



XVIII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Evaluación de protocolos MAC para comunicaciones máquina a máquina

On the performance of MAC protocols for machine to machine communications

Erik Ortiz Guerra¹, Miguel Otero Rojas², Samuel Montejo-Sánchez³

¹Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, erik@uclv.edu.cu

²Delegación Provincial del MINIT Villa Clara, Cuba, maorte1994@gmail.com

³Samuel Montejo-Sánchez. Programa Institucional de Fomento a la I+D+i, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile, smontejo@utem.cl

Resumen: La *Internet de las Cosas* tiene como objetivo interconectar la mayoría de los dispositivos y equipos que nos rodean. Uno de los componentes básicos de este nuevo paradigma son las comunicaciones máquina a máquina destinadas a garantizar la interacción entre los dispositivos. Una característica de los escenarios comunicación máquina a máquina es la presencia de muchos equipos comunicándose entre sí. Esto, unido a que la comunicación se realiza a través del mismo canal, provoca la necesidad de utilizar protocolos acceso al medio, que garanticen el empleo ordenado y eficiente del canal. En el presente artículo se evalúa el desempeño de los protocolos Aloha Ranurado, FASA y DPCF mediante simulación. Los resultados en términos de *throughput*, *goodput* y consumo de energía, demuestran que el DPCF presenta el mejor desempeño. Estas ventajas se consiguen a expensas de aumentar la complejidad del mecanismo de acceso al canal respecto al Aloha ranurado y el FASA.

Abstract: *The Internet of Things (IoT) aims to interconnect most of the devices and equipment that surround us. One of the basic components of this new paradigm of the internet is machine-to-machine communications, since they guarantee the interaction between the devices. One feature of the machine-to-machine communication scenarios is the presence of many device communicating with each other. This, together with the fact that communication is carried out through the same channel, causes the need to use medium access control protocols, which guarantees the orderly and efficient use of the channel. In this article, the performance of the Aloha Slotted, FASA and DPCF protocols are evaluated through simulation. The results in terms of throughput, goodput and energy, show that the DPCF outperforms all others. These advantages are achieved at the expense of increasing the complexity of the channel access mechanism with respect to slotted Aloha and FASA.*

Palabras Clave: comunicaciones M2M, costo energético, protocolos MAC.

Keywords: M2M communications, energy cost, MAC protocols.



1. Introducción

El mundo de las tecnologías de la información y las comunicaciones está en permanente transformación. Una de las olas tecnológicas que está en pleno desarrollo en la actualidad es la transición del Internet de las Personas al Internet de las Cosas (*IoT: Internet of Things*) (Tayeb et al., 2017). Su potencial se encuentra en la capacidad de combinar datos con personas, procesos y objetos, a partir de redes de comunicaciones, sensores y procesos analíticos. Se están desarrollando aplicaciones que harán más fácil la vida de las personas, mejorarán los servicios públicos y aumentarán la seguridad de la información. Los objetos tendrán con el pasar del tiempo cada vez más sensores y actuadores que se comunicarán con un sistema inteligente y desencadenará nuevas acciones.

Las redes inteligentes (*Smart Grid*) poseen la capacidad de mezclar varios protocolos como el 802.11, el 802.15.1 y el 802.15.4 para establecer comunicaciones entre sus componentes (Komninos et al., 2014). Dentro de estas comunicaciones, las que se realizan Máquina a Máquina (*M2M* por sus siglas en inglés) juegan un papel fundamental, ya que el objetivo principal del *IoT* es que los equipos tengan la capacidad de comunicarse entre sí (Rajandekar and Sikdar, 2015), para realizar acciones en las cuales anteriormente se necesitaba la presencia de las personas y de esta manera, hacer más fácil y cómoda la vida de los seres humanos.

En la mayoría de los casos las comunicaciones *M2M* están presentes en escenarios en los cuales el canal de comunicaciones es compartido (Rajandekar and Sikdar, 2015, Subhani et al., 2015). Esto provoca que sean necesarios mecanismos de Control de Acceso al Medio (*MAC* por sus siglas en inglés) que garanticen el empleo del canal de manera ordenada y eficiente. El protocolo de control de acceso al medio adecuado para las comunicaciones *M2M* es un problema aún sin resolver (Gaurav and Pandey, 2018). En los últimos años han sido desarrollados diferentes protocolos *MAC*, con el objetivo de lograr un alto desempeño de estas comunicaciones. En investigaciones recientes diferentes trabajos han desarrollado variantes de protocolos conocidos como por ejemplo el ALOHA (Casares-Giner and Martínez-Bauset, 2017, Chang and Chang, 2015, Elkourdi et al., 2018, George and Venkatesh, 2018, Song et al., 2017). Cada uno con sus ventajas y sus limitaciones; pero no son comunes las investigaciones que contengan la recopilación de varios de ellos, pues en la mayoría de los casos son tratados de forma individual.

En este trabajo se evalúan tres protocolos MAC bien conocidos, teniendo en cuenta el *throughput*, el *goodput* y el consumo de energía. En la Sección 2 se describe el escenario de aplicación y las métricas empleadas. Los protocolos a evaluar y sus particularidades son descritos en la Sección 3. Los resultados son discutidos en la Sección 4 y la Sección 5 concluye el trabajo.

2. Modelo del sistema y métricas de evaluación

En este trabajo se considera un entorno como el mostrado en la Figura 1. Varios dispositivos se distribuyen en un área geográfica e intentan comunicarse con una estación base (BS por sus siglas en inglés). Todos los dispositivos intentan comunicarse con la BS en función de sus requerimientos de tráfico y el canal de comunicaciones es compartido por todos los dispositivos.

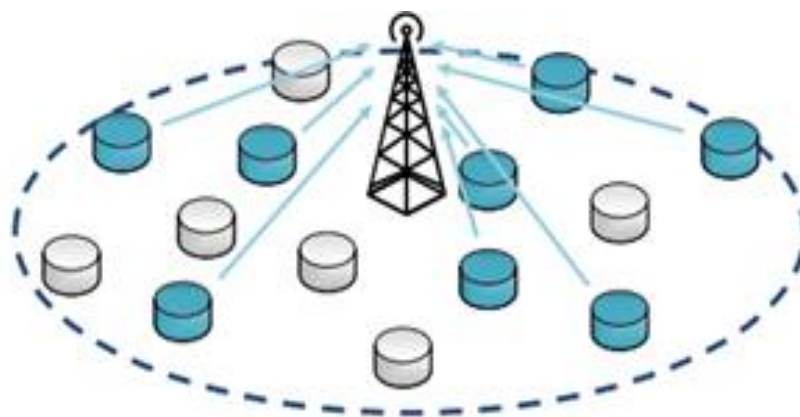


Figura 1: Red con comunicaciones M2M (Chang and Chang, 2015).

Con el objetivo de evaluar el desempeño de diferentes protocolos se consideran que los dispositivos pueden emplear tres protocolos diferentes: Aloha ranurado, *Fast Adaptive Slotted Aloha* (FASA) y *Distributed Point Coordination Function* (DPCF).

2.1 Métricas de desempeño

La razón de paquetes transmitidos por un dispositivo por unidad de tiempo (*throughput*), la tasa de paquetes que arriban correctamente a su destino (*goodput*) así como el consumo de energía, son algunos de los parámetros más empleados para caracterizar los protocolos de acceso al medio en escenarios de comunicaciones M2M (Rajandekar and Sikdar, 2015). En este trabajo son empleados estos parámetros para comparar tres protocolos MAC en este contexto.



Para el cálculo de la energía se considera que los dispositivos emplean el radio CC2420 o el CC1000. La Tabla 1 muestra los datos de consumo de potencia de cada uno de estos radios en los diferentes estados de trabajo.

Tabla 1: Potencia empleada por los radios CC2420 y CC1000 (Chipcon-products, 2006a, Chipcon-products, 2006b).

Estados	CC2420	CC1000
Inactivo	60 μ W	100 μ W
Transmitiendo	57mW	75mW
Recibiendo	63mW	36mW

El cálculo del consumo de energía se realiza empleando la expresión (1)

$$E = \sum_{\forall i} P_i t_i, \quad (1)$$

donde i describe los diferentes estados en los que se puede encontrar un dispositivo mientras que, P_i constituye la potencia consumida en cada uno de los estados y t_i el tiempo que el dispositivo permanece en cada uno de los estados.

3 Protocolos evaluados

3.1 Aloha ranurado

El protocolo Aloha ranurado (Chang and Chang, 2015) constituye una modificación del protocolo Aloha. La principal modificación radica en que el tiempo se divide en ranuras. En el inicio de cada ranura los dispositivos que posean datos por enviar los transmiten y esperan un tiempo predeterminado por la confirmación de recepción correcta. Debido a que varios nodos pueden transmitir simultáneamente los paquetes transmitidos por diferentes dispositivos pueden colisionar.

Luego de transmitir los datos si la confirmación de recepción no es recibida el dispositivo supone que ha ocurrido una colisión y espera un número aleatorio de ranuras de tiempo para reenviar los datos. La naturaleza aleatoria del tiempo de espera para retransmitir los paquetes colisionados garantiza que las transmisiones de los dispositivos no se sincronicen y en consecuencia aumenta las probabilidades de que la siguiente transmisión sea exitosa. La división del tiempo en ranuras garantiza que la utilización del canal del Aloha ranurado se duplique respecto al Aloha puro (Goldsmith, 2005).



3.2 FASA

Aloha ranurado y sus derivados representan una solución simple para distribuir el acceso aleatorio en redes inalámbricas. A continuación, se describe una de las versiones del Slotted Aloha para comunicaciones M2M, el protocolo FASA.

El FASA (Wu et al., 2013, Wu et al., 2012) considera dos posibles estados para los dispositivos: activo o inactivo. Los dispositivos se mantienen en el estado Inactivo hasta el arribo de un paquete para transmitir. A partir de este momento entran en estado activo y envían paquetes de solicitud de conexión.

De la misma forma que en el Aloha ranurado, el tiempo se divide en ranuras de duración fija. En cada ranura los dispositivos activos transmiten sus datos con determinada probabilidad. El valor de probabilidad a emplear es calculado y difundido por la BS a todos los dispositivos de la red al inicio de cada ranura.

El objetivo de la BS es maximizar el *throughput* y minimizar los retardos de acceso. Es conocido que cuando el número de dispositivos activos es $N_t \geq 1$, usando una probabilidad de transmisión $p_t = 1/N_t$ en el slot t se maximiza el rendimiento del Aloha ranurado. Ya que la BS no conoce N_t lo estima basándose en los accesos en las ranuras pasadas. El procedimiento para estimar N_t está descrito en (Wu et al., 2012).

3.3 DPCF

El protocolo DPCF, constituye una extensión de la función PCF para redes sin estructura *ad hoc*. Cuenta con un mecanismo de formación de clúster dinámico integrado con un protocolo MAC centralizado de alto rendimiento.

La idea básica del DPCF (Alonso-Zárate et al., 2012) es que el acceso al canal por parte de los dispositivos se haga utilizando el modo de acceso *Distributed Coordination Function* (DCF por sus siglas en inglés) definido en el estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas de área local. Una vez el dispositivo logra el acceso al canal, se crea un clúster temporal utilizando una estructura Maestro-Esclavo, dentro de la cual se puede ejecutar el protocolo centralizado *Point Coordination Function* (PCF por sus siglas en inglés), también definido en el estándar 802.11.

Para formar el clúster cualquier dispositivo que tenga datos que transmitir debe crear un clúster temporal (Ázquez-Gallego et al., 2013). Si un dispositivo tiene datos que transmitir y además está trabajando en modo inactivo o si existe un clúster temporal



operando fuera del rango de transmisión del dispositivo, este dispositivo DPCF no detecta ningún clúster temporal en sus alrededores.

En este contexto, el dispositivo efectúa una petición de clúster a otro dispositivo de la red. Esta petición se realiza a través de paquetes *Request To Send* (RTS). La petición se efectúa de la siguiente forma: primeramente, el dispositivo con paquetes para transmitir remite una petición de envío RTS. Una vez el dispositivo ha recibido el paquete RTS, comprueba que el emisor de la transmisión es un dispositivo DPCF. En caso afirmativo, el dispositivo envía un paquete de BEACON a toda la red para señalar el inicio del clúster. Luego el dispositivo que ha enviado el paquete de BEACON pasa a trabajar como Maestro de la red, mientras que los dispositivos que detectan el paquete de BEACON lo hacen en modo Esclavo. Si un nodo tiene datos para transmitir y detecta un clúster activo en su rango de transmisión este, puede asociarse directamente a ese clúster, sin tener que realizar ninguna petición para crear otro clúster. Esto es posible debido a que los paquetes BEACON se envían procedentes de los Master de forma periódica. Una vez creado el clúster, todos los dispositivos asociados pertenecientes a él, operan a través de la función de coordinación PCF definida en el 802.11.

El Maestro de la red emplea el mecanismo PCF para gestionar el acceso al canal. Esto se realiza a través de envíos de paquetes POLL a cada dispositivo esclavo para autorizar su acceso al canal. El primer paquete POLL tiene como destino al dispositivo que solicitó la formación del clúster.

El clúster tiene duración finita y termina con el envío de un paquete CF END. Un paquete CF END también puede ser enviado cuando ninguno de los dispositivos del clúster tiene datos por enviar. En ese caso el clúster se desintegra antes del tiempo previsto. Una explicación detallada de este mecanismo puede ser encontrada en (Alonso-Zárate et al., 2012, Ázquez-Gallego et al., 2013).

4. Resultados y discusión

Con el objetivo de obtener los parámetros necesarios para evaluar el desempeño de los protocolos Aloha ranurado, FASA y DPCF, fueron desarrollados simuladores de eventos discretos en MatLab. La Tabla 2 muestra los parámetros empleados en las simulaciones. Se realizaron 10^3 corridas independientes. Los resultados mostrados en las secciones siguientes se corresponden con la media de las corridas realizadas.



Tabla 2: Parámetros en las simulaciones

Parámetro	Valor
Cantidad de dispositivos	2-15
Área	25 m ²
Tiempo de simulación	10 seg
Tamaño de paquetes RTS, CTS y ACK	5 bytes
Tamaño paquetes de datos	20 bytes
Tasa de transmisión	1 kbps

4.1 Resultados en términos de *throughput* y *goodput*

La Figura 2 muestra los resultados alcanzados por los protocolos comparados en términos de tasa de transmisión de paquetes (*throughput*). El *throughput* de los tres protocolos decrece con el aumento de la cantidad de nodos. Los resultados muestran que el protocolo Aloha ranurado muestra la mayor razón de transmisión mientras que el DPCF obtiene los resultados más discretos. Para los tres protocolos se produce un deterioro significativo cuando el número de dispositivos es mayor que doce. Un alto valor de *throughput* no necesariamente equivale a una alta tasa de entrega exitosa de paquetes (*goodput*).

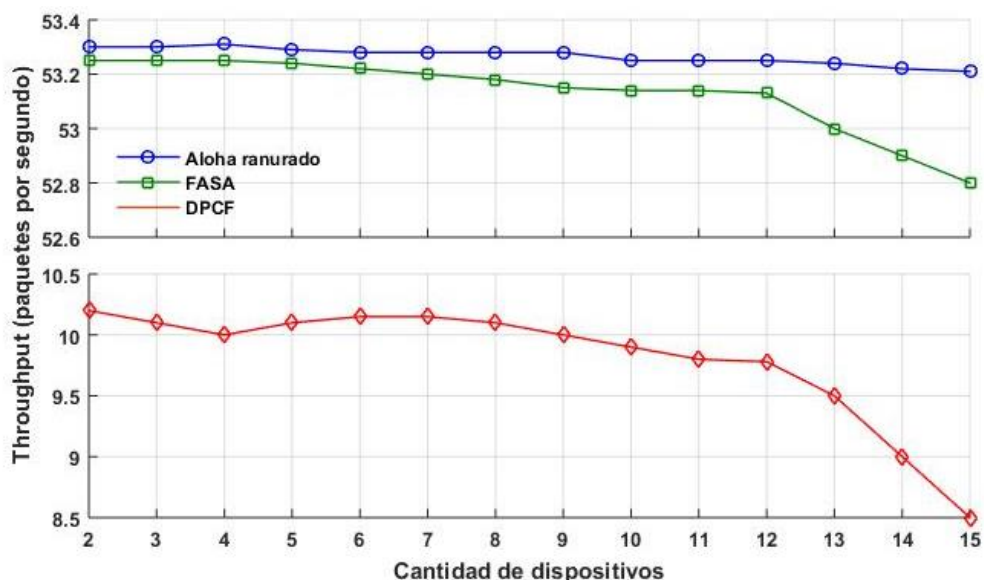


Figura 2: *Throughput* alcanzado por los protocolos Aloha ranurado, FASA y DPCF.

La Figura 3 muestra que en términos de *goodput*, el protocolo FASA obtiene mejores resultados que el Aloha ranurado. Esto se debe a que aun cuando en el Aloha ranurado cada dispositivo transmite más datos, el mecanismo de acceso al canal del FASA es más eficiente. La principal ventaja del FASA sobre el Aloha ranurado radica en la posibilidad de estimar la probabilidad de transmisión para cada dispositivo en cada ranura de tiempo.



Este procedimiento, aunque complejiza el protocolo consigue disminuir la cantidad de competidores por el canal en cada ranura y con ello aumenta la probabilidad de una transmisión exitosa.

El DPCF por su parte, consigue un *goodput* prácticamente constante con el aumento de la cantidad de dispositivos desde dos hasta doce. Cuando la red está formada por seis o más dispositivos el *goodput* del DPCF es más del doble del alcanzado por el Aloha ranurado y el FASA. Este comportamiento evidencia la efectividad del mecanismo de acceso al canal empleado por el DPCF que consigue una mayor razón de entrega exitosa con la menor cantidad de paquetes transmitidos.

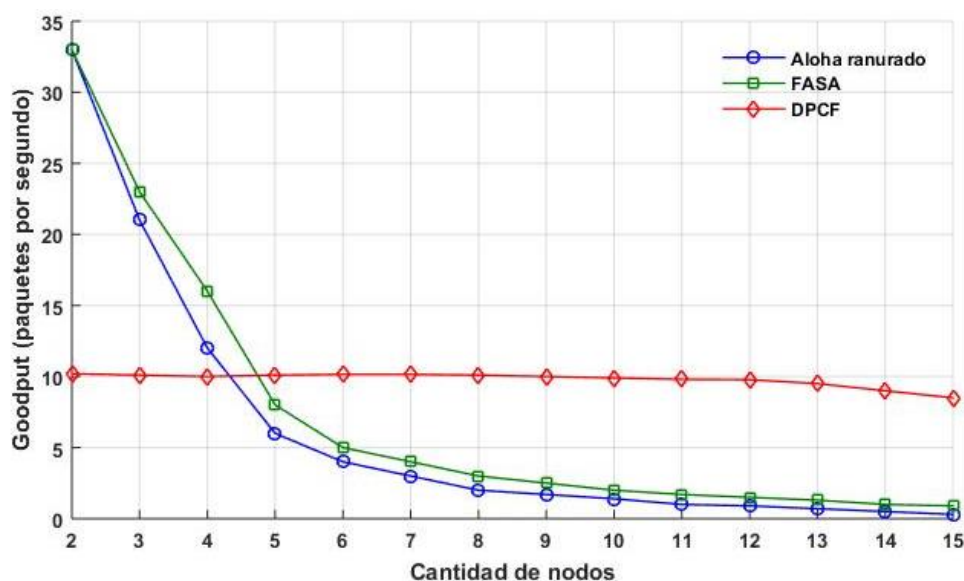


Figura 3: *Goodput* alcanzado por los protocolos Aloha ranurado, FASA y DPCF.

4.2 Resultados en términos de consumo de energía

En términos de consumo de energía la Figura 4 muestra los resultados alcanzados por los dispositivos cuando están equipados con el radio CC2420 y con el CC1000. Con independencia del radio empleado, el protocolo DPCF obtiene los menores valores de consumo de energía. Mientras que, el Aloha ranurado obtiene los peores valores. En el caso de los protocolos Aloha ranurado y FASA existe una marcada diferencia en el consumo de energía si se emplea el radio CC2420 o el CC1000. Esto se debe a que el radio CC2420 consume más energía durante la recepción que en la transmisión y para ambos protocolos (Aloha ranurado y FASA) existen gran cantidad de paquetes colisionados por lo que gran parte del tiempo los dispositivos están recibiendo paquetes colisionados. En el caso del DPCF el empleo de uno u otro radio no implica cambios



sustanciales en el consumo de energía. En este caso la efectividad del mecanismo de reserva del canal hace que la mayoría de los paquetes sean entregados correctamente.

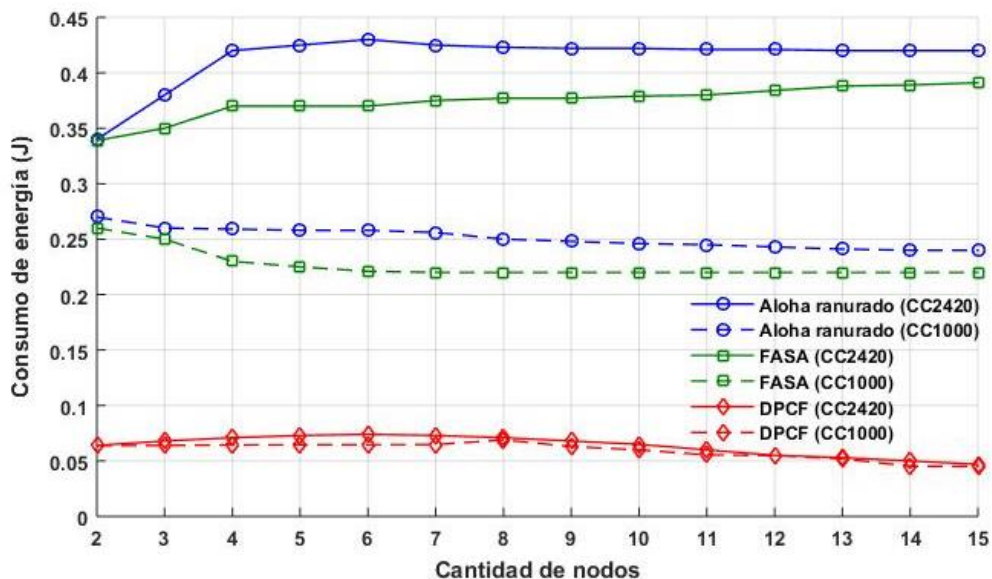


Figura 4: Consumo de energía de los protocolos Aloha ranurado, FASA y DPCF.

La Figura 5 muestra la relación entre los paquetes transmitidos exitosamente y el consumo de energía. Este parámetro ilustra la cantidad de paquetes que arriban correctamente a su destino por cada Joule de energía. Para los protocolos Aloha ranurado y FASA no existen diferencias significativas. El protocolo DPCF obtiene los más altos valores de paquetes transmitidos exitosamente por cada J de energía. Este resultado del DPCF se debe a la eficiencia con que este protocolo gestiona el acceso al espectro.

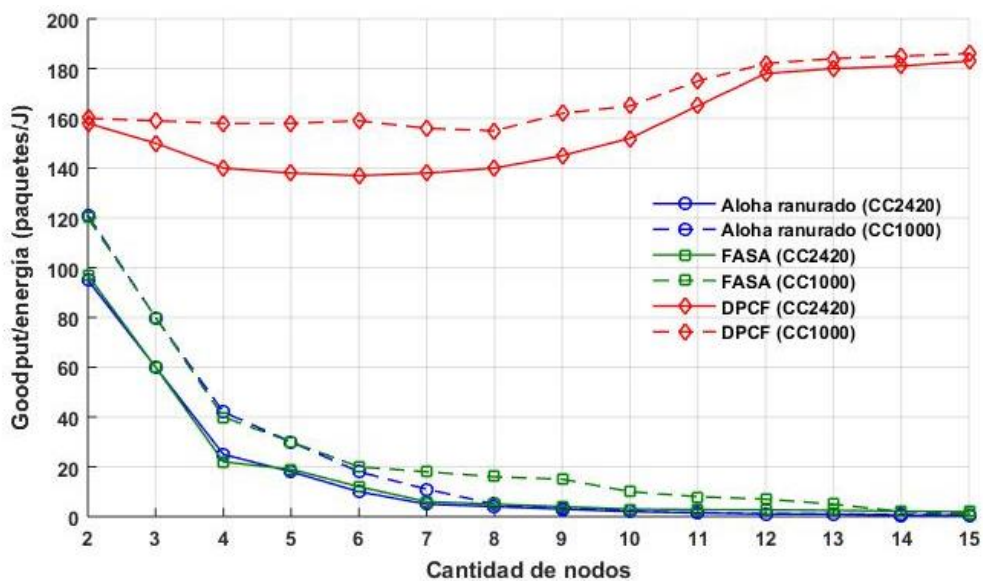


Figura 5: Relacion *goodput*-consumo de energía de los protocolos Aloha ranurado, FASA y DPCF.



5. Conclusiones

En este trabajo se realiza una comparación en cuanto a *throughput*, *goodput* y consumo de energía de los protocolos MAC Aloha ranurado, FASA y DPCF. Los resultados obtenidos muestran que el protocolo Aloha ranurado constituye un mecanismo simple de acceso al canal de comunicaciones y en consecuencia obtiene los resultados más discretos. Para este protocolo el *throughput* es el mayor de todos los comparados. Sin embargo, muy pocos de los paquetes enviados son recibidos correctamente por lo que el *goodput* es el menor.

El protocolo FASA constituye una adaptación del Aloha ranurado y su principal ventaja radica en la capacidad de estimar la cantidad de dispositivos que compiten por el acceso al canal. Empleando esta información cada dispositivo pondera sus transmisiones en función de la cantidad de competidores por el canal. Esta adaptación hace que el desempeño del FASA sea mejor que el Aloha ranurado en términos de *throughput* y *goodput*.

Por último, el protocolo DPCF obtiene los mejores resultados entre todos los protocolos comparados. Estas ventajas se deben a que implementa un mejor mecanismo para controlar el espectro lo que implica una mayor complejidad del protocolo. Esta relación costo-beneficio debe ser considerada en la elección y diseño de protocolos MAC para comunicaciones M2M. En estos escenarios la simplicidad de los dispositivos puede limitar el empleo de protocolos complejos.

6. Referencias bibliográficas

- ALONSO-ZÁRATE, J., CRESPO, C., SKIANIS, C., ALONSO, L. & VERIKOUKIS, C. 2012. Distributed point coordination function for IEEE 802.11 wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 10, 536-551.
- ÁZQUEZ-GALLEGO, F. V., ALONSO-ZARATE, J., BALBOTE, I. & ALONSO, L. DPCF-M: A Medium Access Control protocol for dense Machine-to-Machine area networks with dynamic gateways. 2013 IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 16-19 June 2013 2013. 490-494.
- CASARES-GINER, V. & MARTÍNEZ-BAUSET, J. Performance Evaluation of Framed Slotted ALOHA with Reservation Packets for M2M Networks. 2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), 21-23 Aug. 2017 2017. 18-24.
- CHANG, C. & CHANG, R. Y. Design and Analysis of Multichannel Slotted ALOHA for Machine-to-Machine Communication. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 6-10 Dec. 2015 2015. 1-6.



- CHIPCON-PRODUCTS 2006a. CC1000 Single Chip Very Low Power RF Transceiver. *In: INSTRUMENTS, T. (ed.)*.
- CHIPCON-PRODUCTS 2006b. CC2420 Datasheet, \2.4 ghz ieee 802.15. 4 zigbee-ready rf transceiver. *In: INSTRUMENTS, T. (ed.)*.
- ELKOURDI, M., MAZIN, A., BALEVI, E. & GITLIN, R. D. Enabling slotted Aloha-NOMA for massive M2M communication in IoT networks. 2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 9-10 April 2018 2018. 1-4.
- GAURAV, A. & PANDEY, A. K. A Survey: Hybrid Medium Access Control Protocol for M2M Communication. 2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 22-24 March 2018 2018. 1-6.
- GEORGE, A. & VENKATESH, T. G. 2018. Performance Analysis of M2M Data Collection Networks Using Dynamic Frame-Slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2, 493-505.
- GOLDSMITH, A. 2005. *Wireless Communications*, Cambridge University Press.
- KOMNINOS, N., PHILIPPOU, E. & PITSILLIDES, A. 2014. Survey in Smart Grid and Smart Home Security: Issues, Challenges and Countermeasures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16, 1933-1954.
- RAJANDEKAR, A. & SIKDAR, B. 2015. A Survey of MAC Layer Issues and Protocols for Machine-to-Machine Communications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2, 175-186.
- SONG, Q., LAGRANGE, X. & NUAYMI, L. An analytical model for S-ALOHA performance evaluation in M2M networks. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), 21-25 May 2017 2017. 1-7.
- SUBHANI, S., SHI, H. & COBBEN, J. F. G. A survey of technical challenges in wireless machine-to-machine communication for smart grids. 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-4 Sept. 2015 2015. 1-6.
- TAYEB, S., LATIFI, S. & KIM, Y. A survey on IoT communication and computation frameworks: An industrial perspective. 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 9-11 Jan. 2017 2017. 1-6.
- WU, H., ZHU, C., LA, R. J., LIU, X. & ZHANG, Y. Fast Adaptive S-ALOHA Scheme for Event-Driven Machine-to-Machine Communications. 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 3-6 Sept. 2012 2012. 1-5.
- WU, H., ZHU, C., LA, R. J., LIU, X. & ZHANG, Y. 2013. FASA: Accelerated S-ALOHA Using Access History for Event-Driven M2M Communications. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 21, 1904-1917.