

Análisis de Desempeño de un Protocolo para Redes Inalámbricas de Sensores Basado en TDMA con Capacidades de Radio Cognoscitivo

Israel Leyva-Mayorga^{a,*}, Mario E. Rivero-Angeles^b, Chadwick Carreto-Arellano^c, Vicent Pla^a

^a*Instituto de Aplicaciones de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones Avanzadas (ITACA), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España*

^b*Laboratorio de Redes y Ciencias de Datos, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, (CIC-IPN) Av. Juan de Dios Bátiz, esq. Miguel Othon de Mendizabal s/n, C.P. 07738, México, D.F., México*

^c*Secretaría de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, C.P. 07738, México, D.F., México*

Resumen

El Radio Cognoscitivo (CR) tiene como objetivo principal la optimización del uso del espectro en sistemas de portadoras múltiples y ha sido estudiado para lograr mejoras en el desempeño en redes inalámbricas de sensores (WSNs, por sus siglas en inglés), específicamente, en parámetros de calidad de servicio (QoS) como el consumo de energía, retardo promedio de reporte y probabilidad de colisión. Sin embargo es un campo poco estudiado, ya que los nodos suelen presentar limitaciones en cuanto a tamaño y capacidad que no permiten que determinadas técnicas convencionales de CR sean implementadas directamente en redes inalámbricas de sensores. Su uso permite a los usuarios de una red secundaria (SU, aquellos usuarios que no poseen la concesión de la banda a utilizar) el monitoreo del canal de comunicaciones perteneciente a los usuarios de la red primaria (PU, aquellos que han adquirido los derechos de uso de la banda en cuestión) para posteriormente realizar transmisiones sobre el mismo sin afectar significativamente a la QoS de los PUs. En el presente trabajo se estudia WISPER, un protocolo capaz de realizar tareas de monitoreo continuo (CntM) y detección de eventos (EDD) por medio de técnicas de CR sobre una única banda de frecuencia con el objetivo de identificar las características de funcionamiento que mejoran tanto el consumo de energía como la transmisión de datos en ambientes altamente congestionados. Los resultados muestran que al seleccionar cuidadosamente la longitud de las tramas y las tasas de cambio de estado en los nodos de CntM, se logra una mejora importante en el promedio de paquetes perdidos y consumo de energía por unidad de tiempo.

Palabras Clave:

Radio Cognoscitivo, QoS, WSN, Monitoreo Continuo, Detección de Eventos.

1. Introducción

El desempeño de una WSN está normalmente determinado por su consumo promedio de energía, lo que a su vez determina el tiempo de vida de la red (periodo de tiempo para el cual la red se mantiene funcional), debido a las restricciones de energía presentes en los nodos, los cuales suelen ser dispositivos de tamaño reducido y alimentados por baterías que son capaces del intercambio de información por medios inalámbricos. Sin embargo, al presentarse avances en la electrónica, otros parámetros de QoS han adquirido relevancia como lo son el retardo

promedio de reporte y la probabilidad de pérdida de paquete, los cuales determinan el desempeño general de la red mientras se encuentre activa. Con base en ello, las WSN pueden clasificarse como enfocadas en el desempeño o enfocadas en el costo (Frolik, 2004). Mientras las redes enfocadas en el desempeño buscan mejorar la QoS en determinados paquetes, sin dar especial importancia a que presenten un ligero incremento en el consumo energético (ello debido a que suelen contener nodos de mayor capacidad tanto de cómputo como de alimentación), las redes enfocadas en el costo buscan lograr el mejor consumo energético promedio por paquete de información transmitido, lo que incrementa el tiempo de vida de la red, aún cuando se transmitan grandes volúmenes de información. El análisis de desempeño llevado a cabo en protocolos híbridos (Israel Leyva-Mayorga, 2012; Manjeshwar and Agrawal, 2002; Bouabdallah et al., 2009) que realizan tanto CntM como EDD muestran ven-

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: isleyma@doctor.upv.es (Israel Leyva-Mayorga), mriveroa@ipn.mx (Mario E. Rivero-Angeles), ccarreto@ipn.mx (Chadwick Carreto-Arellano), vp1a@upv.es (Vicent Pla)

tajas importantes al ser comparados con protocolos que únicamente realizan CntM (Heinzelman et al., 2002; Younis and Fahmy, 2004) o EDD (Arampatzis et al., 2005; Manjeshwar and Agrawal, 2000) utilizando técnicas de acceso aleatorio (RA por sus siglas en inglés) en ambientes sin congestión. Sin embargo, se observa que RA no es eficiente en cuanto al uso de los recursos al existir numerosas fuentes que intentan transmisiones de forma simultánea, particularmente cuando el tráfico de la red aumenta. En este sentido, el desempeño en protocolos de RA es altamente dependiente del comportamiento de los eventos a monitorear, lo que ocasiona un mayor riesgo de comprometer su funcionamiento. Al incorporar CR a un protocolo basado en el monitoreo continuo para realizar el reporte de eventos, es posible incrementar la utilización del espectro, así como mejorar el consumo de energía promedio con respecto al uso de RA y, por lo tanto, obtener una mejor relación entre el consumo de energía y los paquetes transmitidos. Esto nos lleva a un incremento en el volumen de datos transmitidos mientras se mantiene un tiempo de vida de la red aceptable. En este artículo se presenta un protocolo para WSN basado en cluster con tramas TDMA modificadas, en el cual los miembros del cluster (CMs) pueden ser asignados a la tarea de realizar CntM o EDD durante cada uno de las rondas. El proceso de CntM se lleva a cabo por medio de rutinas de TDMA que incorporan una estrategia de activo-dormido para permitir que los nodos EDD transmitan su información en aquellas ranuras que se encuentren libres por medio del uso de CR. El desempeño de este protocolo es analizado con base en algunos parámetros de QoS como son el consumo energético por unidad de tiempo y el promedio de paquetes perdidos (tanto de CntM como de eventos) al modificar la longitud de las tramas, tasas de cambio de estados y la probabilidad de detección de evento.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: La Sección II revisa el trabajo previo relacionado a las redes de sensores de radio cognoscitivo (CRSN, por sus siglas en inglés), seguido del modelo del sistema y las consideraciones en la Sección III. La Sección IV presenta algunos resultados relevantes derivados de la simulación y, finalmente, el artículo concluye con un resumen de los resultados y conclusiones.

2. Trabajo Relacionado

Se ha planteado en (Akan et al., 2009; Yau et al., 2009) el uso de CR para lograr una disminución en el consumo de energía para la transmisión de paquetes. En el primer caso, esto se logra al monitorear el canal de comunicaciones y seleccionar las bandas que requieren de una menor potencia para la transmisión de información, típicamente aquellas que presenten menores niveles de ruido. Sin embargo, es importante observar que esto implica que los sensores son capaces de ajustar dinámicamente no sólo la banda de frecuencia para la transmisión sino también la potencia suministrada al amplificador, lo que significa una mayor carga en el procesador de los nodos. Por otro lado, en (Yau et al., 2009) se plantea el hecho de utilizar coordinadores para incrementar la eficiencia en el monitoreo del medio y, además, liberar a los nodos comunes de dicha tarea con el

objetivo de ahorrar energía. Los coordinadores son nodos especializados que suelen contar con alimentación continua, los cuales se encargan del monitoreo del canal de comunicaciones e informan continuamente su estado a los nodos de la CRSN. Sin embargo, no es posible incluir este tipo de nodos en redes desplegadas en lugares poco accesibles, ya que no se cuenta con un suministro fijo de energía.

En (Bae et al., 2010) se estudia el uso de paquetes de longitud variable para el incrementar el throughput de los protocolos de CR basados en el estándar IEEE 802.11, así como el uso de un único canal de comunicaciones. En dicho estudio se encuentra que, en efecto, el tráfico cursado presenta mejoras significativas, sin embargo no se analiza el consumo de energía y, además, se considera que la escucha del medio es ideal (los nodos no cometen errores en cuanto a la caracterización de la banda de frecuencia) e inmediato (el periodo de escucha del medio se considera de 0 unidades de tiempo), lo cual es poco realista, por lo que se considera que se requiere de un análisis más a fondo para conocer las posibles complicaciones que esto puede ocasionar.

En el presente trabajo, al igual que en (Bae et al., 2010), se considera el uso de CR sobre una única banda de frecuencia, sin embargo, se elimina el uso de paquetes de longitud variable. Por otro lado, se consideran algunos métodos para la escucha del medio y se presenta un estudio referente al consumo máximo de energía de WISPER.

Sobre sistemas industriales y automatización en donde se requiere el uso de redes de sensores capaces de enviar información tanto de monitoreo continuo como de eventos, en la literatura se encuentran múltiples ejemplos. En (J. C. Tafur, 2014), se estudia un sistema de teleoperación no lineal considerando un canal de comunicaciones con retardo. Un retardo importante en este tipo de sistemas puede degradar la estabilidad y el desempeño del sistema. Específicamente, se menciona que el retardo debe estar en el orden de milisegundos o segundos para tener un sistema eficiente. En este sentido, la red de sensores propuesta en este trabajo se puede implementar directamente en este sistema de teleoperación colocando nodos en los puntos clave de operación, como pueden ser los puntos de contacto físicos entre el sistema y el objeto a manipular. Los sensores enviarán información continua sobre la posición y estado de operación mientras que se programan para enviar reportes de alarma en caso de alguna lectura fuera de los niveles de operación normal. En (D. A. Bravo M., 2014), se estudia el cambio de velocidad en la unión prótesis-muñón al momento del impacto del pie con el suelo. En este sistema se pueden usar sensores en la prótesis que envíen información continua sobre el estado de la prótesis mientras que se puede enviar información de eventos al hacer contacto con el suelo. De nuevo, tanto el retardo como la pérdida de paquetes de monitoreo continuo y de eventos se puede adecuar para cumplir con los requerimientos del sistema. Por otro lado, este tipo de redes de sensores son de particular interés en sistemas móviles como los presentados en (D. Chaos, 2013) y (N. Cañasa, 2014). En ambos sistemas se requiere una comunicación en tiempo real por parte de los sensores que miden tanto información continua (como la dirección y posición del vehículo) como información por eventos

(cuando hay alguna variable o fenómeno externo que modifica la trayectoria del vehículo). Es importante mencionar que a diferencia de (J. C. Tafur, 2014; D. A. Bravo M., 2014; D. Chaos, 2013; N. Cañasa, 2014), en este artículo se presenta el diseño y análisis del sistema de comunicaciones necesario para el funcionamiento de la red de sensores de tal manera que se puedan ajustar los parámetros propios de la red para permitir un adecuado funcionamiento de los sistemas particulares presentados en (J. C. Tafur, 2014; D. A. Bravo M., 2014; D. Chaos, 2013; N. Cañasa, 2014).

3. Protocolo WISPER

WISPER (Wireless sensor network alternating cntm/cr Slots protocol for Preemptive Event Reporting) es un protocolo híbrido para WSN basado en TDMA que contempla el uso de radio cognoscitivo para el reporte de eventos. Como se puede observar en la Fig. 1, la ronda inicia con una etapa de formación de cluster (CF), en la cual los nodos se organizan en grupos para mejorar la eficiencia energética de las transmisiones. En este caso, antes de enviar su *joint packet* (mensaje de control que le proporciona al CH correspondiente el *id* del nodo en cuestión para ser incluido en el cluster), cada uno de los CMs realiza un proceso de selección de red, lo cual determinará sus características de funcionamiento hasta la siguiente etapa de CF. Dicho proceso puede llevarse a cabo con base en las características y capacidades de los sensores en caso de que se esté trabajando con una red heterogénea o aleatoriamente si se trata de una red homogénea. Inclusive, puede ser el administrador de la red que determine la pertenencia de cada nodo a cada red específica. En cualquier caso, con el fin de obtener resultados de la operación del sistema, modelamos esta pertenencia de los nodos a cada red usando una distribución binomial con probabilidad p de pertenecer a la red 1 y $1 - p$ de pertenecer a la red 2. La red 1 es considerada la red primaria y su funcionamiento se basa en TDMA para la transmisión de información de CntM, mientras que la red 2 es considerada la red secundaria y se encargará del monitoreo de eventos por medio del uso de radio cognoscitivo. Nótese que, dado que la red primaria genera información de manera periódica para realizar el monitoreo continuo, se opta por utilizar un protocolo de acceso garantizado, es decir, sin colisiones, para eficientar el proceso de entrega de paquetes. Por otro lado, en el caso de la red secundaria, en donde no se puede saber de antemano el número de nodos que detectan el evento ni el instante en que ocurrirá el envío de paquetes de eventos, el pre-asignar ranuras de tiempo no sería eficiente, ya que se desperdicia ancho de banda y se consume energía al estar escuchando constantemente el canal en espera de la recepción de este tipo de paquetes. Por lo tanto, para poder pertenecer a la red secundaria, es necesario que los nodos posean capacidades de CR, es decir, que tengan la capacidad de escuchar el canal y determinar si el canal compartido se encuentra libre u ocupado por nodos de la red primaria y ajustar su transceptor para poder transmitir en los instantes en donde el canal primario se encuentre libre. Con base en ello, los usuarios de la red 1 son considerados como primarios (PUs), mientras que los usuarios

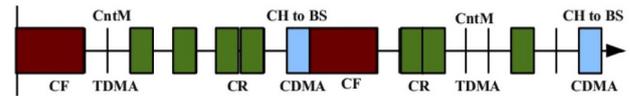


Figura 1: Rutina de tiempo para el protocolo WISPER.

de la red 2 son los usuarios secundarios (SUs). Una vez realizado este proceso, se envían los mensajes de control para la formación del cluster y los CHs generan la rutina de tiempo para sus CMs, cuya longitud de trama, M es fija y depende idealmente del número esperado de nodos en cada cluster. Con el fin de reducir la complejidad del sistema y del procesamiento que deben realizar los nodos, se estima el valor de M y se establece este valor fijo durante la operación de la red. Posteriormente se inicia la fase estable del protocolo (aquella en la que se realiza el intercambio de información referente al ambiente), la cual se lleva a cabo sobre un único canal ranurado. Cabe mencionar que las ranuras se asignan consecutivamente a los PUs, lo que significa que se asignan las primeras k ranuras a cada uno de los k PUs, en caso de que el número de ranuras exceda el número de PUs éstas quedan libres. Si ocurre el caso de que $k > M$, $k - M$ PUs carecerán de ranura asignada durante la ronda actual. Con el objetivo de ahorrar energía en la fase de CntM y de aumentar la cantidad de ranuras libres, los PUs cambian continuamente de estado activo a dormido y viceversa. Tanto la tasa de cambio de activo a dormido α como de dormido a activo β son definidas por el usuario de acuerdo a la aplicación y el administrador de la red programa estos valores en los nodos para que operen de forma autónoma. Cuando un nodo se encuentra dormido, no realiza transmisión alguna, sin embargo escucha el medio en momentos específicos para la recepción de posibles mensajes de control. Por otro lado, la ranura de TDMA que ha sido liberada, permite a los SUs hacer uso oportunístico del canal de comunicaciones por medio de CR, mejorando teóricamente el retardo en el reporte de eventos.

A continuación se enlistan algunos de los parámetros de la red que definen su funcionamiento y que se escogen a manera de ejemplo para obtener resultados numéricos como es el caso del número de nodos en la red, la posición de la estación base y la longitud de los paquetes:

- El número total de nodos desplegados es $N_t = 100$, los cuales se encuentran distribuidos uniformemente en un área comprendida entre las coordenadas $(0, 0)$ y $(100, 100)$. Con lo cual se tiene un área cuadrangular de 100×100 m.
- La estación base (BS) se encuentra situada en la coordenada $(200, 0)$. Con lo cual, cada transmisión de un CH a la misma representa, por lo menos, una transmisión de 100 m y por lo tanto consume una gran cantidad de energía. Esta situación puede considerarse como un escenario de alto consumo de energía comparado con el caso en que la estación base se encuentre dentro del área de monitoreo, por ejemplo, en el centro.
- Se utiliza un código CDMA diferente dentro de cada clus-

ter, tanto para las transmisiones de los CMs al CH como del CH a la BS, por lo tanto, no pueden ocurrir colisiones entre nodos de distintos clusters. Esta es una suposición que se ha utilizado en otros trabajos, como por ejemplo en (Heinzelman et al., 2002), que en este trabajo retomamos ya que el estudio detallado del uso de CDMA queda fuera del tema de este trabajo.

- Todos los nodos tienen la misma cantidad de energía disponible al inicio de la simulación. Esta suposición está enfocada a considerar el funcionamiento de la red desde el inicio de su operación cuando todos los nodos tienen baterías nuevas y con el mismo nivel de energía. En otros trabajos se ha considerado el caso en donde hay nodos con altos niveles de energía y otros nodos con bajos niveles de energía (Guzman-Medina et al., 2014). Sin embargo, este punto queda fuera del tema de este trabajo
- El sistema trabaja sobre un canal de comunicaciones ranurado, cada ranura de tiempo representa el tiempo necesario para la transmisión de un paquete de datos. En este caso, consideramos que la estación base, que en principio no tiene restricciones energéticas ya que puede estar conectada directamente a la red eléctrica, envía periódicamente un indicador de inicio de ranura para sincronizar a todos los nodos de la red.
- La longitud de un paquete de datos l_d es de 2 *kbits*, el cual comprende el identificador Id del nodo, un campo de *tipo* que especifica si se trata de un paquete de evento o de *CntM* y la carga del paquete. Dichos paquetes se transmiten en las etapas de *CntM* y *RA*, donde se realiza el monitoreo del ambiente y de los eventos. Dado que los nodos únicamente envían información referente a los sensores particulares para la aplicación, consideramos que esta es una longitud suficiente para la mayoría de las mediciones prácticas
- La longitud de un paquete de control l_c es de 1 *kbit* con los mismos campos que un paquete de datos pero con una carga de menor longitud. Dichos paquetes se transmiten durante la fase de *CF* y para proporcionar a los CMs la rutina de tiempo para cada ronda.
- La energía requerida para la transmisión de un paquete depende de la longitud l del mismo y de la distancia entre el emisor y receptor d de la forma descrita en Heinzelman et al. (2002). Específicamente:

$$E_{tx}(l, d) = l \times E_{elec} + l \times \epsilon_{fs} \times d^2 \quad (1)$$

Donde E_{elec} es la energía para encender los circuitos de comunicación, $\epsilon_{fs} \times d^2$ es la energía requerida por el amplificador, la cual depende de la distancia requerida de transmisión. A diferencia de (Heinzelman et al., 2002), durante el presente trabajo se definen dos niveles de energía para la transmisión, transmisiones de alto y de bajo consumo energético. Las transmisiones de alto consumo son aquellas que realiza el CH para alcanzar a la BS. Para

Tabla 1: Parámetros Establecidos

Parámetro	Valor
ϵ_{fs}	10 pJ/bit/m ²
E_{elec}	50 nJ/bit
Potencia en espera	13.5 μ W
Potencia en estado dormido	15 μ W
Energía inicial de los nodos	10 J
Tasa de transmisión	40 kbps

garantizar la transmisión exitosa de la información, el cálculo de la energía requerida se realiza considerando que el CH se encuentra en el extremo más lejano de la BS (en este caso, la coordenada (0, 100)). De esta forma, se utiliza la energía máxima posible para alcanzar a la BS. Las transmisiones de bajo consumo son realizadas por los CMs para comunicarse con su CH. En cuyo caso, la distancia a cubrir se ha fijado en 35 *m*. Al considerar un modelo con dos niveles de energía para la transmisión, la carga en el procesador de los nodos es menor que al calcular la energía mínima requerida (modelo utilizado en Heinzelman et al. (2002)) por medio de (1) y la transmisión es menos susceptible a variaciones en el canal de comunicación que pueden resultar en la pérdida de paquetes, especialmente en canales no simétricos.

- La energía requerida para la recepción de un paquete E_{rx} depende únicamente de la longitud del mismo, entonces:

$$E_{rx}(l) = l \times E_{elec} \quad (2)$$

- Los parámetros restantes se enlistan en la Tabla 1.

Algunas características que definen el comportamiento de WISPER son:

- Al término de la etapa de *CF*, cada uno de los CMs pertenece ya sea a la red primaria, con probabilidad $P(p)$ o a la red secundaria con probabilidad $P(s)$. Para efectos de obtener valores numéricos y a manera de ejemplo, utilizamos los siguientes valores: $P(p) = 0,5$ y, por lo tanto, $P(s) = 1 - P(p) = 0,5$.
- En caso de que la cantidad de CMs de la red primaria $N_p > M$, $N_p - M$ nodos primarios carecerán de ranura asignada. Este caso puede ocurrir en una aplicación práctica por lo que consideramos de interés estudiar el funcionamiento de la red en estas condiciones
- Para evitar colisiones, el CH proporciona a los nodos de la red secundaria de un orden para la transmisión de sus paquetes de evento con relación al número de ranura de tiempo disponible en la que se encuentre el sistema.

Tomando en consideración que los paquetes de eventos proporcionan una mayor cantidad de información al usuario, se implementa un método de control de congestión para incrementar la probabilidad de transmisión de los mismos. El mecanismo antes mencionado se basa en el

monitoreo de la cantidad de detecciones de evento por trama N_e con relación a la cantidad de ranuras de TDMA disponibles para una trama en particular, específicamente, dicho mecanismo es utilizado si:

$$N_e + \min(N_{pa}, M) > M \quad (3)$$

Siendo N_e la cantidad de paquetes de evento generados, N_{pa} es la cantidad de nodos de CntM activos con ranura asignada para la presente trama y M es la longitud de la trama. Por lo tanto, la cantidad de paquetes de TDMA perdidos por ranura se obtiene por medio de:

$$L_{CntM} = \max(0, \min(N_{pa}, N_{pa} + N_e - M)) \quad (4)$$

Por otro lado, la cantidad de paquetes de evento desechados para una trama específica es:

$$L_{EDD} = \max(0, N_e - M) \quad (5)$$

Cabe mencionar que la probabilidad de que esto ocurra es significativamente pequeña cuando la cantidad de CMs de la red secundaria, $N_s \approx M$.

- Al final de cada trama de TDMA se desechan todos los paquetes de evento que no hayan sido transmitidos. En este estudio consideramos que los nodos no tienen capacidad de almacenar paquetes en un buffer con el objetivo de contar con nodos pequeños y baratos. Adicionalmente, consideramos que la información relativa a los eventos es sensible al retardo y los paquetes anteriores carecen de interés para el administrador de la red.
- Se estudian los casos en los que se da un monitoreo ideal del canal de comunicaciones y cuando la decisión sobre la disponibilidad del mismo se basa en el monitoreo del estado de los CMs de la red primaria durante la última trama concluida, Tr_{n-1} .
- Al considerar la escucha ideal el medio se considera que los CMs de la red secundaria son capaces de detectar automáticamente el cambio de estado de los nodos de la red primaria y, por lo tanto, tomar decisiones referentes a la disponibilidad del medio en tiempo real. El caso de tener una escucha no ideal se ha considerado anteriormente (Lirio Castellanos-Lopez et al., 2014) y queda fuera del tema de este trabajo.
- Al considerar la decisión basada en Tr_{n-1} se considera que, al no existir transmisiones de los CMs de la red primaria excepto durante su ranura asignada, los nodos de la red secundaria toman decisiones sobre la disponibilidad del canal con base en la última transmisión de los nodos, esto ocasiona que ocurran cuatro escenarios posibles donde $Tr_{n-1} = z$ es el estado del nodo con la ranura asignada en la trama anterior y $Tr_n = z$ es su estado en la trama actual:
 1. $Tr_{n-1} = \text{activo}, Tr_n = \text{activo}$: Se da una escucha adecuada del medio y la ranura es etiquetada como “ocupada”.

2. $Tr_{n-1} = \text{dormido}, Tr_n = \text{dormido}$: Se da una escucha adecuada del medio y la ranura es etiquetada como “libre”, por lo que es posible realizar el reporte de eventos.
3. $Tr_{n-1} = \text{activo}, Tr_n = \text{dormido}$: Se comete error en la escucha del medio y la ranura es etiquetada como “ocupada”, por lo que la ranura queda libre y no se permite el reporte de eventos.
4. $Tr_{n-1} = \text{dormido}, Tr_n = \text{activo}$: Se comete error en la escucha del medio y la ranura es etiquetada como “libre”, por lo que si se intenta el reporte de eventos ocurrirá una colisión.

Finalmente, se enlistan algunas características que definen el comportamiento del ambiente:

- La generación de eventos se lleva a cabo considerando un proceso de Poisson en donde λ_{ev} es la tasa de arribos y $1/\mu_{ev}$ es el tiempo promedio de duración de los eventos. El uso de otro tipo de distribuciones es un tema de interés que dejamos abierto para un trabajo futuro. Como una primera aproximación al estudio de sistemas de redes de sensores con capacidades de CR consideramos que el uso de distribuciones exponenciales ofrece una visión inicial al desempeño de estos sistemas.
- El evento es detectado por los nodos asignados a la red secundaria al inicio de cada trama de TDMA con probabilidad p_ϵ si $t_{arr} \leq t \leq t_{mu}$.
- Se considera que los eventos afectan a toda el área de interés, esto con el objetivo de estudiar al sistema en ambientes altamente congestionados.

4. Resultados

Primeramente, en esta sección, se estudia el protocolo WISPER comparado con otros protocolos previamente publicados en la literatura como LEACH (Heinzelman et al., 2002), TEEN (Manjeshwar and Agrawal, 2000) y WALTER (Leyva-Mayorga et al., 2015). Ambos protocolos están basados en una estructura de clusters y TDMA para la transmisión garantizada de los datos medidos por los nodos.

En el protocolo LEACH se tienen dos fases de operación: Formación de Clusters y Estado Estable. En la primera se forman los clusters utilizando un protocolo de acceso aleatorio en donde los nodos se auto-eligen como cabezas de clusters dependiendo de si han tomado este rol anteriormente, como se explica en (Heinzelman et al., 2002). Una vez formados los clusters, los nodos transmiten su información durante un periodo de tiempo determinado (se consideran 20 segundos) utilizando una estructura TDMA sin colisiones. Como se puede observar, el protocolo WISPER que se propone en este trabajo, está basado en gran medida en LEACH, excepto que en WISPER se consideran dos tipos de información (monitoreo continuo y por eventos) además de hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico al utilizar los mismos canales TDMA para enviar ambos tipos de paquetes.

El protocolo TEEN es relevante en este contexto ya que permite la transmisión tanto de paquetes relevantes a eventos como monitoreo continuo y también está basado en la formación de clusters. En TEEN, se transmiten los paquetes usando un protocolo de acceso aleatorio y no utiliza un esquema TDMA. Adicionalmente, se propone la transmisión de información cuando los datos medidos son diferentes a los enviados previamente, por lo que se reduce el consumo de energía cuando las condiciones a medir son relativamente estables.

Por otro lado, el protocolo WALTER, también está basado en LEACH y permite el envío de información en tiempo continuo y por eventos. WALTER agrega un periodo adicional al final de la estructura TDMA del Estado Estable para transmitir los datos relativos a los eventos, en caso de que existan, pero lo hace utilizando un protocolo de acceso aleatorio en donde los nodos que detectan el evento contienden por el uso del canal. Dado que no se sabe de antemano cuáles ni cuántos nodos tienen paquetes de eventos, no se usa un esquema TDMA para no desperdiciar los recursos de ancho de banda. Sin embargo, no se garantiza el envío de dicha información en un tiempo determinado. A diferencia de WALTER, WISPER permite el envío de los datos de evento dentro de la estructura TDMA (en detrimento de los datos de monitoreo continuo) para reducir el tiempo de reporte. Una variante de WALTER es utilizar este periodo de reporte de eventos antes de la estructura TDMA en vez de al final.

A continuación se comparan los protocolos LEACH, TEEN, WALTER v1 (en donde la etapa de reporte de eventos se encuentra al final de la trama TDMA), WALTER v2 (en donde la etapa de reporte de eventos se encuentra al inicio de la trama TDMA y WISPER) en términos del tiempo de vida de la red y el consumo promedio de energía. En estos resultados se considera una tasa de generación de 2 eventos por segundos, se generan en promedio 19 clusters con 5 nodos por cluster. Por tanto, en promedio se tiene un nodo por cluster detectando y reportando el evento con 20 transmisiones por cluster en LEACH, WALTER v1 y v2 y WISPER. Por otro lado, como TEEN no tiene una estructura TDMA, genera en promedio 23 transmisiones por segundo (20 transmisiones de monitoreo continuo y 3 transmisiones de evento) usando el protocolo de acceso aleatorio para tener condiciones equivalentes en todos los protocolos considerados. Se puede observar que tanto WISPER como WALTER tienen un menor consumo de energía que el caso de LEACH y TEEN. La razón de este comportamiento es que, por un lado, LEACH asigna ranuras de tiempo que en caso de no haber evento son desperdiciadas y el CH consume energía en la escucha de dichas ranuras vacías, mientras que en TEEN el uso de un protocolo de acceso aleatorio genera colisiones que no se tienen en un esquema basado en TDMA. Por otro lado, WISPER y WALTER tienen un consumo de energía similar, con la diferencia importante que en WISPER no se desperdicia ancho de banda ya que los nodos con eventos a reportar hacen uso de las ranuras asignadas a los nodos de monitoreo continuo, mientras que en WALTER hay un tiempo que se desperdicia en caso de que no se detecte ningún evento.

Una vez que se ha comparado el funcionamiento de WISPER en términos de otros protocolos basados en clusters y que

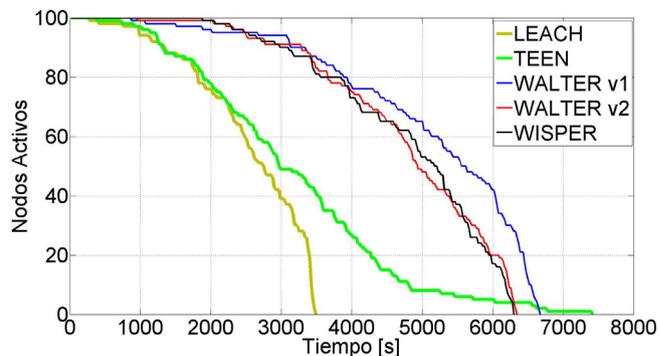


Figura 2: Tiempo de vida de la red

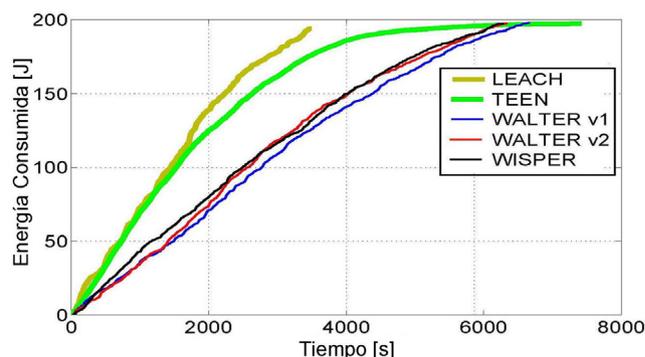


Figura 3: Consumo de energía promedio

permiten el envío de paquetes de eventos y monitoreo continuo, ahora se realiza un análisis del protocolo WISPER mas a detalle. En particular, se desea comprobar que la cantidad de paquetes de evento perdidos es poco significativa. Para ello se ha estudiado el sistema al considerar distintas longitudes de trama M y probabilidades de escucha de evento p_e para los diferentes métodos de escucha del medio antes mencionados (Escucha Ideal y basada en Tr_{n-1}), los paquetes de evento desechados para cada método se presentan en la Fig. 4. Para la obtención de dichos resultados se establecen $\alpha = \beta = 0,1$. Se puede obser-

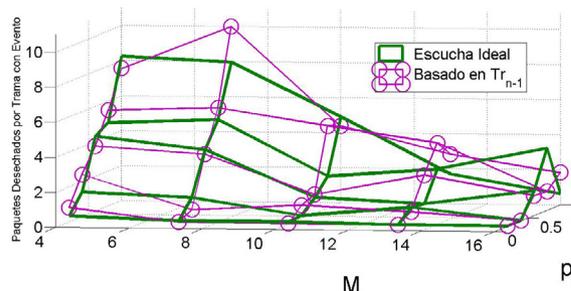


Figura 4: Promedio de paquetes de evento desechados por trama para los distintos métodos de escucha del medio.

var que, a pesar de que se da cierta variabilidad en los datos, se puede identificar cierta tendencia en la que los paquetes perdi-

dos aumentan al disminuir M y al aumentar p_e . Sin embargo, es importante observar que, debido a que el promedio de CMs por cluster es cercano a 19, cerca de 9 PUs son asignados a la red secundaria en promedio por ronda. Entonces, al establecer $p_e = 1$ se generan, en promedio, 9,5 paquetes de evento por trama con evento, es por ello que para valores de $p_e = 1$ y $M < 10$ se pierde una gran cantidad de paquetes debido a que la longitud de trama no es suficiente para transmitirlos y, además, a los cambios frecuentes en el estado de los nodos, lo que ocasiona que el método para el control de saturación de las tramas no libere las ranuras necesarias para la transmisión de paquetes de evento.

Con base en lo obtenido, se recomienda que la red de sensores opere en condiciones donde $M \geq \bar{N}_p$ y $p_e \leq 0,4$, para asegurar que los nodos de CntM tengan una alta probabilidad de poseer una ranura asignada y se obtiene un adecuado porcentaje de nodos de la red secundaria que reportan el evento sin ocasionar una frecuente saturación de las tramas. Estas condiciones de operación se sugieren cuando la aplicación requiera obtener la mayor cantidad de información relacionada con el evento monitoreado de manera continua. Sin embargo, para aplicaciones en donde se puede soportar una mayor cantidad de paquetes perdidos para los datos de monitoreo continuo, se puede reducir el número de ranuras necesarias, M , para a su vez, reducir el costo de implementación.

Otro hecho importante es que la cantidad de paquetes perdidos para el método basado en Tr_{n-1} es, para la mayoría de los casos, superior al obtenido con la escucha ideal del medio, sin embargo la diferencia observada no es significativa. Esto significa que, para los valores seleccionados de α y β ambos métodos son adecuados para la escucha del medio.

Para continuar con el análisis de la probabilidad de reporte exitoso y de paquetes perdidos, se compara el promedio de paquetes de evento desechados con los paquetes descartados de CntM. Recordemos que el CH tiene la tarea de informar a sus CMs sobre la saturación de la trama y, por lo tanto, solicitar la liberación de ranuras para el reporte de eventos.¹ Los resultados al implementar dicho mecanismo se muestran en la Fig. 5.

Dichos resultados muestran que WISPER y, en específico, su método de control de saturación presenta el comportamiento deseado. Mediante dicho mecanismo, el protocolo es capaz de incrementar significativamente la probabilidad de reporte exitoso para los paquetes de evento cuando los recursos no son suficientes. Esto se puede observar claramente para el caso donde $M = 4$ y $p_e = 1$, donde al existir una saturación constante de las tramas, se liberan las 4 ranuras disponibles de CntM. Es importante mencionar que las ranuras de tiempo no asignadas no se consideran como ranuras desechadas, esto es, para los casos en los que $\bar{N}_p > M$ se tienen, en promedio $\bar{N}_p - M$ ranuras no asignadas, por lo tanto, el máximo de paquetes de CntM descartados por trama, L_{CntM} es M .

A continuación se estudia a fondo el consumo energético de

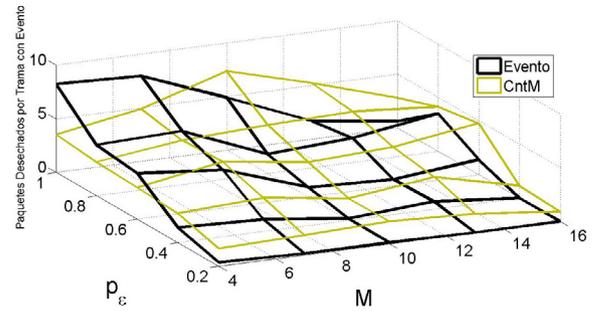


Figura 5: Promedio de paquetes de evento y de CntM desechados por trama para los distintos métodos de escucha del medio.

WISPER para así garantizar la eficiencia en dicho parámetro y, además, identificar los parámetros que permitan mantener una red funcional por el mayor tiempo posible. Cabe mencionar que es posible calcular el consumo de energía promedio por trama para el caso en el que no se detectan eventos (E_{noev}) y en saturación (E_{sat} , cuando la cantidad de paquetes a transmitir en una trama específica es mayor o igual a las ranuras disponibles) con base en la longitud de la trama en ranuras de tiempo M , la energía para la transmisión de un paquete E_{tx} (E_{txch} para los CHs) y la energía requerida para la recepción de un paquete E_{rx} de la forma:

$$E(E_{noev}) = p_a \min(\bar{N}_p, M) E_{tx} + M E_{rx} + E_{txch} \quad (6)$$

$$E_{sat} = \min(M, N_{pa} + N_s) E_{tx} + M E_{rx} + E_{txch} \quad (7)$$

Donde p_a es la probabilidad de que un PU se encuentre activo durante su ranura asignada, \bar{N}_p es la cantidad promedio de PUs por cluster y N_s es la cantidad de SUs en la presente trama (ya que se considera que cada uno de los nodos de la red secundaria ha detectado el evento). Es importante mencionar que las ecuaciones presentadas en esta sección suponen que no existe error en la escucha del medio por parte de los nodos de la red secundaria y, por lo tanto, pueden no ser válidas para algunas estrategias de escucha del medio.

Por otro lado, se puede observar que el consumo energético por trama de WISPER en estado de saturación equivale al de un protocolo exclusivo de CntM basado en cluster, en específico, LEACH, al definir longitudes similares de trama. Por lo tanto, al trabajar en ambientes con menores niveles de saturación, se obtienen mejoras en cuanto al consumo energético, por lo que la eficiencia energética de WISPER es mejor que en el caso de protocolos convencionales de monitoreo continuo. Finalmente, se ha obtenido el consumo energético promedio para ambos métodos de escucha del medio (Escucha Ideal y Basado en Tr_{n-1}) y se ha calculado dicho consumo en estado de saturación al establecer $p_e = 1$ por medio de (7). Los resultados obtenidos se encuentran en la Fig. 6, de donde se puede validar el uso de (7) para el cálculo del consumo máximo al considerar la escucha ideal del medio. Las escasas ocasiones en las que el consumo basado en Tr_{n-1} supera al máximo calculado se deben a la ocurrencia de colisiones, donde es posible un doble gasto energético debido a la transmisión de dos paquetes de datos simultáneamente. Cabe mencionar que, en caso de que esto

¹Cabe mencionar que el mecanismo por el cual el CH determina si existe o no saturación en la trama no es sencillo y, por lo tanto, es uno de los puntos importantes a tratar en el trabajo a futuro.

suceda, se solicita la retransmisión del paquete de evento, lo que incrementa el consumo promedio por trama. Sin embargo, la frecuencia en la ocurrencia de dichos escenarios no es significativamente alta, por lo que se obtiene un porcentaje de error considerablemente bajo. En conclusión, es posible usar (7) para obtener una estimación del consumo energético máximo por trama para cada uno de los clusters de la red.

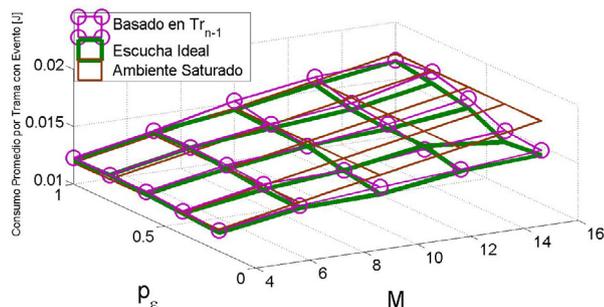


Figura 6: Consumo energético promedio por trama para los distintos métodos de escucha del medio y en estado de saturación.

Con base en los resultados presentados hasta el momento en la presente sección, se puede afirmar que ambos métodos son adecuados para la escucha del medio ya que no impactan significativamente la QoS del sistema y, específicamente, la transmisión de los paquetes de evento. Debido a ello se procede a analizar algunos de los parámetros involucrados en el cambio de estado de los nodos de la red primaria, específicamente, α y β . Ahora, con base en los resultados anteriores, se ha seleccionado $M = 10$ debido a que proporciona un equilibrio entre el consumo energético promedio por trama y la probabilidad de reporte exitoso de evento.

Inicialmente, se analiza la cantidad promedio de paquetes perdidos de CntM \bar{L}_{CntM} en función de α y β al establecer $p_e = 0,2$, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 7. Dichos

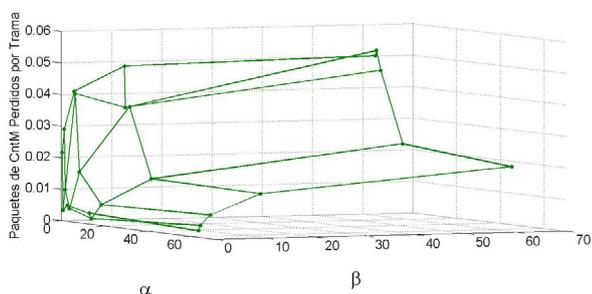


Figura 7: Promedio de paquetes de CntM perdidos por trama, \bar{L}_{CntM} en función de α y β .

resultados han sido calculados al considerar cada una de las tramas simuladas, sin importar que se haya detectado o no evento alguno. Como se puede observar, se da un incremento importante en \bar{L}_{CntM} al aumentar β , esto ocurre debido a que, al aumentar dicho parámetro, los nodos se encuentran un menor tiempo en estado dormido. Por otro lado, al aumentar α se observa un decremento en dicho parámetro debido a un proceso inverso al

comentado anteriormente. Específicamente, la probabilidad de que un nodo se encuentre en estado activo o dormido es:

$$P_a = \frac{1/\alpha}{1/\alpha + 1/\beta} \tag{8}$$

$$P_d = \frac{1/\beta}{1/\alpha + 1/\beta} \tag{9}$$

Recordemos que los nodos de la red primaria pueden transmitir información únicamente cuando se encuentren en estado activo, por lo tanto, otro parámetro que puede verse afectado por las tasas de cambio de estados es el consumo energético promedio. Dicho parámetro de QoS ofrece también, para el caso de WISPER una idea de las transmisiones generadas por unidad de tiempo, al tratarse de un protocolo basado en TDMA.

Los resultados obtenidos al evaluar la potencia promedio consumida [J/s] se muestran en la Fig. 8.

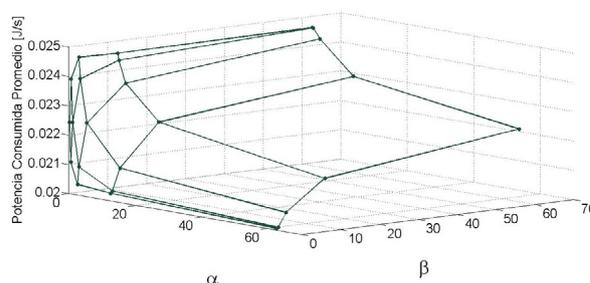


Figura 8: Consumo energético promedio por unidad de tiempo en función de α y β .

En la gráfica anterior se observa un comportamiento muy similar al de la Fig. 7, por lo tanto, se podría afirmar que para mejorar el desempeño de WISPER es recomendable la selección de valores considerablemente altos para α y β , sin embargo, esto implica que:

- Debido a que el método utilizado para la decisión de la disponibilidad de las ranuras se basa en el estado del nodo en cuestión durante la trama anterior, si dicho nodo cambia de estado frecuentemente, la probabilidad de que se cometan errores se ve incrementada considerablemente.
- El mecanismo para el control de saturación de las tramas es llevado a cabo por el CH y se basa en comparar la cantidad de paquetes de evento a reportar en la trama N_e y compararlo con el número de ranuras libres en la trama $M - N_{pa}$. En caso de que el número de nodos activos con ranura asignada N_{pa} varíe significativamente entre ranuras, pueden ocurrir fallas en dicho mecanismo.

Entonces, el decremento en los paquetes perdidos de CntM y el consumo energético es debido a que los nodos que escuchan el medio no son capaces de determinar el estado del mismo y, por lo tanto, su transmisión se ve comprometida. Esto ocurre, específicamente para los puntos de las Fig. 8 y 7 donde se cumple que ($\alpha > 10, \beta > 10$). Debido a esto se estudia a mayor detalle el sistema para tasas bajas de cambio de estado,

los resultados referentes a la potencia consumida y el promedio de paquetes de $CntM$ perdidos se muestran en las Fig. 9 y 10 respectivamente.

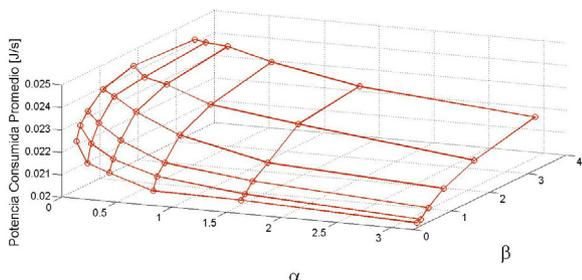


Figura 9: Consumo energético promedio por unidad de tiempo en función de α y β .

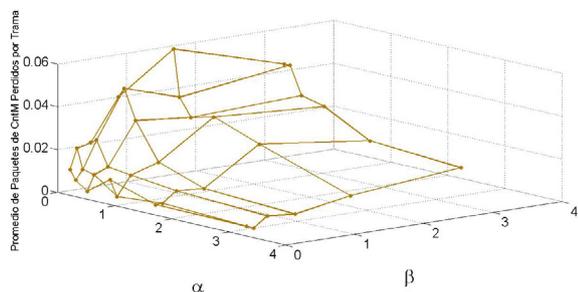


Figura 10: Promedio de paquetes de $CntM$ perdidos por trama, \bar{L}_{CntM} en función de α y β .

Otro punto importante a tratar es que se han obtenido resultados que sugieren que el límite superior para los paquetes de $CntM$ perdidos en promedio por trama, $max(\bar{L}_{CntM}) = 0,06$ al considerar $M = 10$ y $p_e = 0,2$, lo que sugiere una probabilidad de pérdida de paquete significativamente baja. Cabe mencionar que se trata de un comportamiento deseado, ya que WISPER está enfocado a aplicaciones en las que se requiere la transmisión de grandes cantidades de información.

Como punto final, se procede a evaluar el promedio de paquetes de $CntM$ perdidos y el consumo energético de WISPER en función de las tasas de cambio de estado, α y β , así como de la longitud de trama M . Cabe mencionar que los resultados para tasas de cambio de estados considerablemente altas son únicamente de carácter ilustrativo, ya que ha quedado claro que no es recomendable la selección de dichos valores.

Para llevar a cabo dicho análisis, se ha estudiado el consumo energético promedio por trama y por unidad de tiempo. Se puede observar de la Fig. 11 que, al disminuir la longitud de la trama se logra un ahorro energético al seleccionar dicho parámetro como unidad de tiempo, sin embargo, se observa un incremento considerable en el consumo por segundo (Fig. 12). Ello se debe a que las tramas de menor longitud asignan un menor número de ranuras para TDMA, sin embargo, presentan una mayor probabilidad de saturación al darse la presencia de eventos e implican una mayor cantidad de transmisiones de al-

to consumo (por parte de los CHs) por segundo. Por otro lado, al observar el caso en el que $M = 15$, se observa un mayor consumo por trama pero el consumo por unidad de tiempo se ve disminuido. Dicho comportamiento es causado por la mayor cantidad de ranuras de TDMA asignadas por trama, sin embargo también se incrementa la probabilidad de que las ranuras finales de cada trama no sean utilizadas, incluso con la presencia de eventos. Esto ocasiona cierto desperdicio de recursos y, en concreto, reduce la cantidad de información recolectada con respecto al caso en el que se selecciona $M = 10$.

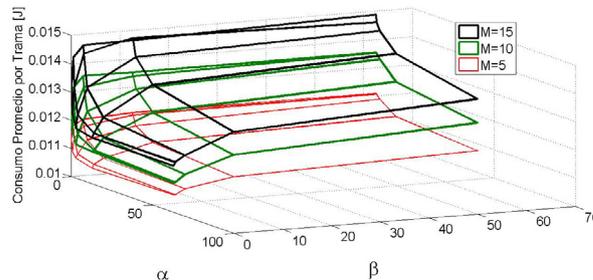


Figura 11: Consumo energético promedio por trama en función de α , β y M .

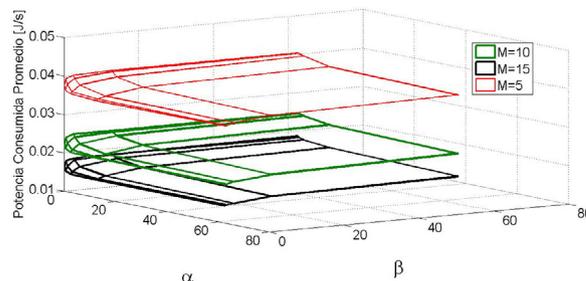


Figura 12: Consumo energético promedio por unidad de tiempo en función de α , β y M .

De forma similar, las Fig. 13 y 14 muestran los paquetes de $CntM$ perdidos en promedio por trama y por segundo respectivamente. Contrario al caso anterior, se observa que para $M = 5$ se pierde una mayor cantidad de paquetes por trama así como por segundo que al seleccionar valores mayores de M , de forma análoga, al seleccionar $M = 15$ se pierde una menor cantidad de paquetes por trama y por segundo que al seleccionar valores menores de M . Sin embargo, la diferencia observada entre los resultados de $M = 10$ y $M = 15$ es poco significativa, lo que significa que la calidad de servicio ofrecida es prácticamente idéntica para ambos casos en cuanto a la probabilidad de pérdida de información poco relevante. Debido a que se ha observado que la probabilidad de pérdida de paquetes de evento es significativamente baja para los distintos valores estudiados de M (véase la Fig. 5) con relación a los paquetes perdidos de TDMA, este último representa uno de los parámetros a considerar para una adecuada selección de M . En específico, para valores donde $M \approx \bar{N}_p$, el promedio de paquetes de $CntM$ perdidos por trama, \bar{L}_{CntM} es considerado como aceptable.

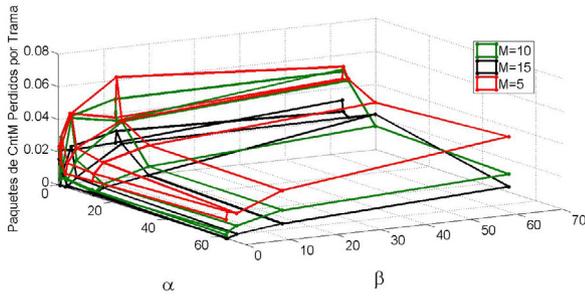


Figura 13: Paquetes de CntM perdidos en promedio por trama en función de α , β y M .

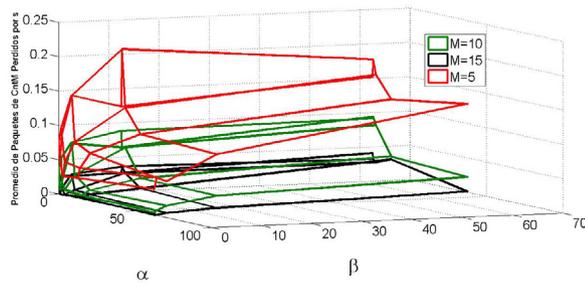


Figura 14: Paquetes de CntM perdidos en promedio por unidad de tiempo en función de α , β y M .

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta, estudia y analiza el protocolo para la transmisión de datos en monitoreo continuo y por eventos basado en radio cognitivo, WISPER. El protocolo está basado en la formación de clusters como el caso de LEACH o WALTER, pero haciendo un uso eficiente del espectro radioeléctrico al transmitir información prioritaria relativa a eventos en los mismos canales usados para el monitoreo continuo. Por tanto, no se requiere asignar tiempos adicionales para el reporte de eventos que generen mayor consumo de energía y retardos. El desempeño de WISPER se estudia considerando que los nodos en monitoreo continuo encienden y apagan sus transeceptores de manera aleatoria para permitir la transmisión oportunista de los datos por eventos. Se presentan resultados numéricos relativos al funcionamiento del sistema variando los tiempos de encendido y apagado, así como el número de nodos y la probabilidad de detectar un evento. Es importante mencionar que, estos resultados son obtenidos considerando diversos escenarios que pueden ser modificados en trabajos futuros para determinar los alcances de WISPER. Por ejemplo, se puede considerar el uso de buffers en los nodos para reducir el número de paquetes perdidos, así como la posición de las estaciones base y la longitud de los paquetes, entre otros.

Al tratarse de un protocolo basado en TDMA, el desempeño de WISPER presenta una alta independencia al comportamiento de los eventos. Por otro lado, los parámetros que presentan el mayor impacto en el desempeño del protocolo son la longitud de las tramas de TDMA con relación a los nodos de cada una de las redes, primaria y secundaria en los clusters, así como las

tasas de cambio de estados α y β . Al modificar dichos parámetros es posible controlar los parámetros de QoS, entre los que se encuentran el consumo de energía por unidad de tiempo y el promedio de paquetes de CntM y de eventos desechados por trama.

En lo que respecta al consumo energético y contrario a lo que ocurre en protocolos de RA, es posible calcular fácilmente el consumo máximo de WISPER por trama al conocer la longitud M de cada una de ellas y los nodos asignados a cada una de las sub-redes. Específicamente, se recomienda la selección de $M \approx \bar{N}_p$ para evitar una pérdida excesiva de paquetes y, además, evitar el desperdicio de grandes cantidades de ranuras de tiempo y obtener un consumo de energía por unidad de tiempo adecuado.

En lo que respecta a las tasas de cambio de estados, se recomienda la selección de valores relativamente pequeños, donde $\alpha \approx \beta$, principalmente para evitar que una gran cantidad de nodos de la red primaria cambien de estado de una trama a otra. En caso contrario se corre el riesgo de que los nodos de la red secundaria no sean capaces de identificar las ranuras disponibles adecuadamente (al utilizar métodos de escucha del medio que se basan en estados anteriores de los nodos de la red primaria) y de neutralizar el mecanismo de control de saturación implementado por los CHs.

Finalmente, WISPER es un protocolo que, al estar basado en TDMA no se enfoca en la minimización del retardo promedio de reporte, por lo que no es recomendable para aplicaciones en las que dicho parámetro es considerado como crucial. Sin embargo, presenta un desempeño por demás aceptable en ambientes y aplicaciones que requieren el manejo de grandes volúmenes de información, específicamente, aquellas en las que se realiza el monitoreo de una gran gama de eventos que pueden presentar comportamientos distintos, ya que, estos no afectan significativamente el desempeño de WISPER. Específicamente, el consumo máximo de WISPER por trama equivale al consumo de energía promedio de LEACH para tramas de igual longitud, entonces, la eficiencia energética de WISPER se encuentra garantizada para ambientes que induzcan niveles moderados de saturación en la red.

English Summary

Performance Analysis of a TDMA-based Wireless Sensor Networks Protocol with Cognitive Radio Capabilities

Abstract

The main objective of Cognitive Radio (CR) is optimizing spectrum utilization in multi-carrier systems and has been studied to increase performance in wireless sensor networks (WSN). Special attention has been given to quality of service (QoS) parameters such as energy consumption, average report delay and collision probability. However, some issues have not received enough attention due to the fact that nodes tend to be lower-end devices with limited capabilities, therefore, traditional CR techniques may not be implemented efficiently. CR allows se-

condary users (SUs, nodes that have no license over the operation band) to use the channel in an opportunistic manner as long as they do not cause significant interference on the primary users (PUs, nodes with a specific license over the allocated band). This is achieved by sensing the channel and identifying vacant bands to make use of them dynamically. In this paper, the WISPER protocol is studied, which is a WSN protocol capable of performing both, continuous monitoring (CntM) and event driven detection (EDD) duties by implementing a single-band CR scheme in order to identify the operational parameters that enhance both, energy consumption and data transmission in highly saturated environments. Results show that, by carefully selecting frame length and state-switching rates, average discarded packets and power consumption are optimized.

Keywords:

Cognitive Radio, Quality of Service, Wireless Sensor Networks, Continuous Monitoring, Event Driven Detection

Agradecimientos

La investigación de Israel Leyva-Mayorga es parcialmente financiada por una beca otorgada por CONACyT-Gobierno del Estado de México. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONACyT, a través del proyecto Ciencia Básica 183370 y el proyecto IPN SIP 20150584. También se ha recibido apoyo por parte del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno Español a través del proyecto TIN2013-47272-C2-1-R.

Referencias

- Akan, O., Karli, O., Ergul, O., July 2009. Cognitive radio sensor networks. *IEEE Network* 23 (4), 34–40.
- Arampatzis, T., Lygeros, J., Manesis, S., June 2005. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Mediterrean Conference on Control and Automation*. pp. 719–724.
- Bae, Y. H., Alfa, A. S., Choi, B. D., 2010. Performance analysis of modified IEEE 802.11-based cognitive radio networks. *IEEE Communication Letters* 14 (10), 975–977.
- Bouabdallah, N., Rivero-Angeles, M. E., Sericola, B., 2009. Continuous monitoring using event-driven reporting for cluster-based wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 58 (7), 3460–3479.
- D. A. Bravo M., C. F. R. R., 2014. Modelo biomecánico de una prótesis de pierna. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 417–425.
- D. Chaos, D. Moreno-Salinas, e. a., 2013. Control no lineal de un aerodeslizador no holonómico con acciones de control limitada. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 10, 402–412.
- Frolik, J., March 2004. QoS control for random access wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Vol. 3. pp. 1522–1527 Vol.3.
- Guzman-Medina, C., Rivero-Angeles, M., Rubino, G., Aug 2014. Residual energy-based transmission schemes for event reporting wireless sensor networks. In: *International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*. pp. 95–99.
- Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., Balakrishnan, H., 2002. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Journal on Wireless Communications* 1 (4), 660–670.
- Israel Leyva-Mayorga, Mario E. Rivero Angeles, e. a., 2012. Data transmission strategies for event reporting and continuous monitoring applications in wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications BWCCA*. pp. 1–7.
- J. C. Tafur, C. E. García, e. a., 2014. Diseño de un controlador por convergencia de estado para un sistema teleoperado no lineal con retardo de comunicación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 406–416.
- Leyva-Mayorga, I., Rivero-Angeles, M. E., Carreto-Arellano, C., Pla, V., 2015. QoS analysis for a nonpreemptive continuous monitoring and event-driven WSN protocol in mobile environments. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2015.
- Lirio Castellanos-Lopez, S., Cruz-Perez, F., Rivero-Angeles, M., Hernandez-Valdez, G., March 2014. Joint connection level and packet level analysis of cognitive radio networks with VoIP traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32 (3), 601–614.
- Manjeshwar, A., Agrawal, D. P., 2000. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE Parallel and Distributed Processing Symposium*. pp. 2009–2015.
- Manjeshwar, A., Agrawal, D. P., 2002. APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*.
- N. Cañasa, W. Hernández, e. a., 2014. Modelo biomecánico de una prótesis de pierna. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 11, 179–190.
- Yau, K.-L., Komisarczuk, P., Teal, P., Oct 2009. Cognitive radio-based wireless sensor networks: Conceptual design and open issues. In: *IEEE Conference on Local Computer Networks, 2009 (LCN)*. pp. 955–962.
- Younis, O., Fahmy, S., Oct 2004. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 3 (4), 366–379.