7)$$

Tomando en cuenta que los nodos A y B son asíncronos entre sí y que todos los desfases tienen la misma probabilidad de ocurrencia $1/r$, el valor esperado de marcos está dado por la Ecuación 2.8:

$$\mathbf{E}[f] = \sum_{d=0}^r \mathbf{E}[f_d] \cdot \frac{1}{r} \quad (2.8)$$

La Tabla 2.6 muestra los resultados acerca del número de marco promedio en el que se establece el encuentro entre los nodos A y B:

Tamaño de marco [r]	Índices de rejilla [s_{on}]	Marco estimado de encuentro escenario A-B
100	14	6.05857
200	20	8.88192
300	24	10.91722
400	28	12.80125
500	31	14.34113
600	34	15.71938
700	37	17.23093
800	40	18.57015
900	42	19.64652
1000	44	21.03172

Tabla 2.6: Valor esperado de marcos de encuentro entre dos nodos A y B en el enfoque aleatorio con memoria

De acuerdo a los resultados de la Tabla 2.6 el primer enfoque apriorístico tiene un mejor desempeño en comparación con los resultados del enfoque probabilístico mostrados en la Tabla 2.4. El enfoque apriorístico - pseudoaleatorio tiene un comportamiento muy similar al apriorístico - aleatorio con memoria lo cual se describe a continuación.

Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio

Para el enfoque pseudoaleatorio se tiene que aleatorio con memoria es una gran aproximación en cuanto a su modelo ya que ambos tienen un comportamiento similar cuando se trata de un nodo tipo A y uno tipo B. Esto debido a que el concepto de superframe empleado en este enfoque precisa también en ir usando los índices de la superrejilla sin repetirlos hasta que éstos se agoten, por lo tanto se tiene que a lo más el peor caso ocurriría cuando se tenga un desfase en el que haya una sola ranura de coincidencia y el índice con el que se da dicha coincidencia fuera el último en emplearse en el superframe.

Por lo anterior, la Tabla 2.6 puede también considerarse para caracterizar al enfoque apriorístico - pseudoaleatorio cuando se tengan los escenarios de encuentro entre un nodo A y un nodo B.

2.2.3. Modelos para nodos B-B

Para este modelo, se tomarán nodos tipo B. Recordemos que los dispositivos de este tipo tienen la característica de operar en sólo una ranura de todo el marco.

Consideraremos sólo uno de los enfoques desarrollados, ya que con un cálculo realizado *a priori*, se observó que el modelo no optimizaba los resultados del enfoque probabilístico, en el cual el nodo tipo B elige siempre aleatoriamente entre todas las ranuras del marco donde encenderse para buscar a sus vecinos.

Enfoque probabilístico

Sea r la cantidad de ranuras que tiene un marco, la probabilidad de que dos nodos tipo B se encuentren en el n -ésimo marco está dada por la Ecuación 2.9.

$$P(f = n) = \frac{1}{r} \left(\frac{r-1}{r} \right)^{n-1} \quad (2.9)$$

Es posible estimar el marco en el que se encontrarán dos nodos tipo B haciendo uso de la definición del valor esperado como se muestra en la Ecuación 2.10.

$$\mathbf{E}[f] = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left(\frac{1}{r} \right) \cdot \left(\frac{r-1}{r} \right)^{n-1} \quad (2.10)$$

De esta manera, los valores esperados para los distintos tamaños de marcos que produce la Ecuación 2.10 se muestran en la Tabla 2.7:

Tamaño de marco [r]	Valor Esperado de marco de encuentro
100	100
200	200
300	300
400	400
500	500
600	600
700	700
800	800
900	900
1000	1000
10000	10000

Tabla 2.7: Resultados del valor esperado calculados a partir de la ecuación 2.10

Como se puede apreciar en la Tabla 2.7 los tiempos de valor esperado para el encuentro entre dos nodos tipo B son mucho mayores a los presentados en las Tablas 2.4 y 2.6. Esto se debe a que para el escenario de encuentro entre estos nodos se tiene que los dispositivos sólo intentan buscar a sus vecinos en sólo una ranura del marco por lo que a medida que el tamaño de los marcos se incrementa la probabilidad de encuentro disminuye y el valor esperado coincide con el tamaño del marco.

Por lo anterior, para este escenario el enfoque probabilístico supera al planteamiento de los enfoques apriorísticos así que no se analiza a profundidad este caso.

Capítulo 3

Experimentación y resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para la simulaciones realizadas para cada uno de los enfoques comentados en el Capítulo 2. De esta manera se busca verificar que las experimentaciones realizadas cotejen con los modelos teóricos planteados y poder analizar el modelo propuesto en este trabajo de tesis.

Como se comentó en la Sección 2.1.3, el objetivo es analizar los ciclos bajos de trabajo de los dispositivos que más abundan en la red, por lo que para realizar la simulaciones se consideraron como referentes tres tamaños de marco: 100, 500 y 1000 ranuras. A continuación, en la Tabla 3.1, se retoman las características de estos parámetros:

		Ciclos de trabajo	
Tamaño de marco [S]	Índices de rejilla [c]	Nodo A	Nodo B
100	14	14 %	1 %
500	31	6.2 %	0.2 %
1000	44	4.4 %	0.1 %

Tabla 3.1: Valores de los ciclos de trabajo para nodos tipo **A** y **B** según el tamaño de los marcos.

Los resultados se dividen en tres secciones donde se aprecia la combinación de experimentos entre los tipos de nodo: AA, AB y BB. Dependiendo del caso que se presente se analizan los enfoques presentados: probabilístico, apriorístico - aleatorio con memoria o apriorístico - pseudoaleatorio.

3.1. Experimentación entre nodos tipo AA

3.1.1. Enfoque probabilístico

Marco de 100 ranuras, ciclo de trabajo de 14 % para nodo A

En este primer experimento se considera que hay dos nodos tipo A. Se considera que el tamaño de los marcos es de 100 ranuras y que cada nodo trabaja con un ciclo de trabajo del 14 %. Las coincidencias entre nodos se buscan de forma totalmente aleatoria.

Los resultados de la Tabla 3.2 muestran la frecuencia con la que se obtuvieron los encuentros mediante la búsqueda aleatoria:

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje
1	89558	89.558
2	9353	9.353
3	980	0.980
4	101	0.101
5	8	0.008
Tasa media de encuentro	1.11648 marcos	

Tabla 3.2: Resultados de la tasa media de encuentro con 100,000 casos de prueba.

Marco de 500 ranuras, ciclo de trabajo de 6.2 % para nodo A

Ahora, se muestran los resultados en la cual dos nodos del tipo A con ciclo de trabajo de 6.2 % se descubren. Para 100,000 casos de prueba, los resultados de la frecuencia de encuentro utilizando la búsqueda totalmente aleatoria aparecen en la Tabla 3.3.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje
1	87174	87.174
2	11184	11.184
3	1421	1.421
4	194	0.194
5	20	0.020
Tasa media de encuentro	1.14724 marcos	

Tabla 3.3: Experimento del enfoque probabilístico con ciclo de trabajo para nodo A de 6.2 %.

Marco de 1000 ranuras, ciclo de trabajo de 4.4 % para nodo A

De manera análoga, se presentan los resultados para una simulación con 100,000 pruebas en la cual dos nodos del tipo A con un ciclo de trabajo de 4.4 % se descubren. Los resultados con la frecuencia de encuentro utilizando la búsqueda totalmente aleatoria aparecen en la Tabla 3.4.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje
1	86634	86.634
2	11546	11.546
3	1587	1.587
4	195	0.195
5	6	0.006
Tasa media de encuentro	1.15463 marcos	

Tabla 3.4: Resultados del enfoque probabilístico con ciclo de trabajo de 4.4 %

3.1.2. Técnica de la rejilla

En esta sección se muestran los resultados sobre los mismos escenarios mostrados en la Sección 3.1.1 con la variación de que ahora se emplea la técnica de la rejilla adaptada para los casos de los marcos con 100, 500 y 1000 ranuras.

Marco de 100 ranuras, ciclo de trabajo de 14 % para nodo A

En la Tabla 3.5 se aprecia la frecuencia con la que se obtiene el encuentro de dos nodos tipo A para 100,000 simulaciones considerando que los marcos tienen 100 ranuras y el ciclo de trabajo es del 14 %.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje
1	100000	100
Tasa media de encuentro	1 marco	

Tabla 3.5: Resultados para el modo apriorístico con ciclo de trabajo de 14 %.

Se aprecia que los resultados coinciden con la definición de la superrejilla y como se comentó en 2.2.1 el orden es constante $O(1)$, en el número de marcos para realizar el encuentro entre dos nodos tipo A. Esto ocurre para cualquier tamaño de marco. Lo podemos corroborar a continuación.

Marco de 500 ranuras, ciclo de trabajo de 6.2 % para nodo A

De manera análoga, se muestran en la Tabla 3.6 los marcos en los que ocurren los encuentros y su respectiva frecuencia de ocurrencia para un par de nodos con ciclo de trabajo del 6.2 %.

Marco de 1000 ranuras, ciclo de trabajo de 4.4 % para nodo A

Añadimos también a la Tabla 3.6 los resultados sobre el número de encuentro medio para dos nodos con ciclo de trabajo de 4.4 %.

Como se había anticipado tanto para el marco de 500 ranuras como para el marco de 1000 ranuras el orden también es constante $O(1)$.

Tamaño de marco [S]	Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje
500	1	100000	100
1000	1	100000	100
Tasa media de encuentro		1 marco	

Tabla 3.6: Resultados del enfoque apriorístico para ciclos de trabajo de 6.2 y 4.4 %.

En la Figura 3.1, se integran los resultados de las Tablas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 para la comparación del enfoque probabilístico contra el uso de la técnica de la rejilla en el caso de los marcos con 100, 500 y 1000 ranuras.

Puede observarse en la gráfica de la Figura 3.1 que para los casos de las Tablas 3.5 y 3.6, en las 100,000 pruebas que se realizaron el número de marcos en el que hubo el encuentro fue de 1 marco, por lo que este valor es constante mientras que es variado para los casos del enfoque probabilístico.

3.2. Experimentación entre nodos tipo AB

Para este caso se consideran los experimentos en que dos nodos, uno del tipo A y otro del tipo B, se descubren. Se simulan los tres enfoques comentados previamente y se hace una comparación con los resultados arrojados por el modelo teórico expuesto en 2.2.2.

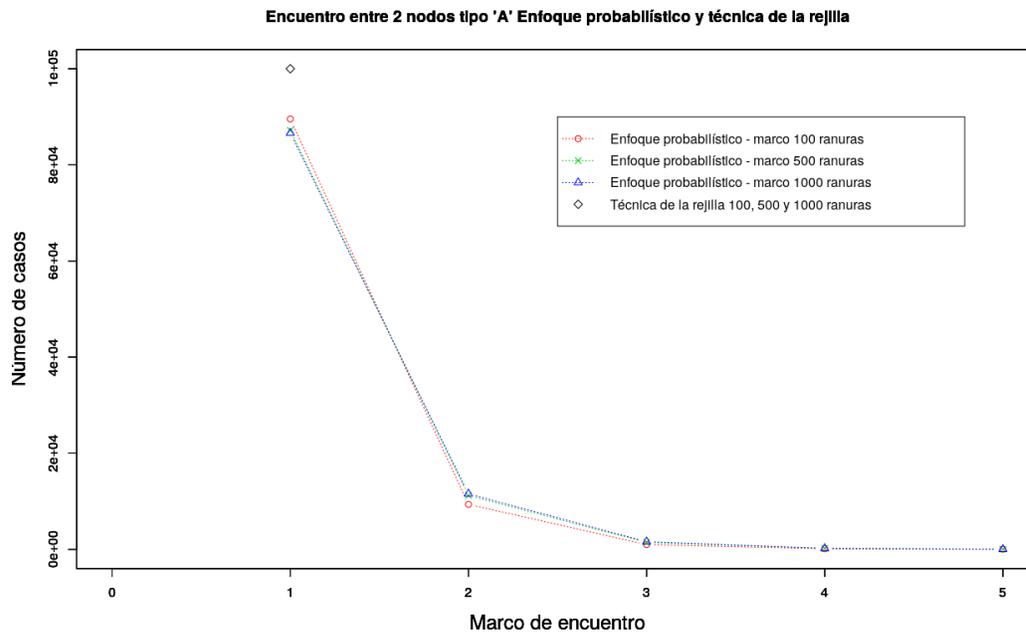


Figura 3.1: Comparación de marcos de coincidencia entre dos nodos tipo AA con enfoque probabilístico y enfoque apriorístico i.d. técnica de la rejilla para marcos de 100, 500 y 1000 ranuras.

3.2.1. Enfoque probabilístico

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el enfoque probabilístico considerando distintos tamaños de marcos.

Marco de 100 ranuras con ciclos de trabajo de 14 % para nodo A y 1 % para nodo B

Considerando un marco de 100 ranuras se realiza la simulación para el encuentro entre un nodo de tipo A y un nodo de tipo B. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.7.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %	Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %
1-5	52927	52.927	41-45	125	0.125
6-10	24727	24.727	46-50	60	0.060
11-15	11717	11.717	51-55	30	0.030
16-20	5633	5.633	56-60	17	0.017
21-25	2675	2.675	61-65	10	0.010
26-30	1195	1.195	66-70	1	0.001
31-35	591	0.591	71-75	0	0.000
36-40	290	0.290	76-80	2	0.002
Tasa media de encuentro			7.18191 marcos		

Tabla 3.7: Resultados para el encuentro entre nodos tipo A y B con enfoque probabilístico para marcos de 100 ranuras.

Marco de 500 ranuras con ciclos de trabajo de 6.2 % para nodo A y 0.2 % para nodo B

A continuación, en la Tabla 3.8 se presentan los resultados de la simulación en la búsqueda de vecinos entre dos nodos tipo A y B con marcos de 500 ranuras y ciclos de trabajo de 6.2 % y 0.2 %, respectivamente.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %	Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %
1-10	47025	47.025	91-100	140	0.140
11-20	25119	25.119	101-110	59	0.059
21-30	13187	13.187	111-120	46	0.046
31-40	6958	6.958	121-130	18	0.018
41-50	3681	3.681	131-140	10	0.010
51-60	1919	1.919	141-150	4	0.004
61-70	1009	1.009	151-160	3	0.003
71-80	548	0.548	161-170	2	0.002
81-90	271	0.271	171-180	1	0.001
Tasa media de encuentro			16.13324 marcos		

Tabla 3.8: Encuentro probabilístico de nodos considerando marcos de 500 ranuras.

Marco de 1000 ranuras con ciclos de trabajo de 4.4 % para nodo A y 0.1 % para nodo B

De manera análoga se muestran los resultados, en la Tabla 3.9, de la simulación en la búsqueda de vecinos entre dos nodos tipo AB considerando marcos de 1000 ranuras y con ciclos de trabajo de los nodos de 4.4 % y 0.1 %, respectivamente.

Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %	Marco de encuentro	Número de casos	Porcentaje %
1-20	59444	59.444	161-180	41	0.041
21-40	24044	24.044	181-200	20	0.020
41-60	9811	9.811	201-220	10	0.010
61-80	3964	3.964	221-240	0	0.000
81-100	1653	1.653	241-260	0	0.000
101-120	667	0.667	261-280	1	0.001
121-140	245	0.245	281-300	1	0.001
141-160	99	0.099			
Tasa media de encuentro			22.6697 marcos		

Tabla 3.9: Encuentro probabilístico de nodos considerando marcos de 1000 ranuras.

Se puede apreciar en la Figura 3.2 como los resultados obtenidos en las simulaciones para los casos de los marcos de tamaño 100, 500 y 10000 ranuras corresponden a lo señalado por el modelo teórico resumido en la Tabla 2.4.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos al cambiar la técnica de encuentro considerando los parámetros de las simulaciones de la Sección 3.2.1.

3.2.2. Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria

Toca el turno ahora de corroborar los valores de la Tabla 3.10 presentados en la Sección 2.2.2. Para el caso de la simulación de 100, 500 y 1000 ranuras se obtuvieron los siguientes resultados:

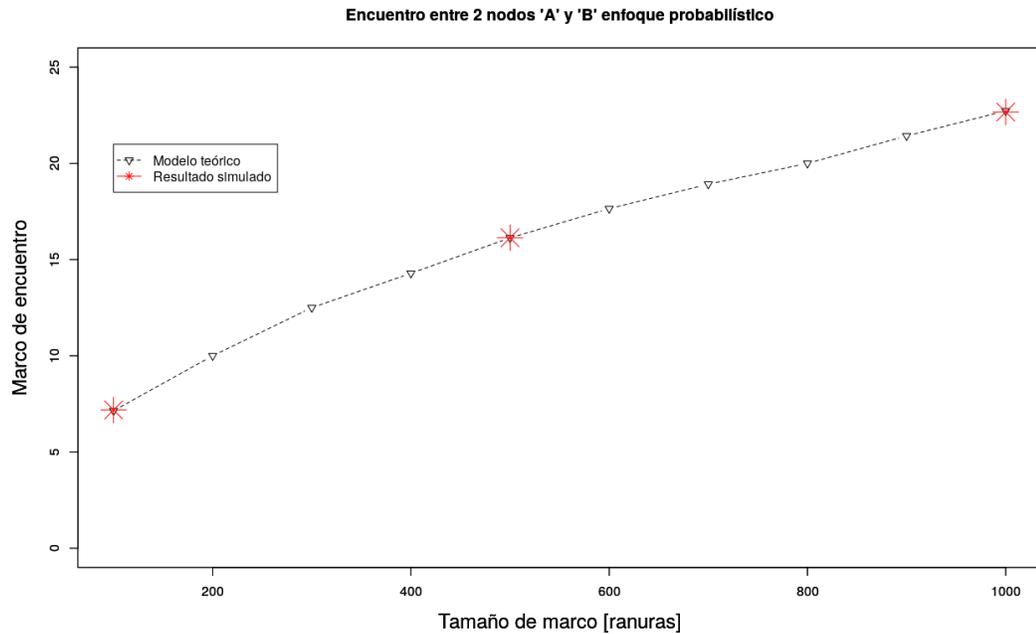


Figura 3.2: Comparación del modelo teórico y resultados de la simulación en el enfoque probabilístico para dos nodos tipo A y B con marco de 100, 500 y 1000 ranuras.

Tamaño de marco [S]	Índices de rejilla [c]	Ciclos de trabajo		Marco promedio de encuentro
		Nodo A	Nodo B	
100	14	14 %	1 %	6.39566
500	31	6.2 %	0.2 %	15.04181
1000	44	4.4 %	0.1 %	21.3275

Tabla 3.10: Simulación para el encuentro entre dos nodos A y B en el enfoque apriorístico - aleatorio con memoria. Experimento con 100,000 pruebas.

De esta manera, se puede verificar y visualizar a través de la Figura 3.3 que los resultados experimentales corresponden al modelo presentado en la Sección 2.2.2.

A continuación se analizarán los resultados para el encuentro entre nodos A y B usando la segunda variante de la técnica de la rejilla.

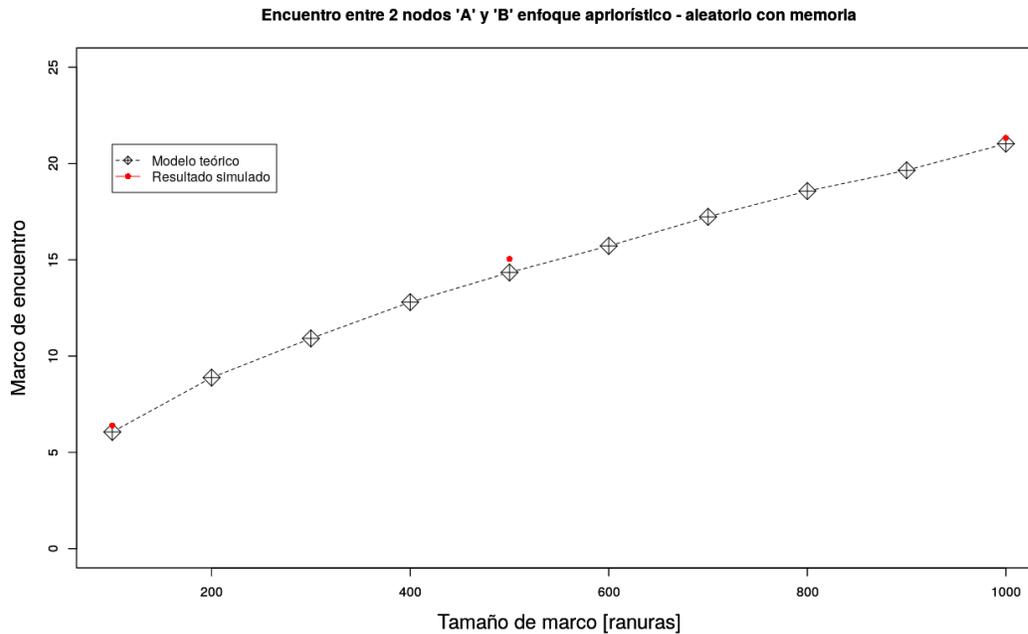


Figura 3.3: Comparación del modelo teórico y resultados de la simulación en el enfoque apriorístico - aleatorio con memoria para dos nodos, uno tipo A y el otro B.

3.2.3. Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio

Como se comentó en el Capítulo 2, página 23, para el caso en que se tiene un nodo A y un nodo B, se puede tomar como referencia el mismo modelo para ambos enfoques apriorísticos. Así, se muestran en la Tabla 3.11 los resultados obtenidos.

Tamaño de marco [S]	Índices de rejilla [c]	Ciclos de trabajo		Marco promedio de encuentro
		Nodo A	Nodo B	
100	14	14 %	1 %	6.40774
500	31	6.2 %	0.2 %	16.53715
1000	44	4.4 %	0.1 %	23.95521

Tabla 3.11: Resultados de la simulación para el encuentro entre dos nodos A y B en el enfoque apriorístico - pseudoaleatorio para el cual se realizaron 100,000 pruebas para obtener un valor certero.

De manera análoga, se muestra en la Figura 3.4 la relación que hay entre los

valores obtenidos mediante la simulación para el caso de los marcos de 100, 500 y 1000 ranuras con los valores arrojados por el modelo teórico.

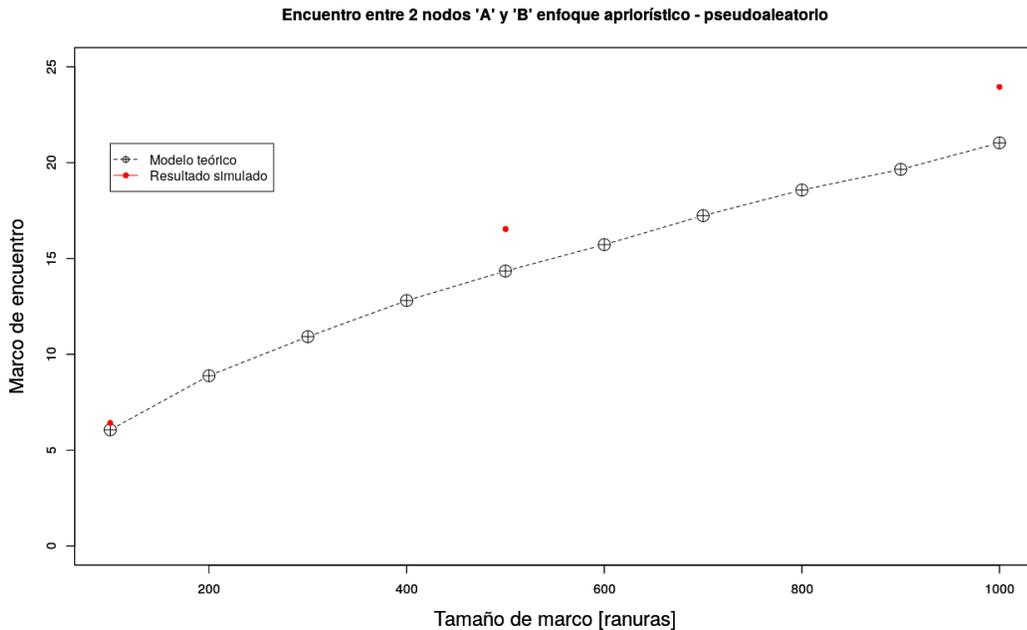


Figura 3.4: Resultados del enfoque apriorístico - pseudoaleatorio para dos nodos, uno tipo A y el otro B, en una simulación de 100,000 pruebas.

A pesar de que se comentó en la página 23 acerca de que aleatorio con memoria puede ser una aproximación para el enfoque pseudoaleatorio, observamos que debe realizarse con más cuidado el análisis teórico ya que los resultados experimentales están un poco por encima de lo tomado como referencia en el caso teórico.

Pareciera que entre los enfoques apriorísticos resulta mejor opción, en cuanto al retardo de descubrimiento, el caso aleatorio con memoria que pseudoaleatorio. Sin embargo, veremos que falta explotar una característica peculiar respecto al último enfoque que se comentó en la Sección 2.1.5, página 17; ya que esta configuración de la técnica permite extrapolar los escenarios de simulación a casos donde aparecen gran cantidad de nodos tipo B y sólo un nodo A, a manera de un orquestador que facilita el paso de información entre los nodos, para disminuir el tiempo de descubrimiento de todo el vecindario.

Por lo anterior, después de analizar el caso de experimentación entre nodos tipo B, se agregará la Sección 3.4 en donde se comenta respecto a los experi-

mentos donde se aumenta la cantidad de dispositivos que tienen un bajo consumo energético, es decir agregar nodos tipo B a las simulaciones.

3.3. Experimentación entre nodos tipo BB

3.3.1. Enfoque probabilístico

A continuación, se realiza la simulación que considera dos nodos de tipo B, para el caso de marcos de tamaño de 100 y 1000 ranuras. Los resultados obtenidos en la experimentación se muestran en la Tabla 3.12.

Tamaño de marco [S]	Índices de rejilla [c]	Ciclos de trabajo Nodo B	Marco promedio de encuentro
100	14	1 %	100.24582
500	31	0.2 %	498.62029
1000	44	0.1 %	998.38241

Tabla 3.12: Resultados de la simulación para el encuentro entre dos nodos B mediante el uso del enfoque probabilístico.

Los resultados de la Tabla 3.12 se pueden observar junto con los arrojados por el modelo teórico para este caso en la Figura 3.5

Puede observarse que hay una correspondencia entre los resultados de la simulación y los esperados del modelo teórico.

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos para los casos: AA, AB y BB con los enfoques comentados a lo largo del documento, podemos extender el trabajo al análisis de redes en las que existen más dispositivos del tipo B, los cuales representan el ahorro energético de la red completa.

Es por esto que en la siguiente sección se analizarán casos en las simulaciones del tipo AB donde se agregan varios nodos tipo B.

3.4. Redes con diversos nodos

Como se comentó en la sección anterior, toca el turno a realizar el análisis de simulaciones del tipo AB, donde se varía la cantidad de nodos de tipo B. Se presentan a continuación los tres enfoques descritos en la Sección 3.2 para comparar una extrapolación de cada uno de dichos casos en redes en las cuales existe mayor

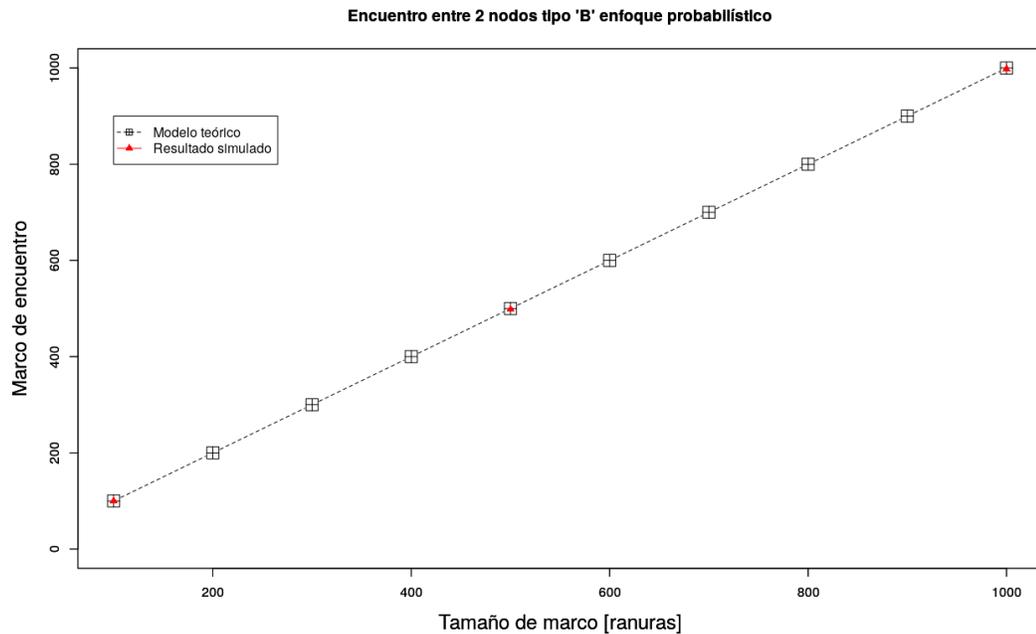


Figura 3.5: Comparación entre el modelo teórico y los resultados de la simulación en el enfoque probabilístico para dos nodos tipo B.

cantidad de dispositivos tipo B y con esto se puedan escalar mucho más las redes con un mínimo consumo energético.

Para las tablas presentadas en los diversos enfoques, para todos los escenarios se requiere la presencia de un nodo A y se indica con la expresión $n \times B$ la cantidad de nodos tipo B.

Además, se realiza un segundo experimento en el cual, una vez realizada la simulación del escenario propuesto en cada fila de las tablas, se realiza el caso en el que se añade un nuevo nodo tipo B a la red; por esta razón se incluyen el número de enlaces que le tomará al nuevo integrante de la red conocer todo el vecindario usando el mismo enfoque que en el escenario inicial.

3.4.1. Enfoque probabilístico

En la Tabla 3.13 se muestran los resultados de la simulación para el caso escalando las redes con incremento de dispositivos tipo B. De igual forma, se muestra el número promedio de marcos que tarda un nodo añadido a encontrar a todos los nodos que ya están conectados.

Escenario	Enlaces por descubrir	Marco encuentro	Al añadir un nodo	
			Enlaces por descubrir	Marcos encuentro
A - 1×B	1	7.14461	2	100.30101
A - 2×B	3	100.37248	3	149.86562
A - 3×B	6	183.15481	4	183.39914
A - 4×B	10	244.36632	5	207.66171
A - 5×B	15	291.83005	6	227.70468
A - 10×B	55	437.87047	11	291.5412

Tabla 3.13: Resultados de la simulación con 100,000 pruebas, enfoque probabilístico.

3.4.2. Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria

A continuación, la Tabla 3.14 contiene los resultados de la simulación para el caso AB. Análogamente, se muestra el número promedio de marcos que tarda un nuevo nodo que se agrega en encontrar a todos los vecinos interconectados.

Escenario	Enlaces por descubrir	Marco encuentro	Al añadir un nodo	
			Enlaces por descubrir	Marcos encuentro
A - 1×B	1	6.39566	2	126.76276
A - 2×B	3	127.73596	3	196.04163
A - 3×B	6	244.37029	4	244.64274
A - 4×B	10	339.99272	5	283.26272
A - 5×B	15	417.66364	6	312.83939
A - 10×B	55	674.16951	11	418.77379

Tabla 3.14: Enfoque apriorístico - aleatorio con memoria con incremento de nodos tipo B.

3.4.3. Enfoque apriorístico - pseudoaleatorio

Por último, la Tabla 3.15 muestra el promedio de marcos de encuentro para el caso AB con el tercer tipo de enfoque. Así mismo se contempla la columna de resultados obtenidos al añadir un nuevo dispositivo tipo B a la red.

Escenario	Enlaces por descubrir	Marco encuentro	Al añadir un nodo	
			Enlaces por descubrir	Marcos encuentro
A - 1×B	1	6.40774	2	7.13754
A - 2×B	3	9.87913	3	8.6818
A - 3×B	6	12.66461	4	9.89546
A - 4×B	10	14.78716	5	10.84613
A - 5×B	15	16.43418	6	11.62699
A - 10×B	55	21.05819	11	14.07707

Tabla 3.15: Experimentación de 100,000 casos de prueba con el enfoque apriorístico - pseudoaleatorio escalando la red con nodos tipo B.

A continuación en la Figura 3.6, se muestra un gráfico sobre la información contenida en las Tablas 3.13, 3.14 y 3.15 referente al tiempo promedio de marcos que tarda en descubrirse la red para cada escenario.

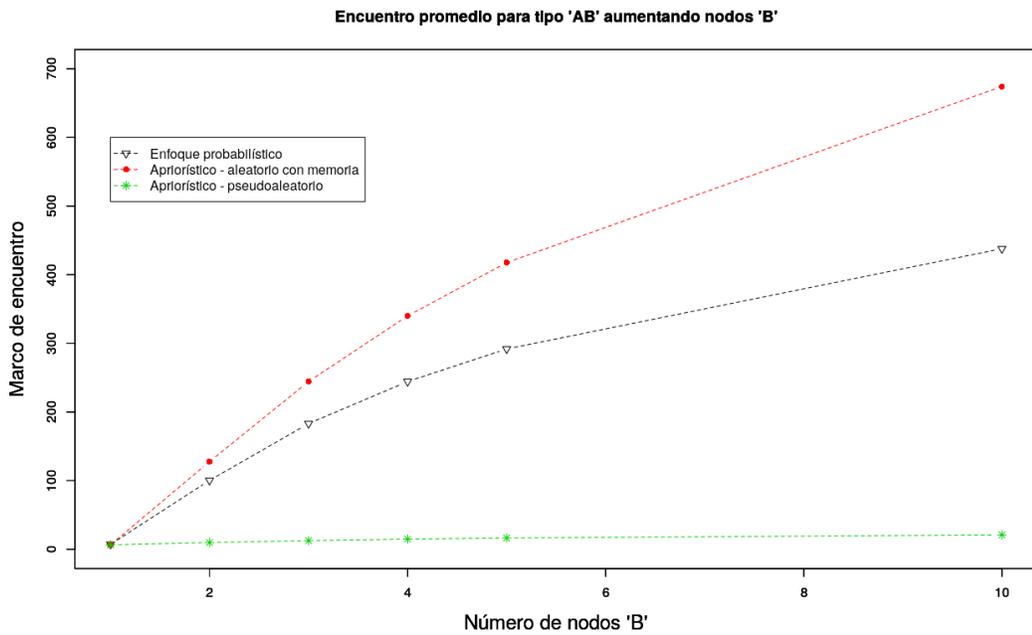


Figura 3.6: Marcos promedio requeridos por cada enfoque para descubrir su vecindario completo al variar la cantidad de dispositivos tipo B en la red.

Posteriormente, en la Figura 3.7 se muestra la comparativa en cuanto al número de marcos que tarda en descubrir la red completa un nodo añadido para cada

escenario planteado considerando que ya existe un descubrimiento previo.

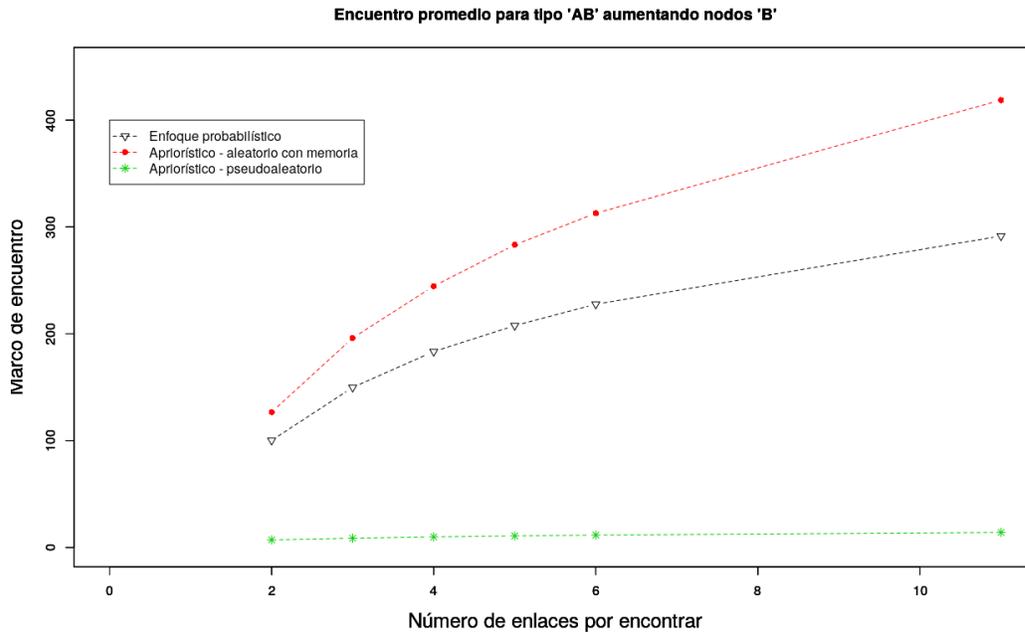


Figura 3.7: Resultados de la simulación para los tres enfoques mostrados cuando las redes con descubrimiento total de vecinos aceptan a un nuevo elemento.

En el siguiente capítulo se analizan las gráficas de las Figuras 3.6 y 3.7 mediante las cuales se puede aseverar sobre la eficacia de los distintos enfoques que se describieron a lo largo de este documento.

Capítulo 4

Conclusiones

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran una comparativa directa respecto a los tres enfoques que se plantearon a lo largo de esta tesis. Se puede concluir para ambas figuras, que el enfoque de mejor efectividad para el descubrimiento completo de los vecindarios es el enfoque apriorístico - pseudoaleatorio, marcado con color verde en las figuras mencionadas.

La razón principal que lleva a que el enfoque pseudoaleatorio obtenga el mejor desempeño en comparación de los otros dos es el uso de secuencias pseudoaleatorias que definen el orden de uso de los índices de trabajo para cada nodo B; esto aunado al intercambio de información que se realiza respecto a nodos conocidos previamente por otros vecinos llevan a que a partir del conocimiento de las semillas para las funciones *random* se pueda anticipar cuales son los índices de funcionamiento y predecir las ranuras de operación.

Por otro lado, el desarrollo de la técnica de la rejilla permitió lograr conjuntos muy pequeños, en comparación de los tamaños de los marcos, los cuales cumplen con la función de vencer con el asincronismo de relojes entre los nodos y así mismo, dejar en manos de una probabilidad mucho menor la posibilidad de coincidencia entre los dispositivos.

La presentación del enfoque apriorístico - aleatorio con memoria significó un avance en el intento de reducción en el retardo de descubrimiento de la red para casos pequeños con pocos nodos tipo B como lo mostraron los resultados teóricos presentados en la Tabla 2.6, sin embargo, a medida de que la red escaló, se tiene un comportamiento semejante al enfoque probabilístico y no se logra optimizar el resultado.

Es así que se logra por medio de una técnica de optimización de ranuras de transmisión, disminuir el tiempo de encuentro entre vecinos para nodos que ope-

ran con un ciclo bajo de trabajo y es posible verificar la optimización al comparar los resultados con la cota media marcada por el proceso de búsqueda aleatoria.

4.1. Trabajo futuro

Como una línea posible de trabajo futuro, se plantea la posibilidad de considerar un proceso de cosecha de energía (*energy harvesting*), por medio del cual se obtenga energía del medio ambiente, ejemplos de esto serían la adaptación de un panel solar, algún generador eólico, termoeléctrico o un captador de energía vibratoria; y así transformar esta energía en potencia para cargar alguna batería o lograr la correcta operación de los dispositivos de manera más autónoma y con menos mantenimiento.

Para la línea de trabajo anterior habría que plantearse los modelos teóricos agregando las probabilidades de lograr la carga de la batería a partir de la probabilidad de éxito de los procesos de cosecha y se deberá comparar con una implementación real para su análisis completo.

Por otro lado se puede seguir extendiendo la aplicación del enfoque optimizado en diversos protocolos y estándares que realicen la búsqueda de vecinos para lograr que ésta se realice en un menor tiempo respecto a los mecanismos utilizados y en el mejor de los casos que pudiera realizarse con una duración mínima constante.

Así mismo, puede ampliarse el análisis de esta investigación considerando nodos que trabajen con diversos ciclos de trabajo pero ubicados en la categoría de muy pequeños ciclos de operación.

Bibliografía

- [1] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings.Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1567–1576 vol.3, 2002.
- [2] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, and R. Han, “X-mac: A short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '06, (New York, NY, USA), pp. 307–320, ACM, 2006.
- [3] Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson, “Ri-mac: A receiver-initiated asynchronous duty cycle mac protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, SenSys '08, (New York, NY, USA), pp. 1–14, ACM, 2008.
- [4] P. Dutta, S. Dawson-Haggerty, Y. Chen, C.-J. M. Liang, and A. Terzis, “Design and evaluation of a versatile and efficient receiver-initiated link layer for low-power wireless,” in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, (New York, NY, USA), pp. 1–14, ACM, 2010.
- [5] R. Margolies, G. Grebla, T. Chen, D. Rubenstein, and G. Zussman, “Panda: Neighbor discovery on a power harvesting budget,” in *IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–9, April 2016.
- [6] S. A. Borbash, A. Ephremides, and M. J. McGlynn, “An asynchronous neighbor discovery algorithm for wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 5, no. 7, pp. 998 – 1016, 2007.

- [7] M. McGlynn and S. Borbash, “Birthday protocols for low energy deployment and flexible neighbor discovery in ad hoc wireless networks,,” in *Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing: MobiHoc 2001*, (Lab. for Telecommunications Sciences), pp. 137–145, 2001.
- [8] S. Vasudevan, D. Towsley, D. Goeckel, and R. Khalili, “Neighbor discovery in wireless networks and the coupon collector’s problem,,” 2009.
- [9] G. Sun, F. Wu, and G. Chen, “Neighbor discovery in low-duty-cycle wireless sensor networks with multipacket reception,,” in *2012 IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, pp. 490–497, Dec 2012.
- [10] G. Jakllari, Wenjie Luo, and S. V. Krishnamurthy, “An integrated neighbor discovery and mac protocol for ad hoc networks using directional antennas,,” in *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*, pp. 11–21, June 2005.
- [11] S. Vasudevan, J. Kurose, and D. Towsley, “On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas,,” in *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, vol. 4, pp. 2502–2512 vol. 4, March 2005.
- [12] . . Krishnamurthy, S. (1, N. . . . Mittal, R. . . . Chandrasekaran, and S. . . . Venkatesan, “Neighbour discovery in multi-receiver cognitive radio networks,,” *International Journal of Computers and Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 50–57, 2009.
- [13] N. Mittal, S. Krishnamurthy, R. Chandrasekaran, S. Venkatesan, and Y. Zeng, “On neighbor discovery in cognitive radio networks,,” *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 69, pp. 623–637, 07 2009.
- [14] C. J. Liyana Arachchige, S. Venkatesan, and N. Mittal, “An asynchronous neighbor discovery algorithm for cognitive radio networks,,” in *2008 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 1–5, Oct 2008.
- [15] R. Madan and S. Lall, “An energy-optimal algorithm for neighbor discovery in wireless sensor networks,,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 11, pp. 317–326, Jun 2006.

- [16] R. Cohen and B. Kapchits, “Continuous neighbor discovery in asynchronous sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, pp. 69–79, Feb 2011.
- [17] T. Meng, F. Wu, and G. Chen, “On designing neighbor discovery protocols: A code-based approach,” in *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1689–1697, April 2014.
- [18] S. Lai, B. Ravindran, and H. Cho, “Heterogenous quorum-based wake-up scheduling in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 59, pp. 1562–1575, Nov 2010.
- [19] P. Dutta and D. Culler, “Practical asynchronous neighbor discovery and rendezvous for mobile sensing applications,” in *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys '08*, (New York, NY, USA), pp. 71–84, ACM, 2008.
- [20] A. Kandhalu, K. Lakshmanan, and R. R. Rajkumar, “U-connect: A low-latency energy-efficient asynchronous neighbor discovery protocol,” in *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '10*, (New York, NY, USA), p. 350–361, Association for Computing Machinery, 2010.
- [21] M. Bakht, M. Trower, and R. H. Kravets, “Searchlight: Won’t you be my neighbor?,” in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Mobicom '12*, (New York, NY, USA), p. 185–196, Association for Computing Machinery, 2012.