



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Evaluación del rendimiento de protocolos Frame Slotted-ALOHA basados en técnicas de cancelación de interferencias para redes M2M.

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad en Sistemas de Telecomunicaciones

AUTOR: Ana Cristina Hernández Gómez

DIRECTOR: Francisco Vázquez Gallego y Jesús Alonso-Zárate

TUTOR: Luis Alonso Zárate

FECHA: Septiembre de 2014

Título: Evaluación del rendimiento de protocolos Frame Slotted-ALOHA basados en técnicas de cancelación de interferencias para redes M2M.

Autor: Ana Cristina Hernández Gómez

Director: Francisco Vázquez Gallego y Jesús Alonso-Zárate

Tutor: Luis Alonso Zárate

Data: Septiembre de 2014

La expansión de las tecnologías relacionadas con IoT (Internet of Things) ha ocasionado que las redes M2M estén cada vez más presentes en diversas aplicaciones y servicios. Básicamente, estas redes se caracterizan por permitir la comunicación entre dispositivos de manera remota, sin necesidad de intervención humana. Los dispositivos que conforman esta red tienen cuatro funciones básicas: recolectar, procesar, almacenar y transmitir información.

El proceso de comunicación en las redes M2M capilares es muy parecido al de las redes de área local. Los dispositivos (end-devices) que conforman la red se conectan a un dispositivo central o coordinador que funciona como gateway. El coordinador canaliza el tráfico de datos hasta llegar a un servidor M2M, donde la información puede ser almacenada y procesada, para ser utilizada en diversas aplicaciones por el usuario final. En este trabajo se considera una red M2M capilar para la recolección de datos. Este tipo de redes incluyen un conjunto de dispositivos que transmiten datos periódicamente a un coordinador bajo petición. Cuando los dispositivos transmiten los datos de forma satisfactoria, pasan a un estado de reposo (sleep) en el que el consumo de energía es menor. Las redes M2M capilares pueden incluir un número muy elevado de dispositivos conectados al gateway, por lo que la optimización en los protocolos de acceso al medio (MAC) es fundamental para minimizar el consumo energético y el retardo en la transmisión de datos. Como solución, los protocolos basados en ALOHA son muy comunes debido a su facilidad de implementación, sin embargo, su eficiencia puede verse comprometida cuando el tráfico de datos o la densidad de la red aumentan.

Se han desarrollado variantes del protocolo ALOHA para mejorar su eficiencia, tales como Slotted-ALOHA (SA) y Frame Slotted-ALOHA (FSA). Algunos autores han evaluado el uso de técnicas de cancelación de interferencias sobre FSA. En estos protocolos, los dispositivos envían copias (o réplicas) de sus paquetes de datos en diferentes slots. Cada copia incluye una referencia a la ubicación de los slots donde están transmitidas las otras copias. El proceso de cancelación de interferencias consiste en utilizar los paquetes decodificados correctamente por el coordinador, para lograr resolver las colisiones en los otros slots.

En este trabajo se evalúan y comparan dos técnicas de cancelación de

interferencias sobre FSA: Intra-frame SIC e Inter-frame SIC. En Intra-frame SIC se utiliza la información decodificada en un slot para decodificar los paquetes en los slots con colisiones dentro de la misma trama. En Inter-frame SIC, la información decodificada en una trama es utilizada para resolver las colisiones en slots de tramas anteriores.

Adicionalmente, se estudia el efecto de la diversidad en FSA, evaluando diversas técnicas de selección del número de réplicas a transmitir por cada dispositivo entre las que se encuentran: selección de un número fijo de réplicas, número aleatorio de réplicas con distribución uniforme y distribución irregular.

Se ha diseñado un simulador, basado en el software de cómputo científico MATLAB, para evaluar los protocolos en función del consumo energético y el delay. Los resultados fueron comparados con el desempeño del protocolo FSA. Se demostró que es posible reducir el delay y la energía promedio consumida por el coordinador en un 78% utilizando Intra-frame SIC-FSA y hasta un 94% con Inter-frame SIC-FSA comparado con FSA. Con respecto a la energía consumida por cada dispositivo, Intra-frame SIC-FSA permite reducir un 18% el consumo, mientras que es posible alcanzar un 22% de reducción haciendo uso de Inter-frame SIC-FSA comparado con FSA convencional.

Title: Performance Evaluation of Frame Slotted-ALOHA protocols based on interference cancellation techniques for M2M networks.

Author: Ana Cristina Hernández Gómez

Director: Francisco Vázquez Gallego y **Jesús Alonso-Zárte**

Tutor: Luis Alonso Zárte

Date: September, 2014

Since the technologies related to the Internet of Things (IoT) have spread across the world, M2M networks have become more popular. M2M networks allow devices to communicate between each other remotely and without human intervention, through wired or wireless communication channels. These devices have three basic functions: collect, store and transmit information.

M2M communications is not different from any other communication process. The devices involved in the transmission form what is called a M2M area network, which is connected to the communication network through the gateway. The gateway manages the data packets and sends the information to a final server, where it subsequently reaches the M2M applications and the end-user.

In this project we considered a M2M network used for data collection. It is composed of several devices that send their data packets to the gateway periodically and under request. Once one device has succeed it switches into a low-power mode.

Due to the fact that M2M networks include lots of devices, efficiency and protocols optimization are required in order to guarantee low energy consumption and avoiding delays in data transmission. As a first approach, protocols based in ALOHA offer low complexity and easy implementation. However, its performance decreases drastically when the data-traffic-load increases or with a large number of devices.

Lots of protocols based in ALOHA have been developed in the search for energy efficiency, such as Slotted-ALOHA (SA) or Frame Slotted-ALOHA (FSA). Previous works evaluated the performance of the Successive Interference Cancellation (SIC) techniques on FSA. In these protocols, the devices send a copy of its data packets in different time slots. Each copy includes the reference to the slots in which the remaining replicas were transmitted.

In order to decode data packets, the gateway identifies the slots free of collisions. With the decoded packets, it is able to solve the collisions in other slots where this packet has been sent. This process is known as Successive Interference Cancellation.

In this work we evaluate the performance of Intra-frame SIC and Inter-frame SIC. Intra-frame SIC uses the decoded data packets to solve collisions inside a transmission frame. On the other hand, Inter-frame SIC performs the interference cancellation outside the current frame, i.e, packets decoded in current frame are used to solve collisions from past frames, which have been previously stored by the coordinator.

In addition, we study the effect of Diversity in FSA, by evaluating some probability density functions (PDF) in the selection of the number of replicas. Therefore, the devices could select a fixed number of replicas or a random number of replicas with uniform PDF or irregular PDF.

By means of simulation codes developed in Matlab we evaluate delay and energy consumption using Intra-frame and Inter-frame SIC-FSA. The results were compared against FSA protocol. It was proved that Intra-frame SIC-FSA

can reduce average delay and the coordinator's energy consumption in 78%, while Inter-frame SIC-FSA reaches 94% of reduction in delay and energy consumed by the coordinator. In addition, the average energy consumption per device can be reduced by around 18% by using Intra-frame SIC-FSA, while Inter-frame SIC-FSA outperforms FSA protocol by decreasing the energy of the devices in 22%.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estructura del documento.....	2
CAPÍTULO 2. REDES M2M	4
2.1 Definición	4
2.2 Arquitectura de redes M2M	4
2.3 Estándares	5
2.4 Importancia de las redes M2M	6
2.5 Desafíos para la tecnología M2M.....	6
CAPÍTULO 3. MODELO DEL SISTEMA.	8
CAPÍTULO 4. PROTOCOLOS MAC BASADOS EN ALOHA PARA REDES M2M	11
4.1. ALOHA	12
4.2 SLOTTED-ALOHA (SA)	13
4.3 FRAME SLOTTED-ALOHA (FSA)	14
4.4 Diversity FSA (D-FSA)	14
4.5 Intra-frame SIC-FSA.....	15
4.6 Inter-frame SIC-FSA.....	18
CAPÍTULO 5. MODELO PARA EL CÁLCULO DE DELAY Y CONSUMO ENERGÉTICO.	22
5.1 Average delay	22
5.2 Consumo promedio de energía por el coordinador	23
5.3 Consumo promedio de energía por dispositivo.	24
CAPÍTULO 6. DESARROLLO DEL SIMULADOR	26
6.1 Intra-frame SIC-FSA	26
6.1.1 Módulo 1. Selección de Slots	28
6.1.2 Módulo 2. Detección de colisiones.....	29
6.1.3 Módulo 3. Cancelación de Interferencias y decodificación de paquetes.	30
6.2 Inter-frame SIC-FSA	31
6.2.1 Bloque 4. Introducción de elementos en memoria.....	34
6.2.2 Bloque 5. Backward SIC.	35
6.2.3 Bloque 6. Forward SIC.....	36
CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS PROTOCOLOS DESARROLLADOS.	37
7.1 Intra-frame SIC-FSA	38
7.1.1 Optimización del número de slots (m) y número máximo de réplicas a transmitir (k)38	

7.1.1.1 FDP Uniforme.....	38
7.1.1.2 FDP Irregular.....	41
7.1.2 Delay y consumo energético en redes M2M densas	45
7.2 Inter-frame SIC-FSA	49
7.2.1 Optimización del número de slots (m), máxima cantidad de réplicas a transmitir (k) y cantidad de frames almacenados en memoria (s).....	49
7.2.1.1 K constante.....	49
7.2.1.2 FDP Uniforme.....	53
7.2.1.3 FDP Irregular.....	56
7.2.2 Delay y desempeño energético en redes M2M densas.....	60
7.3 Comparación entre Intra-frame e Inter-frame SIC-FSA	63
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	68
CAPÍTULO 9. FUTUROS CAMPOS DE INVESTIGACIÓN.....	70
CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA	71

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El mundo de las tecnologías de la información y la comunicación está en constante evolución como resultado de continuos desarrollos tecnológicos. Actualmente, nos encontramos en medio de un proceso en el que las telecomunicaciones están dejando de conectar personas para pasar a conectar “cosas”.

El concepto de red M2M permite definir estas interacciones. Se trata de redes en las que dispositivos inteligentes establecen comunicaciones vía inalámbrica o cableada, sin intervención humana.

El desarrollo de las comunicaciones entre máquinas ha tenido un impacto muy importante en el mundo moderno. Desde máquinas de vending que informan a los proveedores sobre el inventario, dispositivos personales capaces de notificar a familiares o médicos acerca de los parámetros vitales de una persona, medidores inteligentes para servicios de gas, agua o electricidad, e incluso Smart Grids instaladas en casas o edificios, las redes M2M conviven ya con nosotros.

Según un nuevo informe de la GSMA (GSM Association), las conexiones globales M2M llegarán a 250 millones este año [1]. De acuerdo con la filosofía de Telefónica, una de las principales empresas de tecnología de las telecomunicaciones, “cada máquina tiene un propósito que está al servicio de las personas y el incremento en la cantidad y calidad de la comunicación entre las máquinas también tiene un propósito: mejorar ese servicio”.

En la mayoría de los casos, el propósito de las redes M2M no es otro que mejorar la calidad de procesos y servicios, todo gira en torno a eficiencia. Eficiencia (la palabra favorita en ingeniería) es justamente uno de los retos en el diseño y desarrollo de las redes M2M. Algunas de las características de estas redes (dispositivos de bajo consumo, gran cantidad de dispositivos conectados, movilidad de los dispositivos) ameritan la existencia de protocolos eficientes que garanticen un bajo consumo energético, transmisiones fiables y alarguen la vida útil de los dispositivos tanto como sea posible.

Este trabajo de investigación gira en torno a la evaluación de técnicas de cancelación de interferencias que permitan reducir el consumo energético y el delay en redes M2M que utilizan protocolos MAC basados en Frame Slotted-ALOHA. Se propone una red M2M capilar diseñada para la recolección de datos. Los dispositivos de la red (end-devices) se encuentran constantemente recogiendo información que es transmitida a un coordinador (gateway) bajo petición y de manera periódica.

Las técnicas de cancelación de interferencias se han utilizado en diversos trabajos previos de investigación para mejorar la eficiencia de protocolos MAC. En [2] se propone un proceso de Cancelación de Interferencias que mejora el desempeño de FSA en redes M2M considerando el envío de réplicas de los paquetes de datos en una misma trama de transmisión. La técnica empleada

permite cancelar interferencias en los slots de una trama a partir de los datos decodificados en dicha trama (Intra-frame SIC).

En [3] se utiliza el estándar RFID Gen2 en la identificación de tags por parte de un lector y se modifica el protocolo MAC usado en el estándar para mejorar su eficiencia. El trabajo incluye un procedimiento de cancelación de interferencias Inter-frame (ISIC) que permite eliminar las colisiones en los slots de frames pasados, utilizando la información de los tags.

En [4] se propone un nuevo protocolo de acceso, llamado Irregular Repetition Slotted-ALOHA, que aumenta el rendimiento mediante la selección del número de réplicas de manera aleatoria en cada trama mediante determinadas funciones de densidad de probabilidad (FDP).

En este trabajo se evalúa y compara el rendimiento (en términos de delay y consumo energético) de 2 variantes del protocolo FSA basados en técnicas de cancelación de interferencias: (i) Intra-frame SIC-FSA, y (ii) Inter-frame SIC-FSA. En ambos casos, se evalúan diferentes alternativas para seleccionar el número de réplicas óptimo a enviar por los dispositivos en cada trama. Se estudian las condiciones en las cuales sea posible minimizar el consumo energético y el delay en una red M2M capilar.

1.2 Objetivos

Este trabajo final de carrera se desarrolla en torno al objetivo de minimizar el delay y el consumo energético en redes M2M capilares mediante técnicas de cancelación de interferencias (Successive Interference Cancellation, SIC) en protocolos MAC basados en Frame Slotted-ALOHA (FSA). En particular, se plantean los siguientes objetivos:

1. Estudiar el estado del arte en protocolos basados en ALOHA.
2. Desarrollar técnicas de cancelación de interferencias sucesiva para protocolos MAC basados en FSA que permitan mejorar la eficiencia energética de redes M2M.
3. Formular de modelos matemáticos que permitan calcular el retardo, el consumo de energía promedio por dispositivo, y el consumo de energía promedio del coordinador.
4. Desarrollar un simulador para los protocolos propuestos utilizando MATLAB.
5. Identificar las condiciones para las cuales las técnicas propuestas mejoran el desempeño respecto a FSA.
6. Evaluar el desempeño de los protocolos desarrollados en términos de retardo y consumo de energía en redes M2M densas.

1.3 Estructura del documento

El documento está formado por 9 capítulos. El capítulo 2 introduce las redes M2M describiendo su arquitectura, alcance e importancia en la actualidad. El capítulo 3 describe las características del modelo de sistema sobre el que se realiza el estudio. En el capítulo 4 se describen los protocolos de acceso

ALOHA, slotted-ALOHA, y Frame Slotted-ALOHA, y los dos protocolos basados en técnicas de cancelación de interferencias evaluados en este trabajo. En el capítulo 5 se formulan los modelos para calcular las variables que serán evaluadas en el trabajo. Por otra parte, en el capítulo 6 se comentan las funciones y programas desarrollados para la implementación del simulador. Los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo se presentan en el capítulo 7 y 8, respectivamente. Finalmente, el capítulo 9 plantea las posibles líneas de trabajo que pueden considerarse en futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2. REDES M2M

2.1 Definición

Las redes M2M (Machine-to-Machine) pueden definirse como sistemas de comunicación automática entre dispositivos remotos. Hacen referencia a las comunicaciones entre computadores, procesadores embebidos, sensores inteligentes, actuadores o dispositivos móviles que no involucran intervención humana.

De acuerdo con el ETSI (European Telecommunications Standards Institute), una red M2M está compuesta por 4 tipos de elementos:

- Los dispositivos, o end-devices, se encargan de recolectar, transmitir y recibir información. Básicamente, están formados por un microcontrolador, un módulo de comunicación, sensores y actuadores.
- Los gateways se encargan de concentrar el tráfico entre los end-devices y la red troncal de comunicaciones (core network). Una red M2M capilar (también denominada M2M area network) está constituida por 1 gateway y varios end-devices.
- Las redes troncales (M2M core network) permiten la conexión de los end-devices y las redes M2M capilares con las plataformas de servicio encargadas de gestionar la información recibida.
- Las aplicaciones M2M son básicamente software encargado del procesamiento, análisis y reporte de datos a los usuarios finales.

2.2 Arquitectura de redes M2M

Es posible agrupar estos elementos en 3 dominios que condensan la arquitectura de las redes M2M.

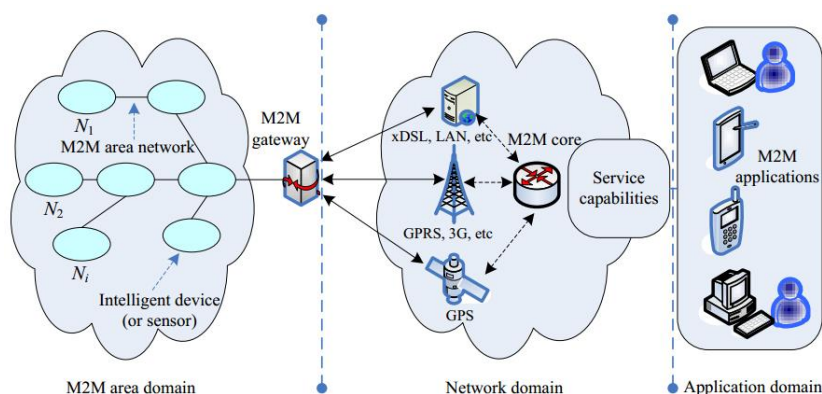


Fig. 2.1 Dominios de la arquitectura de redes M2M [5]

La Fig. 2.1 ilustra los 3 dominios de arquitectura M2M establecidos por el ETSI. En primer lugar, el dominio de área M2M, formado por la red de dispositivos M2M y el gateway. En segundo lugar, se encuentra el dominio de comunicación de red, donde se incluyen todas las redes troncales (cableadas o inalámbricas) de comunicaciones. Finalmente, el dominio de aplicaciones, encargado del procesamiento, almacenamiento, y visualización de los datos recolectados.

El dominio de área M2M está formado por una gran cantidad de dispositivos y un gateway. Los dispositivos transmiten de manera autónoma los paquetes de datos al gateway mediante una topología de red en estrella (single-hop) o multi-hop. Cuando el gateway recibe todos los paquetes de datos provenientes de los dispositivos, debe encontrar una ruta eficiente para la transmisión de la información hasta el servidor final a través de los elementos que conforman el dominio de red.

Una vez nos encontramos en el dominio de aplicación, el servidor final no sólo es el punto de integración para el resguardo de los datos provenientes del dominio de área; además sirve como proveedor de información a una gran cantidad de aplicaciones para el manejo y monitorización remota de datos [5].

2.3 Estándares

Los estándares para las comunicaciones M2M se llevan a cabo a través de diversas SDOs (Standards Development Organizations) entre las que se encuentran 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ETSI (European Telecommunication Standards Institute) y IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Recientemente, todas estas organizaciones han definido las arquitecturas de red y funciones necesarias para soportar las características de las comunicaciones M2M en sus estándares. Como resultado de este trabajo, se encuentran algunos estándares que son utilizados en alguna área en específico. Con respecto a las redes M2M capilares, la organización IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) define algunos estándares que son comúnmente usados:

IEEE 802.15.3a Ultra-Wide Band (UWB). Es utilizado en dos tipos de aplicaciones: el primer grupo contiene aplicaciones que requieren altas tasas de transmisión (típicamente por encima de 1Mbps), como transmisiones de imagen o video. El segundo grupo de aplicaciones (con tasas de transmisión por debajo de 1 Mbps) está constituido por sensores de las redes HAN (Home Area Network). Los inconvenientes del uso de UWB están relacionados con el consumo energético.

IEEE 802.11 WiFi. Es muy adecuado para aplicaciones con tasas de transmisión elevadas, en áreas amplias. Es el protocolo más aceptado para comunicaciones inalámbricas, sin embargo, las desventajas de este protocolo están relacionadas con un alto requerimiento energético.

IEEE 802.15.1 Bluetooth. Se ha vuelto muy popular en aplicaciones de voz, datos y audio, para conexiones inalámbricas de corto alcance. Es adecuado para aplicaciones de consumo energético reducido y tasas de transmisión

bajas. Sin embargo, no ofrece soporte para redes con un número elevado de dispositivos comunicándose simultáneamente.

IEEE 802.15.4 Zigbee. Fue desarrollado particularmente para dispositivos inalámbricos, para asegurar bajo consumo energético y buscando alargar la vida útil de los dispositivos. En general, Zigbee se presenta como mejor candidato ante las tecnologías UWB, WiFi o Bluetooth.

2.4 Importancia de las redes M2M

Más que un producto, las redes M2M son parte de una solución tecnológica; en muchos casos, los usuarios finales no son conscientes de las interacciones entre los dispositivos y equipos de comunicaciones que utilizan. Por esta razón, la importancia de las comunicaciones M2M está basada en ser el medio para un fin, y no el fin en sí mismo.

La consultora Machina Research define las interacciones en redes M2M como “conexiones a dispositivos sensores, actuadores y de monitorización, junto con los equipos que permiten la asociación (entre estos dispositivos)”. Sin embargo, según Keith Dyer, editor de la revista Mobile Europe, “el término M2M es una manera conveniente de las industrias de telecomunicaciones para pensar en una oportunidad asociada a proveer conectividad entre equipos, para fomentar diversas aplicaciones en una gran variedad de industrias” [6].

Las aplicaciones de las redes M2M abarcan áreas como seguridad (vigilancia, alarma, tracking), transporte (seguimiento de flotas, seguridad vial), salud (e-health), manufactura (automatización y monitorización de procesos en cadenas productivas), almacenamiento de mercancía (monitorización en la distribución, máquinas de vending), y servicios, entre muchas otras.

Cada una de estas aplicaciones hace uso de la conectividad en las redes M2M de forma diferente para cumplir diversos propósitos. Para comprender la importancia de estas redes es fundamental conocer cuáles son los sectores que pueden darle uso a la conectividad M2M, para qué aplicación, y qué beneficios puede ofrecer en cada instancia específica. De forma genérica, algunos beneficios de las redes M2M son:

- Reducción en los costes de procesos específicos.
- Permitir operaciones más eficientes.
- Mejoras en la calidad de productos y servicios.
- Facilitar acciones preventivas.

2.5 Desafíos para la tecnología M2M

Algunos retos tecnológicos relacionados con las redes M2M que son de interés especial para los investigadores y desarrolladores son:

- Seguridad. Garantizar seguridad y privacidad en el proceso de transmisión de datos es vital para asegurar la calidad del servicio, especialmente en algunas áreas de aplicación.

- Procesamiento de datos. Grandes cantidades de información son recolectadas por los sensores. Consecuentemente, existe la necesidad de operar de manera inteligente con esta información, con el fin de concluir y decidir las acciones que el sistema ejecuta.
- Diseño del gateway. El gateway juega un papel fundamental en la interconexión de dispositivos y sensores dentro de la red. Debe ser capaz de proveer servicios a todos los dispositivos de la red, así como garantizar la máxima compatibilidad.
- Consumo energético. Para obtener el máximo grado de autonomía en las redes M2M, es fundamental prolongar la vida útil de los dispositivos y garantizar un uso eficiente de las fuentes de energía que alimentan los dispositivos de la red. Consecuentemente, el ahorro energético es uno de los principales retos en las comunicaciones M2M.
- Delay. Algunas aplicaciones M2M, por ejemplo las relacionadas con el área de la salud (seguimiento de signos vitales) y la seguridad (sistemas de alarma y tracking), requieren tiempos de conexión y comunicación mínimos.

En este trabajo se pretende reducir el delay y el consumo energético asociado a los procesos de comunicación en redes M2M capilares. La capa MAC establece las reglas de acceso al medio de comunicación, y las técnicas para resolver conflictos durante la transmisión de datos. El objetivo fundamental de este trabajo consiste en el diseño y evaluación de protocolos de MAC eficientes para reducir delay y consumo energético en redes M2M.

CAPÍTULO 3. MODELO DEL SISTEMA.

En este trabajo se ha considerado una red M2M con topología de estrella compuesta por n dispositivos (denominados también end-devices) que transmiten paquetes de datos a un dispositivo coordinador que realiza las funciones de gateway. La Fig. 3.1 ilustra la topología de red.

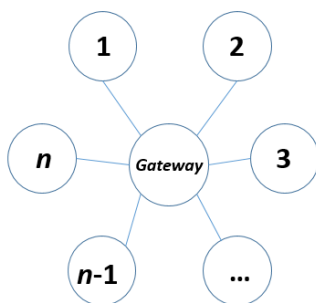


Fig. 3.1 Topología de estrella considerada en nuestro sistema

Cada dispositivo envía paquetes de datos periódicamente dentro de un espacio de tiempo llamado Data Collection Round (DCR). Como se muestra en la figura 3.2, un DCR se inicia con una instrucción del coordinador, a través de un paquete de petición de datos o Request for Data Packet (RFD, por sus siglas en inglés).

Se asume que para el momento en que el Coordinador envía la petición de inicio de la transmisión (RFD) todos los dispositivos se encuentran activos a la espera de las instrucciones del coordinador. De igual forma, se asume que para el momento en que el coordinador envía el paquete de petición de datos (RFD) cada uno de los dispositivos tiene exactamente un paquete de datos para transmitir.

Una vez que todos los dispositivos decodifican la petición de inicio de transmisión, se sincronizan siguiendo un mismo patrón temporal, iniciándose así el proceso de transmisión de datos. Cada dispositivo envía su paquete de datos al coordinador según las reglas del protocolo de control de acceso al medio adoptado. Los protocolos de acceso considerados se detallan en el capítulo 4.

El paquete RFD es seguido por una secuencia de tramas o frames de transmisión, donde cada frame se divide en m ranuras o slots temporales. El tiempo necesario para el envío de un paquete de datos se corresponde con la duración de 1 slot; en este sentido, cada dispositivo elige uno (o más, dependiendo del protocolo de acceso) de estos slots para transmitir su paquete de datos en una trama.

Con respecto a las características del canal de transmisión, se asumirá que se está trabajando sobre un canal que no introduce errores de transmisión, y que no se considera el efecto captura (en la práctica, ningún paquete enviado en un slot donde se presente una colisión puede ser decodificado).

Finalizado el frame de transmisión, el Coordinador se encarga de enviar un paquete informativo de realimentación o Feedback Packet (FBP) para informar a cada uno de los dispositivos acerca de los paquetes decodificados tras el frame de transmisión anterior.

Si aún existen dispositivos cuyos paquetes no han sido decodificados correctamente, el proceso se lleva a cabo nuevamente, dejando un tiempo de guarda entre el FBP y el inicio del nuevo frame de transmisión, conocido como Inter-frame Space (IFS). La función del IFS es garantizar que el tiempo empleado por cada dispositivos para cambiar su estado de activo a inactivo (o viceversa), así como el tiempo de propagación de los mensajes no interrumpan con el inicio del nuevo frame, considerando que es necesaria la sincronización perfecta.

El DCR finaliza una vez que el paquete de cada uno de los dispositivos ha sido decodificado correctamente por el coordinador.

A lo largo del DCR, tanto el coordinador como los dispositivos pueden encontrarse en 5 posibles estados:

1. Transmitiendo un paquete de datos.
2. Recibiendo un paquete de datos.
3. Idle listening.
4. Standby.
5. Inactivo (sleeping).

Con el fin de identificar los fallos de decodificación producto de las colisiones en el proceso de transmisión, se definen tres estados posibles en los que puede encontrarse un slot:

1. Vacío, cuando ningún dispositivo ha seleccionado este slot para enviar su paquete de datos.
2. Exitoso, cuando únicamente un dispositivo ha seleccionado este slot para transmitir en el presente frame.
3. Colisión, cuando más de un dispositivo ha elegido este slot para transmitir su paquete de datos durante el frame en curso, ocasionando que ningún paquete de datos pueda ser decodificado, debido a la colisión.

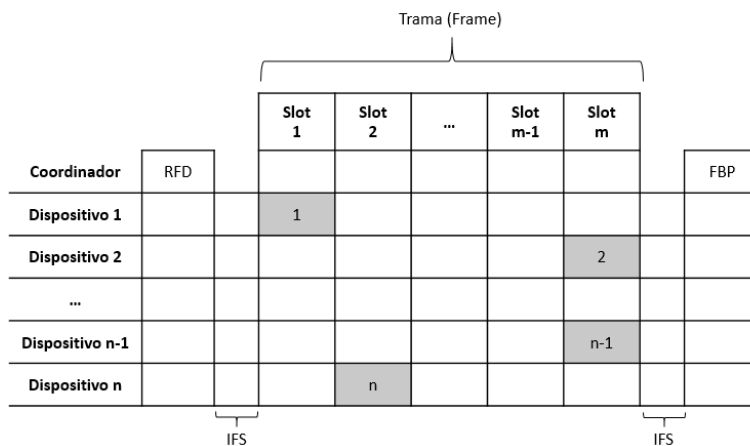


Fig. 3.2 Ejemplo de la primera trama de un DCR

En el ejemplo de la Fig. 3.2 se muestra el primer frame de transmisión de un DCR. Los slots 1, 2 son exitosos, mientras que el slot $m-1$ está vacío y en el slot m hay colisión de los paquetes de los dispositivos 2 y $n-1$.

CAPÍTULO 4. PROTOCOLOS MAC BASADOS EN ALOHA PARA REDES M2M

Las primeras redes de computadoras fueron diseñadas sobre el hardware disponible en el momento, sin considerar la evolución, interconexión o la compatibilidad con otros equipos. Con la evolución de la tecnología, los programas de comunicación tenían que ser frecuentemente modificados para garantizar el funcionamiento en el nuevo hardware. La primera solución fue la creación de arquitecturas de red que permitían independizar el software del hardware utilizado. La primera arquitectura de red llamada SNA (Systems Network Architecture) fue presentada por IBM; consistía en un modelo de 7 capas, donde cada una de ellas ofrecía servicios a la siguiente, garantizando una estructura modular bien definida.

Hasta el año 1977, la hegemonía de IBM en el ámbito tecnológico ocasionó que todo fabricante importante desarrollara protocolos de compatibilidad sobre la arquitectura de red de IBM para sus productos. Hasta los años 80 la situación se mantuvo de esta forma, hasta que la ISO (International Organization for Standardization) define la arquitectura de redes OSI (Open System Interconnection) para promover la creación de estándares que permitieran definir protocolos independientes con respecto a los fabricantes.

Actualmente, OSI sirve como modelo de referencia para la especificación de redes. La arquitectura está basada en 7 capas:

- Aplicación (Application layer).
- Presentación (Presentation layer).
- Sesión (Session layer).
- Transporte (Transport layer).
- Red (Network layer).
- Enlace de datos (Data link layer).
- Física (Physical layer).

La capa de enlace de datos se encarga de proveer un servicio de comunicación fiable a partir de los servicios que recibe de la capa física. En este sentido, su función es básicamente la detección (y corrección) de errores en la transmisión. Cuando se trata de redes broadcast, existe una complejidad añadida. Debido a que el canal de comunicaciones se comparte entre varios usuarios, se precisan mecanismos que permitan a cada uno de ellos transmitir la información al equipo de destino. En este sentido, la capa de enlace de datos es más compleja que en las redes "punto a punto", por lo que el modelo OSI la divide en dos subcapas: la capa superior se conoce como LLC (Logical Link Control) y se encarga de las funciones de la capa de enlace que son comunes en todo tipo de redes. La capa inferior se denomina subcapa MAC (Media Access Control), y se ocupa de controlar las funciones de acceso al medio de comunicación.

El hecho de compartir el canal generará conflictos o pérdida de información. Los protocolos de la subcapa MAC son los encargados de definir los mecanismos adecuados para resolver los conflictos y permitir que los equipos

tengan la posibilidad de enviar la información que no ha podido ser transmitida correctamente.

La clasificación de los protocolos MAC se realiza en torno a muchos criterios. Cuando las técnicas de control de acceso implican la división del canal se consideran: multiplexación por división de tiempo o de frecuencia. Por otra parte, cuando el control del medio se gestiona de manera dinámica se tienen técnicas de control centralizado, o de control distribuido [7].

Entre los métodos de gestión dinámicos se encuentran métodos de contienda o aleatorios, de reserva, mixtos, y de selección. Los métodos de control de contienda (o aleatorios) se clasifican según la información que cada estación obtiene del canal (con o sin escucha). Los métodos sin escucha nos llevan directamente al protocolo ALOHA.

4.1. ALOHA

El protocolo ALOHA fue desarrollado en la Universidad de Hawaii en el año 1970. Fue la respuesta ante la necesidad de gestionar el acceso a una red de radiofrecuencia que permitía la comunicación entre varias islas.

En ALOHA, cada nodo tiene acceso al canal siempre que tenga datos para transmitir. Las estaciones transmiten sin considerar si el canal está siendo utilizado por otro usuario o no. Debido a que existe la probabilidad de colisión, el emisor espera un mensaje de confirmación por parte de la estación receptora. En el caso de no recibir confirmación, el emisor espera un tiempo aleatorio para volver a transmitir la información [8].

Cuando el tráfico en una red ALOHA crece, el número de colisiones aumenta de manera no lineal y el rendimiento decae rápidamente. La Fig. 4.1 muestra el funcionamiento del protocolo ALOHA. Debido a la falta de sincronización, basta que un bit de dos tramas se solapen para generar una colisión, ocasionando que ninguno de los dos mensajes pueda ser decodificado.

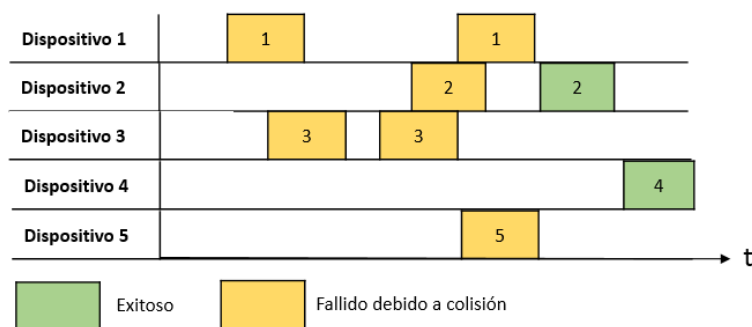


Fig. 4.1 Protocolo ALOHA

“La eficiencia de un sistema ALOHA se puede estimar fácilmente si se supone que los emisores transmiten las tramas de acuerdo con una distribución de

Poisson. En ese caso se puede demostrar (...) que el rendimiento máximo de un ALOHA puro es del 18,4 %, y que esta eficiencia se consigue con una utilización del canal del 50%. Es decir que un canal de 10 Mb/s funcionando con ALOHA daría su máxima eficiencia cuando las estaciones estuvieran enviando un tráfico de 5 Mb/s, del cual se transmitirían correctamente 1.84 Mb/s y los restantes 3,16 Mb/s se perderían por colisiones; si el nivel de utilización pasa del 50% el caudal útil transmitido disminuye” [9].

4.2 SLOTTED-ALOHA (SA)

En 1972 se propone una mejora al protocolo ALOHA que conduciría a duplicar su rendimiento. En Slotted-ALOHA, el tiempo se divide en intervalos de duración constante, llamados slots. Cada slot tiene el tamaño necesario para alojar un paquete de datos.

En Slotted-ALOHA, cada nodo debe esperar al inicio de un slot para transmitir su paquete de datos. Sincronizando el proceso de transmisión es posible reducir la probabilidad de colisión, reduciendo su efecto a un intervalo específico. Se eliminan las colisiones en cadena, ya que las interferencias ahora ocurrirán de manera total y no parcialmente. La Fig. 4.2 muestra el funcionamiento del protocolo Slotted-ALOHA.

	Slot 1	Slot 2	Slot 3	Slot 4	Slot 5	Slot 6	Slot 7
Dispositivo 1	1	1					
Dispositivo 2		2					
Dispositivo 3			3			3	
Dispositivo 4				4	4		
Dispositivo 5		5					

Exitoso
 Fallido debido a colisión

Fig 4.2 Protocolo Slotted-ALOHA

“Para un ALOHA ranurado, también con una distribución de Poisson, Abramson dedujo que la eficiencia máxima es el doble, es decir 36,8 % y se consigue con una utilización del 100%. Así por ejemplo en un canal de 10 Mb/s con ALOHA ranurado el máximo caudal útil que podría obtenerse es de 3,68 Mb/s y para ello sería preciso inyectar en la red 10 Mb/s de tráfico” [9].

4.3 FRAME SLOTTED-ALOHA (FSA)

Frame Slotted-ALOHA es muy similar a SA. Consiste en una serie de marcos de tiempo llamados tramas (o frames, en inglés), divididos en m slots de tamaño fijo. En cada trama, los dispositivos eligen un slot para transmitir su paquete de datos. Los dispositivos que no han tenido éxito debido a colisiones, seleccionan nuevamente un slot en la próxima trama de transmisión, hasta que logran enviar su paquete correctamente.

La Fig. 4.3 muestra el funcionamiento del protocolo Frame Slotted-ALOHA para 7 dispositivos.

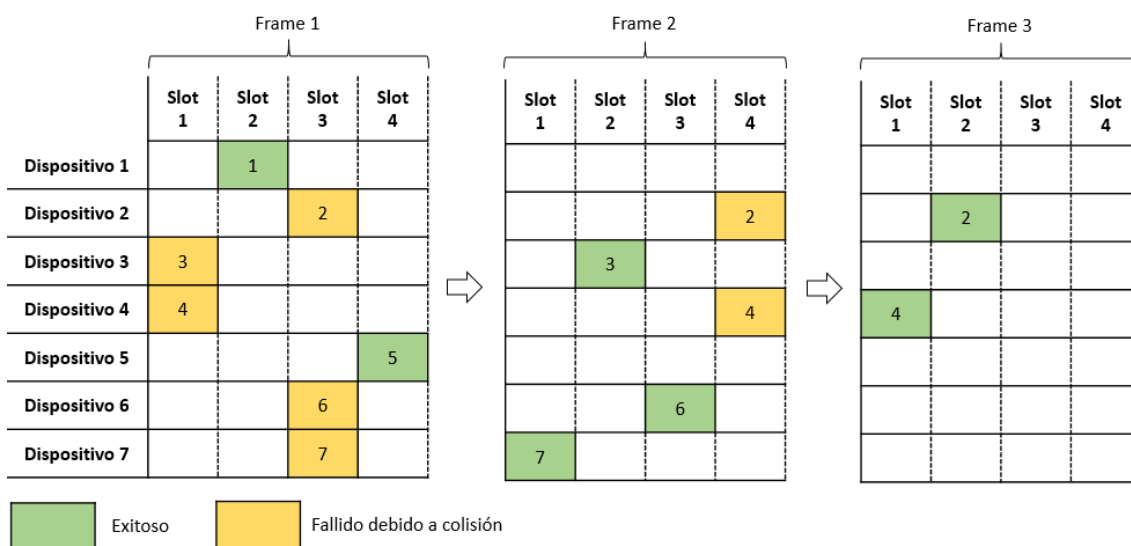


Fig. 4.3 Protocolo Frame Slotted-ALOHA

En el frame número 1, únicamente transmiten de manera exitosa los dispositivos 1 y 5 (sus paquetes no están involucrados en slots con colisiones). Los dispositivos restantes transmiten nuevamente en el frame 2. En este frame, los dispositivos 2 y 4 envían sus paquetes en el mismo slot causando una colisión, mientras que los dispositivos 3, 6 y 7 transmiten exitosamente. Finalmente, un nuevo frame se abre para los dispositivos 2 y 4, quienes culminan su transmisión en el frame 3.

4.4 Diversity FSA (D-FSA)

D-FSA es un protocolo que incorpora a FSA la posibilidad de que cada dispositivo envíe más de una vez su paquete de datos en un frame de transmisión.

Al igual que en FSA, D-FSA mantiene la estructura temporal de slots agrupados en frames de transmisión. Adicionalmente, se le permite a cada uno de los dispositivos que participan en la transmisión enviar copias de sus paquetes de datos en cada frame.

Cada una de las copias del paquete de datos será llamada réplica, todas las réplicas contienen exactamente la misma información. Para representar la cantidad réplicas que se envían en un frame, se usará la letra k_i .

La Fig 4.4 ilustra el funcionamiento de D-FSA en una red de $n=5$ dispositivos, $m=6$ y $k_i=2$ réplicas transmitidas para todo dispositivo i . En el frame 1, los dispositivos 1, 3 y 4 transmiten correctamente sus paquetes de datos. Las réplicas de los dispositivos 2 y 5 colisionan, por lo que sus paquetes no pueden ser decodificados en este frame.

En el frame 2, los dispositivos que no han sido exitosos, transmiten nuevamente. No existen colisiones, el coordinador es capaz de decodificar los paquetes de datos, y el DCR finaliza.

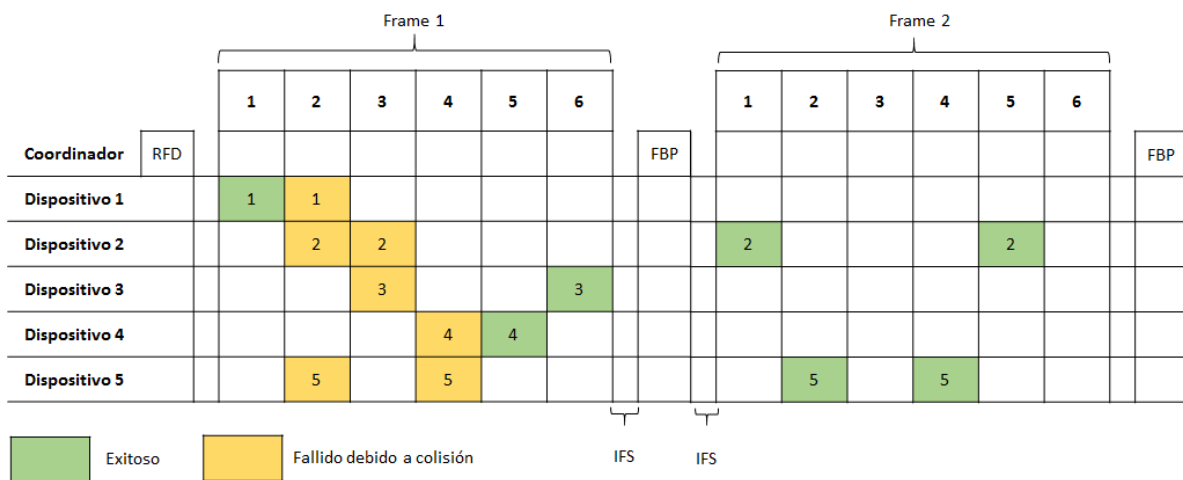


Fig. 4.4 Protocolo D-FSA

4.5 Intra-frame SIC-FSA

El protocolo Intra-frame SIC-FSA (al que también llamaremos SIC-FSA) está basado en Frame Slotted-ALOHA. Para este protocolo, se asume que cada dispositivo envía k_i veces su paquete de datos en un mismo frame de transmisión, considerando que k_i es un número entero que puede tomar valores en el intervalo $[1, k]$, donde k es el máximo número de réplicas que un dispositivo puede transmitir.

El protocolo Intra-frame SIC-FSA ejecuta un proceso de cancelación sucesiva de interferencias (Successive Interference Cancellation, SIC) que se basa en la idea de que es posible solucionar las colisiones haciendo uso de la información que ha sido decodificada satisfactoriamente en el frame actual.

Cuando el coordinador decodifica correctamente la información proveniente de un dispositivo en un slot, es capaz de identificar dónde han sido transmitidas las otras réplicas enviadas por el dispositivo exitoso. Si alguna de las otras réplicas está involucrada en una o más colisiones, el coordinador puede sustraer la información decodificada a la señal recibida en los slots donde

existe la colisión. De esta forma, se elimina la interferencia producida por el paquete de datos, y en algunos casos es posible decodificar la información del otro paquete involucrado en la colisión.

Para realizar este proceso, el coordinador debe tener conocimiento de los slots donde cada dispositivo transmitirá su información, esto se logra incorporando en la cabecera de cada paquete de datos un apuntador a la posición de cada una de las réplicas que envía el cada dispositivo.

Este proceso se repite hasta que el coordinador es incapaz de decodificar algún otro paquete de datos. En este momento, los dispositivos que han transmitido exitosamente pasan a un modo "sleep", hasta el inicio de un nuevo DRC. Los dispositivos que han colisionado y no han podido transmitir el paquete de datos compiten en el siguiente frame de transmisión.

Estudios anteriores han considerado que el número de réplicas k_i que transmiten los dispositivos es un parámetro común entre todos los dispositivos y constante entre frames de transmisión, es decir, todos los dispositivos transmiten un número de réplicas fijo en cada uno de los frames en los que participan. En este trabajo se presenta un nuevo caso de estudio, en el que cada dispositivo elige el número de réplicas que va a transmitir en cada frame, de acuerdo con una función de densidad de probabilidad definida.

Para ilustrar el funcionamiento de ambas versiones del protocolo durante un DCR, las Fig. 4.5 y 4.6 muestran un ejemplo de Intra-frame SIC-FSA con k_i fijo, y k_i variable, respectivamente.

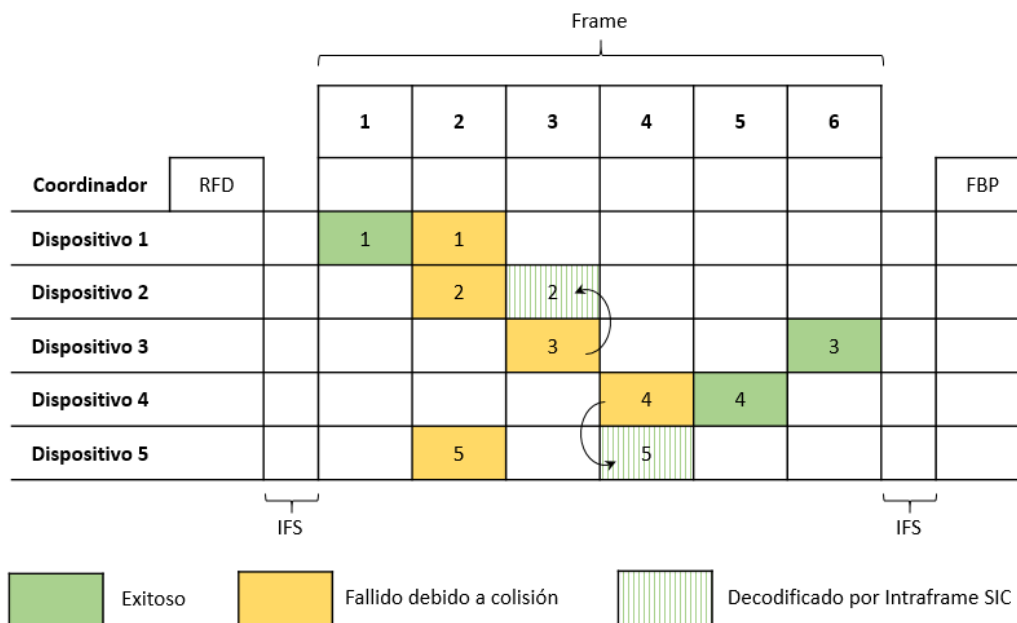


Fig. 4.5 Protocolo Intra-frame SIC-FSA (k_i fijo)

La Fig. 4.5 ilustra un ejemplo de un DCR utilizando Intra-frame SIC-FSA, con $n=5$ dispositivos, $m=6$ slots y un número de réplicas fijo $k_i=2$ para todo dispositivo i . En la primera iteración del proceso de cancelación de

interferencias, el coordinador decodifica una réplica transmitida por el dispositivo 1 en el slot 1 (paquete 1), una réplica del dispositivo 4 en el slot 5 (paquete 4) y una réplica proveniente del dispositivo 3 en el slot 5 (paquete 3). Hasta este momento, los dispositivos 1, 3 y 4 han sido exitosos en su transmisión.

En la segunda iteración, el paquete 3 se sustrae a la señal recibida en el slot 3, y de esta forma, una de las réplicas transmitidas por el dispositivo 2 es decodificada (paquete 2), luego, el paquete 4 se resta a la señal obtenida en el slot 4, con lo que el coordinador es capaz de decodificar la réplica enviada por el dispositivo 5 en este slot (paquete 5). Para el final de la segunda iteración los dispositivos 2 y 5 son exitosos en su transmisión.

Debido a que todos los dispositivos han logrado transmitir sus paquetes con éxito, el coordinador transmite su paquete de feedback (FBP) luego del tiempo de guarda IFS. Con esto, finaliza el round de transmisión.

Gracias al proceso de cancelación de interferencias es posible decodificar los 5 dispositivos en un único frame y finalizar el DCR. Sin embargo, de no haber aplicado este procedimiento, únicamente podría haberse decodificado 3 dispositivos, y el DCR se extendería un frame más, como mínimo.

En algunos casos, no todas las colisiones pueden resolverse y el proceso no finaliza en un frame; cuando esto ocurre, el coordinador transmite el FBP y se abre un nuevo frame de transmisión en el que participan únicamente los dispositivos que no han tenido éxito en el anterior.

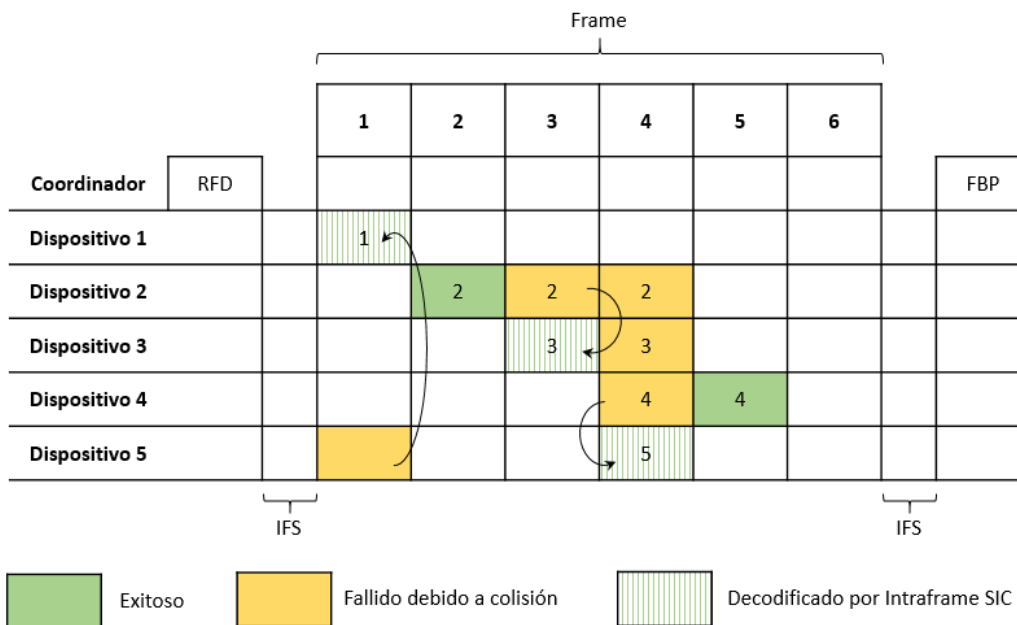


Fig. 4.6 Protocolo Intra-frame SIC-FSA (k_i variable)

La Fig. 4.6 muestra un ejemplo de DCR donde es aplicado Intra-frame SIC-FSA. En este caso se tienen $n=5$ dispositivos, $m=6$ slots y $k=3$ réplicas. Nótese que en este ejemplo k_i no es un valor fijo: el dispositivo 1 elige transmitir una

única réplica, el dispositivo 2 selecciona 3 réplicas y los dispositivos 3, 4 y 5 deciden enviar 2 réplicas de sus paquetes de datos.

El criterio de selección de k_i será propuesto y evaluado en las siguientes secciones, y no es necesario para comprender el funcionamiento del protocolo. En la primera iteración del proceso SIC, se decodifica una de las réplicas del dispositivo 2 en el slot 2 (el paquete 2), así como la réplica del dispositivo 4 que se transmitió en el slot 5 (el paquete 4). Por el momento, los dispositivos con éxito son 2 y 4.

En la segunda iteración del proceso, el paquete 2 se sustrae a la señal recibida en el slot 3 y se consigue decodificar la información del dispositivo 3 en el slot 3 (paquete 3). En esta misma iteración, los paquetes 2, 3 y 4 se restan a la señal obtenida en el slot 4, con lo que ahora es posible obtener la réplica del dispositivo 5 en el slot 4 (paquete 5). Mediante esta segunda iteración resultan exitosos los dispositivos 3 y 5.

Finalmente, en la tercera iteración del procedimiento de cancelación sucesiva de interferencias (SIC) el paquete 5 se resta a la señal obtenida en el slot 1, y se decodifica el paquete enviado por el dispositivo 1 en el slot 1 (paquete 1). Ahora que ha tenido éxito el último dispositivo pendiente, el coordinador anuncia el fin del DCR a través de un feedback packet.

Nuevamente, las ventajas de la cancelación de interferencias son evidentes. De no aplicar este proceso, las colisiones evitarían la decodificación de los paquetes 1, 3 y 5, por lo que el round de transmisión se extendería al menos un frame más.

4.6 Inter-frame SIC-FSA

El protocolo Inter-frame SIC-FSA (también ISIC-FSA) está basado en Frame Slotted-ALOHA. Cada dispositivo envía k_i veces su paquete de datos en un mismo frame de transmisión, donde k_i toma valores enteros dentro del intervalo $[1, k]$. Se define k como el máximo número de réplicas que un dispositivo puede transmitir en una trama.

El procedimiento SIC se ejecuta en dos etapas: la primera se realiza dentro de la trama de transmisión, de la misma manera que en Intra-frame SIC-FSA. La segunda etapa consiste en un proceso de resolución de colisiones entre tramas anteriores que fueron almacenadas por el coordinador.

Inter-frame SIC-FSA almacena la información de las colisiones no resueltas en tramas previas, y utiliza los paquetes decodificados en el frame actual para resolver los conflictos que no han podido solucionarse aplicando el procedimiento de cancelación de interferencias.

Cuando se inicia un DCR, los dispositivos realizan la selección de slots para transmitir sus k_i réplicas. Al igual que en Intra-frame SIC-FSA, se definen los tres estados en los que puede encontrarse un slot: vacío, exitoso o fallido.

Cuando el coordinador logra decodificar un paquete correctamente, es capaz de identificar dónde han sido enviadas las otras réplicas del dispositivo exitoso. Realizando la sustracción de estos paquetes en los slots correspondientes en

el frame actual, es posible resolver las colisiones y decodificar nuevos paquetes.

Hasta ahora, la primera etapa de cancelación de interferencias en Inter-frame SIC-FSA es idéntica al protocolo Intra-frame SIC-FSA descrito en la sección anterior. La segunda etapa se ejecuta sustrayendo los paquetes decodificados en el frame actual a las colisiones causadas en los frames previos.

Cuando finaliza el frame $j-1$ y existen colisiones que no han sido resueltas, se inicia un nuevo frame j donde participan los dispositivos que no han tenido éxito previamente. Finalizado el frame j , el coordinador toma los paquetes decodificados en j y los resta a las señales en los slots fallidos (con colisiones no resueltas) del frame $j-1$. Una vez que se substraen las señales, el coordinador puede ser capaz de decodificar paquetes en el frame $j-1$ que no pudo resolver en el frame actual j .

Para realizar esta segunda etapa de SIC, el coordinador debe conocer la información de los slots que han sido seleccionados por los dispositivos en los frames anteriores, así como las señales obtenidas en los slots con colisiones no resueltas. Por esta razón, en Inter-frame SIC-FSA cada paquete de datos contiene una referencia a los slots donde fueron transmitidas las réplicas restantes tanto en el frame actual como en el anterior. Luego, las señales obtenidas en los slots con colisiones son almacenadas en memoria al finalizar cada frame de transmisión.

El proceso de cancelación de interferencias entre frames se realiza un mínimo de veces igual a la cantidad de frames almacenados en memoria. El proceso se realiza en dos direcciones: se resuelven colisiones en $j-1$ utilizando los paquetes decodificados en j , y si aún existen dispositivos que no han logrado transmitir con éxito, se utilizan los paquetes decodificados en $j-1$ para resolver colisiones en j . De manera general, el proceso de cancelación de interferencias entre frames se ilustra en la Fig. 4.7.

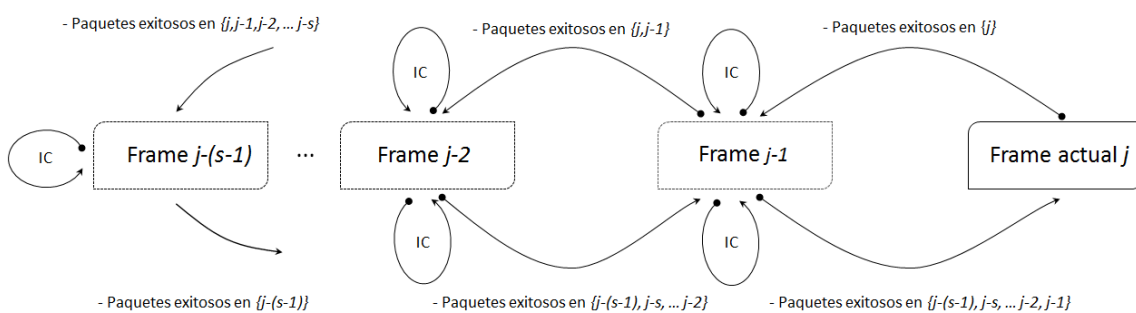


Fig. 4.7 Procedimiento Inter-frame SIC

La cantidad de frames involucrados en el proceso IC, se denomina s . El parámetro s hace referencia a la cantidad de elementos almacenados en memoria más el frame en curso.

La Fig. 4.8 ilustra un DCR en el que se utiliza Inter-frame SIC-FSA. En este ejemplo, se tiene $n=6$ dispositivos, $m=6$ slots y un número fijo de réplicas $k=2$.

El proceso de cancelación de interferencias se realiza entre el frame actual y el frame anterior almacenado en memoria ($s=2$).

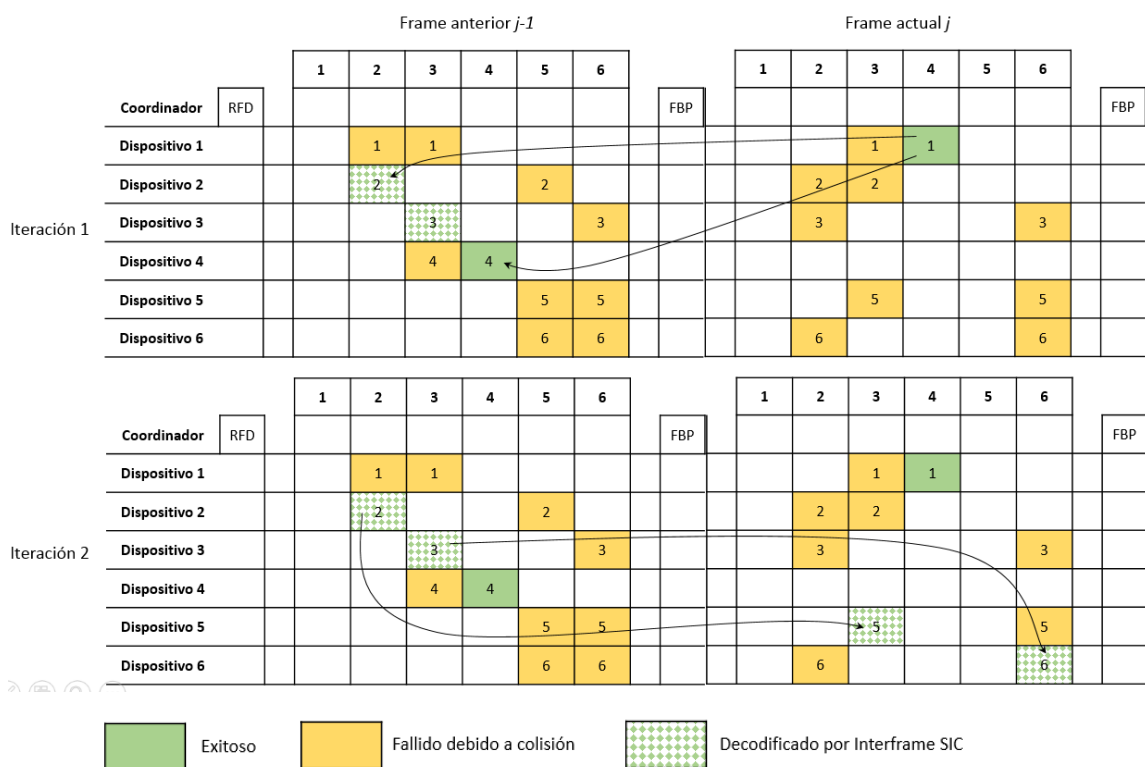


Fig. 4.8 Protocolo Inter-frame SIC-FSA

La Fig. 4.8 ilustra el funcionamiento del protocolo Inter-frame SIC-FSA. Las dos iteraciones de cancelación de interferencias entre frames se muestran por separado, para mayor claridad.

El DCR inició en el frame $j-1$. Los 6 dispositivos seleccionan los slots para transmitir sus réplicas, y el coordinador se encarga de decodificar los paquetes en los slots exitosos y aplicar Intra-frame SIC. Al finalizar el frame $j-1$, el coordinador únicamente ha logrado decodificar el paquete en el slot 4, proveniente del dispositivo 4. Los slots restantes están vacíos o presentan colisiones que el coordinador no es capaz de resolver. Debido a que este es el primer frame de contención, no hay un frame previo para realizar Inter-frame SIC, por lo que el coordinador almacena las señales obtenidas en los slots donde las colisiones no pudieron resolverse en $j-1$ y se inicia un nuevo frame.

En el nuevo frame j , compiten todos los dispositivos que no han tenido éxito en su transmisión. Hay un único slot exitoso, en el que se decodifica la información enviada por el dispositivo 1 en el slot 4 (paquete 1). El coordinador sustrae este paquete a la señal del slot 3 en el frame j , pero aún no es posible resolver la colisión.

Teniendo un frame previo almacenado en memoria es posible aplicar Inter-frame SIC. En la primera iteración, el coordinador toma los paquetes decodificados en j , (en este caso únicamente el paquete 1) y lo sustrae en los

slots 2 y 3 del frame $j-1$. Aplicando la cancelación de interferencias en $j-1$, es posible decodificar los paquetes 2 y 3.

Llegados al final de la primera iteración, han sido decodificados los paquetes de los dispositivos 4, 1, 2 y 3 (exactamente en el orden en que fueron decodificados). Ahora, desde el frame $j-1$, se utilizarán los paquetes 2 y 3 para intentar solucionar las colisiones en el frame j .

En la segunda iteración, el coordinador toma la información del paquete 2 y la sustrae a la señal recibida en el slot 3, ahora el coordinador puede decodificar el paquete 5. Por último, la información del paquete 3 se sustrae a la señal en el slot 6, haciendo posible la decodificación del paquete proveniente del dispositivo 6.

En este ejemplo, es posible finalizar el DCR en 2 frames de transmisión, almacenando un único frame previo. Si el sistema permite almacenar 2 frames, se realizarán hasta 6 iteraciones de Inter-frame SIC.

CAPÍTULO 5. MODELO PARA EL CÁLCULO DE DELAY Y CONSUMO ENERGÉTICO

En esta sección se desarrolla el modelo matemático utilizado para calcular las variables que se desea minimizar a través de los protocolos MAC considerados. Se formulan las expresiones para: delay promedio, energía promedio consumida por el coordinador y energía promedio consumida por dispositivo.

5.1 Average delay

El average delay puede definirse como el tiempo medio que tarda el sistema para finalizar la transmisión de datos desde todos los dispositivos al coordinador. Inicia con la transmisión del RFD y finaliza cuando todos los dispositivos han logrado transmitir correctamente sus paquetes de datos y el coordinador envía el último FBP. El delay promedio se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$Delay = RFD_{time} + Frame_{time} * TotalFrames \quad (5.1)$$

Donde $TotalFrames$ es el número medio de frames necesarios para finalizar la transmisión. El valor de $TotalFrames$ se obtiene a partir de simulaciones, haciendo uso del simulador diseñado en el contexto de este trabajo.

RFD_{time} es la duración del paquete RFD, con el que el coordinador solicita la transmisión de datos a los dispositivos. Puede ser calculado según:

$$RFD_{time} = \frac{RFD_{length}}{TransmissionRate} + Preamble_{time} \quad (5.2)$$

Donde RFD_{length} es la longitud (en bits) del paquete RFD, mientras que $Preamble_{time}$ es la duración de la secuencia de bits que añade la capa física a los paquetes que provienen de la subcapa MAC. Este tiempo de preámbulo es utilizado para sincronizar la transmisión, indicando el fin de la información de cabecera y el inicio de los datos. La longitud del paquete RFD se calcula como:

$$RFD_{length} = (MAC_{header} + CRC) * 8 \quad (5.3)$$

CRC es el Cyclic Redundance Check, un código en bytes utilizado para detectar errores en la transmisión debidos al canal. La cabecera MAC, contiene la información de direccionamiento para difundir el paquete RFD a todos los dispositivos.

$Frame_{time}$ es la duración de un frame. Un frame tiene m veces la duración de un slot, más la duración de los tiempos de guarda IFS que se introducen entre frames, así como el tiempo de duración del FBP enviado al finalizar la decodificación de paquetes. En este sentido:

$$Frame_{time} = IFS_{time} + Slots_{time} + IFS_{time} + FBP_{time} \quad (5.4)$$

$Slots_{time}$ es la duración del conjunto de slots en un frame. Puede ser calculado según:

$$Slots_{time} = Data_{time} * m \quad (5.5)$$

Donde $Data_{time}$ es la duración de un slot, que es exactamente el tiempo que ocupa la transmisión de un paquete de datos. Y m es la cantidad de slots por frame.

$$Data_{time} = \frac{Data_{length}}{TransmissionRate} + Preamble_{time} \quad (5.6)$$

$Data_{length}$ es el número total de bits del paquete de datos, puede ser formulado de la siguiente manera:

$$Data_{length} = (Data_{payload} + MAC_{header} + CRC) * 8 \quad (5.7)$$

Donde $Data_{payload}$ es el número total de bytes que contiene la información captada por el dispositivo.

Volviendo a la ecuación (5.4), el FBP se envía al finalizar cada frame a todos los dispositivos, indicando los paquetes decodificados correctamente. La duración del FBP se puede calcular según la ecuación:

$$FBP_{time} = \frac{FBP_{length}}{TransmissionRate} + Preamble_{time} \quad (5.8)$$

Donde FBP_{length} es la longitud en bits del paquete de feedback, que además de la información de los dispositivos exitosos, incluye los bits de la cabecera MAC, así como el CRC. Se puede calcular a través de la ecuación:

$$FBP_{length} = FBP_{payload} + (MAC_{header} + CRC) * 8 \quad (5.9)$$

$FBP_{payload}$ es el número total de bits con el que se transmite la información de feedback, y puede calcularse con:

$$FBP_{payload} = 16 * m \quad (5.10)$$

Donde m es el número de slots, y 16 es la cantidad de bits que se utilizarán para codificar la identificación de los dispositivos que han sido exitosos en cada uno de los m slots. Todas las variables temporales están expresadas en segundos.

5.2 Consumo promedio de energía por el coordinador

El consumo promedio de energía del coordinador es la energía que consume el coordinador (medida en Joules) desde que el proceso de transmisión inicia (con el paquete de RFD) hasta que todos los dispositivos logran transmitir correctamente sus paquetes de datos. Puede expresarse según:

$$Coordinator_{energy} = RFD_{energy} + TotalFrames * (IFS_{energy} + (Data_{rx} * m) + IFS_{energy} + FBP_{energy}) \quad (5.11)$$

Donde RFD_{energy} es la energía consumida por el coordinador durante la transmisión del paquete de RFD, puede ser calculada como:

$$RFD_{energy} = RFD_{time} * Tx_{power} \quad (5.12)$$

Donde RFD es la duración del paquete RFD (calculado previamente), y Tx_{power} es la potencia (en watts) consumida por el coordinador en el modo de transmisión.

IFS_{energy} es la energía consumida durante el tiempo entre frames IFS_{time} . Puede calcularse según la expresión:

$$IFS_{energy} = IFS_{time} * Standby_{power} \quad (5.13)$$

Donde $Standby_{power}$ es la potencia (en watts) consumida por el coordinador mientras permanece en modo Stand-by (mientras no recibe o transmite).

$Data_{rx}$ es la energía consumida por el coordinador cuando está recibiendo paquetes de información por parte de los dispositivos, puede estimarse con la ecuación:

$$Data_{rx} = Data_{time} * Rx_{power} \quad (5.14)$$

Donde Rx_{power} es la potencia consumida por el coordinador en el modo de recepción.

5.3 Consumo promedio de energía por dispositivo.

El consumo promedio de energía por dispositivo es una medida en Joules, es la energía media consumida por cada uno de los dispositivos que participan en la transmisión de datos al coordinador. Puede calcularse según la siguiente expresión:

$$Device_{energy} = RFD_{energy_{rx}} + Tx_{device_{energy}} * TotalFrames_{tx} + Sleep_{device_{energy}} * TotalFrames_{sleep} \quad (5.15)$$

Donde $RFD_{energy_{rx}}$ es la energía consumida por el dispositivo durante la recepción del paquete RFD. Este valor puede calcularse según:

$$RFD_{energy_{rx}} = Rx_{power} * RFD_{time} \quad (5.16)$$

Ya que el coordinador y los dispositivos utilizan el mismo transceptor de comunicaciones radio, el término Rx_{power} es el mismo que en la ecuación (5.14).

$TotalFrames_{tx}$ es el número medio de frames en los que el dispositivo transmite las réplicas de su paquete de datos hasta que es decodificada satisfactoriamente por el coordinador (obtenido mediante simulación). El término $Tx_{device_{energy}}$ es la energía que requiere un dispositivo i para transmitir sus k_i réplicas en un frame, que puede ser calculado según:

$$Tx_{device_{energy}} = IFS_{energy} + Data_{tx_{energy}} * k_{i_{avg}} + Data_{standby_{energy}} * (m - k_{i_{avg}}) + IFS_{energy} \quad (5.17)$$

La cantidad de réplicas a transmitir k_i es un valor aleatorio, por lo que el cálculo de $Tx_{device\ energy}$ se realiza utilizando el valor medio $k_{i\ avg}$.

$Data_{tx}$ es la energía que consume un dispositivo durante la transmisión de una réplica de su paquete de datos en un slot. La energía consumida por un dispositivo en los slots donde no transmite réplicas de su paquete de datos es $Data_{standby\ energy}$. La expresión $Data_{tx\ energy}$ puede escribirse como:

$$Data_{tx\ energy} = Data_{time} * Tx_{power} \quad (5.18)$$

Donde $Data_{time}$ es el tiempo empleado en la transmisión del paquete de datos, formulado en (5.6), y Tx_{power} es la potencia (en watts) consumida por el transceptor del dispositivo cuando se encuentra en modo de transmisión. Volviendo a (5.17) $Data_{standby\ energy}$ puede calcularse según:

$$Data_{standby\ energy} = Data_{time} * Standby_{power} \quad (5.19)$$

Donde $Standby_{power}$ es la potencia (en watts) consumida por un dispositivo en un slot donde no transmite réplicas, en un frame de transmisión en el que el dispositivo participa.

La expresión $Sleep_{device\ energy}$ indicada en (5.15) es la energía consumida durante un frame por un dispositivo que permanece en modo "sleep" después de que su paquete ha sido decodificado. Puede expresarse como:

$$Sleep_{device\ energy} = (IFS_{time} + Slots_{time} + IFS_{time} + FBP_{time}) * Sleep_{power} \quad (5.20)$$

Donde $Sleep_{power}$ es la potencia consumida por el transceptor cuando el dispositivo está en modo "sleep".

De manera similar, $TotalFrames_{sleep}$ es la cantidad de frames en que un dispositivo permanece en modo "sleep" luego de que su paquete de datos ha sido decodificado correctamente. Al igual que $TotalFrames$ y $TotalFrames_{tx}$, el valor de $TotalFrames_{sleep}$ se obtiene a través del simulador software que descrito en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 6. DESARROLLO DEL SIMULADOR

6.1 Intra-frame SIC-FSA

El protocolo Intra-frame SIC-FSA fue implementado según el diagrama de flujo ilustrado en la Fig. 6.1. Básicamente, se realiza la simulación de un Data Collection Round utilizando un único ciclo, que se ejecuta hasta completar la transmisión de datos por parte de todos los dispositivos involucrados. Para ilustrar de forma más sencilla el funcionamiento de este ciclo, se reduce el procedimiento a 3 módulos o subprocesos básicos: (i) Selección de Slots, (ii) Detección de colisiones y finalmente (iii) Cancelación de Interferencias y decodificación de paquetes. Cuando todos los dispositivos tienen éxito en su transmisión, el bucle deja de ejecutarse y se calculan los promedios para las variables de interés: delay, consumo energético del Coordinador y de los dispositivos.

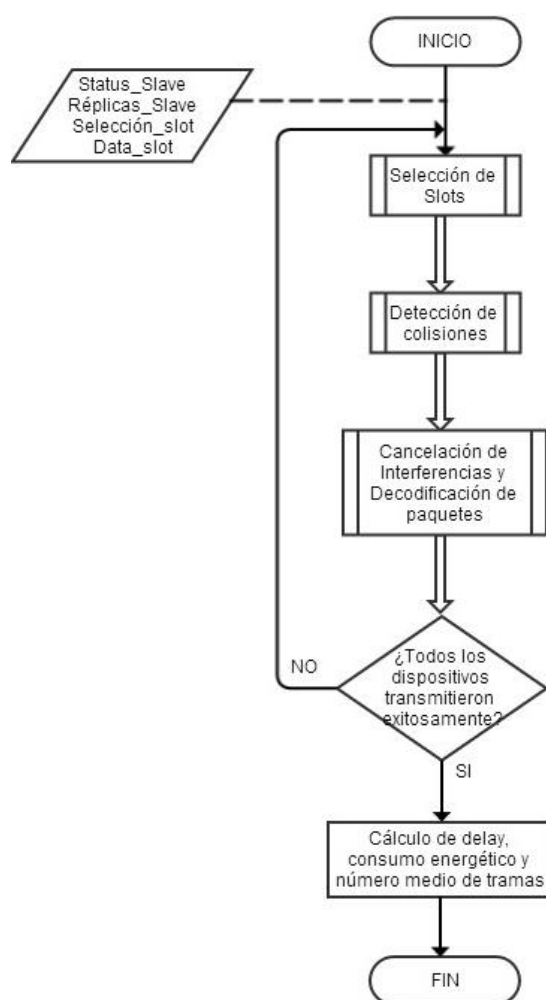


Fig.6.1 Diagrama de flujo Intra-frame SIC-FSA

A través del vector ‘Status_Slave’ de longitud n (donde n es el número de dispositivos de la red) se realiza el seguimiento del status de cada uno de los dispositivos, donde el valor ‘-1’ representa que el dispositivo ha sido exitoso previamente en su transmisión y el valor ‘0’ implica que el dispositivo está habilitado para transmitir su paquete de datos en el frame actual.

Por otra parte, el vector “Réplicas_slave” permite almacenar la cantidad de réplicas que ha elegido transmitir cada uno de los dispositivos. Al igual que en el caso anterior, “Réplicas_slave” es un vector de longitud n .

Para conocer los slots donde cada dispositivo transmite su paquete de datos, la matriz “Selección_slots” de n filas y k columnas almacena esta información. Es importante recordar que k es el número máximo de réplicas a transmitir, y que cada dispositivo i puede elegir un número de réplicas k_i menor o igual a k , por lo que algunas posiciones de esta matriz podrían contener el valor ‘0’ si el dispositivo no envía el número máximo de réplicas k o si ha sido exitoso en su transmisión previamente, por lo que no compete en este frame.

Por último, para identificar las transmisiones exitosas así como las colisiones, el vector “Data_slot” contiene la cantidad de paquetes que han sido transmitidos en cada slot en el frame de transmisión actual. En este sentido, la longitud de este vector es m , donde este valor representa la cantidad de slots en lo que está dividido el frame de transmisión.

Para ilustrar la simbología utilizada, la Fig.6.2 representa el contenido de las variables empleadas para simular un proceso donde compiten 5 dispositivos que pueden transmitir un máximo de 3 réplicas en un frame de contención dividido en 7 slots.

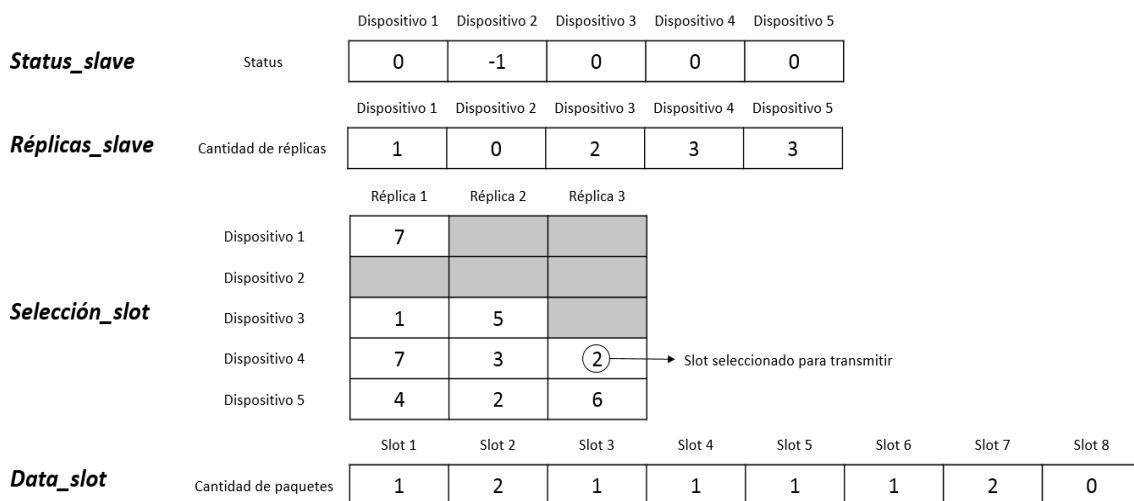


Fig. 6.2 Variables empleadas Intra-frame SIC-FSA

Del vector “Status_slave” es posible establecer que los dispositivos 1, 3, 4 y 5 están compitiendo actualmente por el canal, mientras que el dispositivo 2 ya ha transmitido su paquete, por lo que su status se representa con el valor ‘-1’.

Del vector “Réplicas_slave” se obtiene la cantidad de veces que cada dispositivo envía su paquete de datos. En este sentido, el dispositivo 1 transmite una vez su paquete de datos, el dispositivo 3 transmite 2 veces sus datos, mientras que los dispositivos 4 y 5 transmiten 3 veces sus paquetes de datos.

Los slots donde son transmitidas las réplicas de cada dispositivo se muestran en la matriz “Selección_slot”. El número de elementos que componen esta matriz dependerá de la cantidad de réplicas que elija cada dispositivo. De acuerdo con este razonamiento, el dispositivo 2, que ya transmitió correctamente su paquete de datos, no selecciona ningún slot, por lo que la fila correspondiente a este dispositivo no contiene datos.

La cantidad de paquetes de datos en cada uno de los slots se almacena en el vector “Data_slot”. Claramente, la sumatoria de la cantidad de réplicas enviadas por todos los dispositivos debe coincidir con el total de paquetes en todos los slots.

6.1.1 Módulo 1. Selección de Slots

A través de este procedimiento, cada uno de los dispositivos cuyo status les habilita para transmitir su paquete de datos realiza la selección de los slots donde se transmitirán las réplicas del paquete de datos.

La selección de slots inicia para aquellos dispositivos cuyo status indica que están “esperando para transmitir”. Cada uno de ellos elige la cantidad de réplicas a transmitir en el frame actual (según la FDP bajo estudio). Una vez conocida la cantidad de réplicas k_i que transmitirá este dispositivo, la selección de slots se realiza de manera aleatoria, utilizando la función *randi* de MATLAB.

Para asegurarnos de que el dispositivo no ha elegido más de una vez el mismo slot, se realiza un ciclo de corrección de errores. El proceso consiste en comparar uno a uno los slots seleccionados para transmitir las réplicas. Si se encuentra un slot repetido, se selecciona aleatoriamente un nuevo valor y se utiliza una variable a modo de flag, que indica que es necesario revisar nuevamente los slots seleccionados por este dispositivo. El proceso de revisión finaliza cuando todos los slots seleccionados por un dispositivo son diferentes.

El proceso ejecutado por el módulo de selección de slots puede describirse a través del pseudocódigo a continuación.

BEGIN

FOR cada uno de los dispositivos:

IF el STATUS del dispositivo actual es “esperando para transmitir”:

Dispositivo en modo activo.

Cantidad de réplicas a transmitir por el dispositivo actual \leftarrow Multinomial probability distribution.

Seleccionar los slots donde se transmitirán las réplicas.

FOR cada una de las réplicas transmitidas por este dispositivo:

DO

Seleccionar slot donde se transmite esta réplica.

Revisar los slots donde se transmiten las réplicas anteriores.

IF alguno de los slots seleccionados para las réplicas anteriores coincide con el slot seleccionado para la réplica actual:

Seleccionar un nuevo slot para transmitir réplica actual.

Bit de revisión \leftarrow TRUE.

END IF

WHILE el bit de revisión tenga valor TRUE.

END FOR

ELSE

Dispositivo en modo stand-by.

END IF

END FOR

END

6.1.2 Módulo 2. Detección de colisiones.

En este módulo se identifican los slots vacíos, exitosos (paquetes decodificados correctamente) o fallidos (colisiones). Para identificar cada uno de estos casos, se almacena la cantidad de paquetes enviados en cada slot. El primer paso es revisar cada una de las réplicas enviadas por todos los dispositivos que transmiten en el frame actual, y almacenar la cantidad de paquetes en cada slot.

BEGIN

FOR cada uno de los slots:

FOR cada uno de los dispositivos:

Revisar si alguna réplica enviada por este dispositivo fue transmitida en este slot.

IF existe alguna réplica transmitida por el dispositivo actual en este slot:

Incrementar en una unidad la cantidad de paquetes transmitidos en este slot.

END IF

END FOR

END FOR

END

6.1.3 Módulo 3. Cancelación de Interferencias y decodificación de paquetes.

En este módulo del simulador se lleva a cabo la tarea del coordinador, decodificación de paquetes recibidos, y cancelación de interferencias en los slots con colisiones. Para esto, el primer paso consiste en revisar cada uno de los slots y la cantidad de paquetes que han sido enviados en cada uno de ellos. En este sentido, si el slot contiene únicamente un paquete, éste puede ser decodificado correctamente por el coordinador. Esto implica que el dispositivo que ha elegido este slot para transmitir una de sus réplicas ha tenido éxito y cambiará su status a “transmisión exitosa”.

Como parte del proceso de cancelación de interferencias, para solucionar las colisiones que pudieron ser causadas por las réplicas restantes enviadas por el dispositivo exitoso, deben sustraerse las señales provenientes de este dispositivo en los otros slots. Para ello, se ubican los slots donde fueron transmitidas las réplicas y se reduce en una unidad la cantidad de paquetes en éstos slots.

Si alguna de las réplicas enviadas por el dispositivo exitoso ha causado una colisión en otro slot, el proceso de cancelación de interferencias permite eliminar esta referencia, y en el mejor de los casos, resolver la colisión, decodificando todos los paquetes involucrados. Para ello, se levanta una bandera cada vez que las réplicas de un dispositivo exitoso han sido sustraídas, con el fin de reiniciar el proceso de búsqueda de slots que contengan únicamente un paquete de datos.

El proceso descrito anteriormente se repite mientras el flag de revisión se mantiene en true, y finaliza cuando no es posible resolver otra colisión (todos los slots contienen más de un paquete de datos) o bien, cuando todos los slaves han tenido éxito en su transmisión (la cantidad de paquetes en todos los slots es igual a cero). El siguiente pseudocódigo resume la operación del módulo de decodificación y cancelación de interferencias.

BEGIN

DO

FOR cada uno de los slots:

IF el slot actual tiene únicamente un paquete transmitido:

FOR cada uno de los dispositivos:

IF alguna réplica fue enviada en el slot actual y el dispositivo se encuentra en status “esperando para transmitir”:

Status dispositivo \leftarrow Transmisión exitosa.

FOR cada una de las réplicas enviadas por este dispositivo:

Disminuir en una unidad la cantidad de paquetes existentes en el slot donde se transmite la réplica.

END FOR

Flag de revisión \leftarrow TRUE.

END IF

END IF

END IF

END FOR

WHILE el flag de revisión tenga valor TRUE.

END

Finalmente, el cálculo de los parámetros de estudio se realiza en función de algunos valores que se almacenan en el proceso: número de frames para finalizar el proceso de transmisión, número promedio de dispositivos que permanecen en stand-by, así como la cantidad de dispositivos que permanecen activos durante el proceso de contención. Utilizando las expresiones propuestas en el capítulo anterior se calculan los valores necesarios para evaluar el desempeño de este protocolo.

6.2 Inter-frame SIC-FSA

Igual que en el protocolo Intra-frame SIC-FSA, el protocolo Inter-frame SIC-FSA puede representarse mediante de un bucle básico que se ejecuta mientras existan dispositivos que no han logrado transmitir de manera exitosa su información.

Inter-frame SIC-FSA utiliza el frame al que fue aplicado Intra-frame SIC-FSA, almacena toda la información necesaria por el coordinador y ejecuta el procedimiento de cancelación de interferencias en frames previos. Los tres primeros procesos que componen el bucle principal son exactamente iguales a los que se ejecutan en Intra-frame SIC-FSA, por lo que no serán descritos nuevamente en esta sección.

El proceso Inter-frame SIC-FSA fue desarrollado de acuerdo con el algoritmo mostrado en la Fig. 6.3.

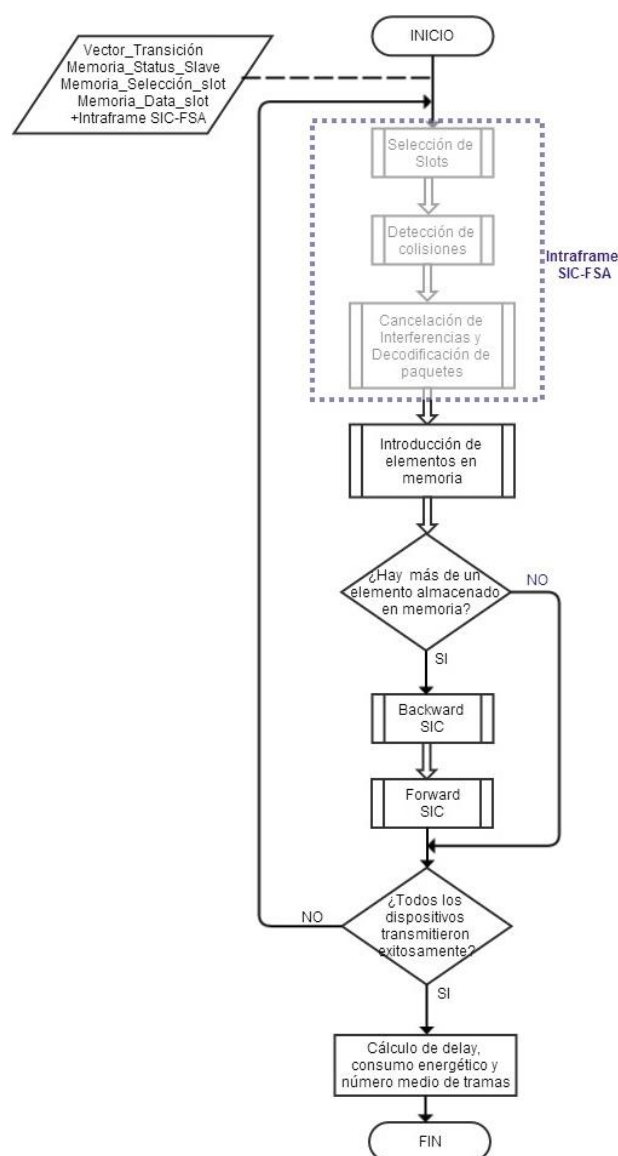


Fig. 6.3 Diagrama de flujo Inter-frame SIC-FSA

Las variables utilizadas para la programación del simulador incluyen aquellas requeridas en Intra-frame SIC-FSA además de un conjunto de matrices que son utilizadas a modo de “memoria” para almacenar la información de los frames anteriores.

Memoria_Status_Slave es una matriz de s filas y n columnas, donde s es el parámetro que representa la cantidad de frames que se almacenan en memoria. Básicamente, contiene la información del vector Status_Slave (usado en Intra-frame SIC-FSA) al finalizar un frame de transmisión.

Memoria_Data_Slot almacena la cantidad de paquetes en cada slot al finalizar un frame de transmisión luego de ser aplicado el proceso Intra-frame SIC-FSA. Por cada frame que se almacena se tienen m slots, por lo que la dimensión de esta matriz es $s \times m$.

Para almacenar la selección de slots por parte de cada uno de los dispositivos a lo largo de los frames de transmisión ocurridos, recurrimos a Memoria_Data_Slot. Esta matriz debe contener los slots elegidos en cada una de las réplicas por todos los dispositivos del sistema, por ello, contiene s filas y un número de columnas igual al producto de n por k .

Vector_Transición es la variable fundamental para llevar a cabo el procedimiento de cancelación de interferencias entre frames. Básicamente es un indicador que permite conocer cuáles son los dispositivos que han tenido éxito con respecto al frame anterior.

La variable Vector_Transición nos muestra cuáles son los dispositivos que han cambiado de status entre un frame y el siguiente. Utilizando esta información, es posible realizar la substracción de los paquetes de datos y la cancelación de interferencias, con la información de los frames anteriores.

La Fig. 6.4 muestra la simbología para las variables más relevantes en un ciclo de Inter-frame SIC-FSA, justo antes de aplicar la cancelación de interferencias entre frames. Para este ejemplo, se considera $n=4$ dispositivos, que pueden transmitir hasta $k=4$ réplicas en $m=8$ slots. La cantidad de frames que se pueden almacenar es $s=2$.

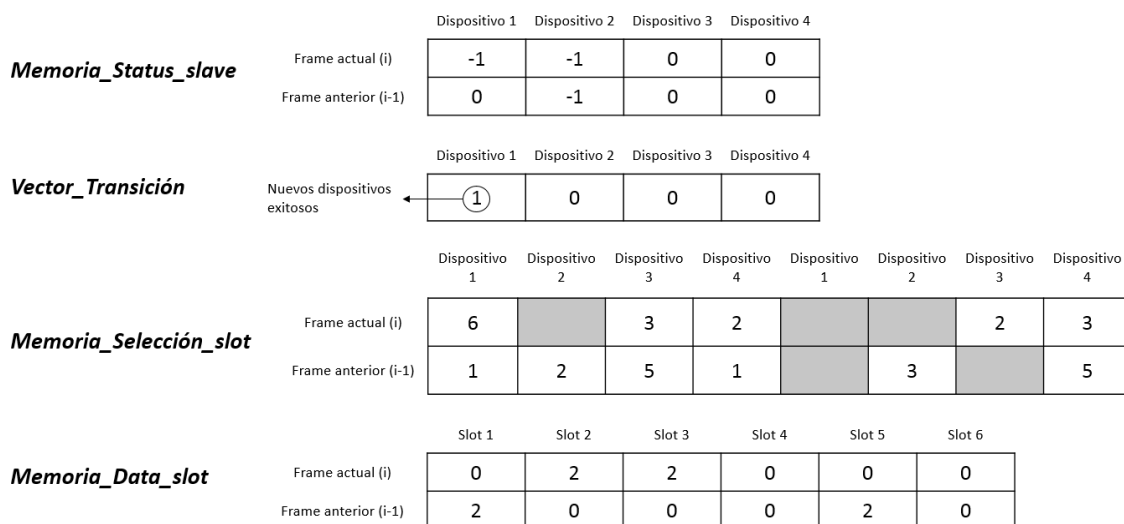


Fig. 6.4 Variables empleadas Inter-frame SIC-FSA

En figura anterior se encuentra la información almacenada para dos frames de transmisión. La variable Vector_Transición indica que existe un nuevo dispositivo que ha tenido éxito entre el frame anterior y el más reciente, el dispositivo 1.

Con el fin de hacer más sencilla la comprensión de la metodología aplicada, es conveniente definir la siguiente simbología, aplicada a las variables que involucren almacenamiento en memoria:

- El índice j designa un frame con posición genérica dentro de la matriz.
- La información del frame actual siempre se almacena en la primera fila de las matrices de memoria.

- Recorrer las filas de una variable desde la posición inferior a la superior representa recorrer desde el frame más reciente hasta el más antiguo. Entonces, el índice $j+1$ contiene la información de un frame previo al que fue almacenado en la fila j .

6.2.1 Bloque 4. Introducción de elementos en memoria.

Este módulo toma la información del frame al que fue aplicado Intra-frame SIC-FSA y almacena en las variables descritas anteriormente. Cuando no hay ningún elemento actualmente en memoria, el algoritmo introduce la información del frame actual en la primera fila de la matriz. En caso contrario, se desplazan todos los registros de manera que la información del frame más reciente se almacena siempre en la primera fila de las matrices de memoria. Si todas las posiciones de memoria han sido ocupadas, se desecha la información del frame más antiguo y se realiza el proceso de almacenamiento de forma regular.

BEGIN

IF no hay elementos almacenados en memoria

Introducir la información de Data_Slot, Selección_Slot, Status_Slave en la primera posición de las variables correspondientes: Memoria_Data_Slot, Memoria_Selección_Slot, Memoria_Status_Slave.

IF aún existe espacio disponible en memoria

Incrementar en una unidad la cantidad de elementos en memoria.

END IF

ELSE

FOR cada una de las posiciones de memoria, hasta la posición $s-1$

Desplazar la información de las variables Memoria_Data_Slot, Memoria_Selección_Slot, Memoria_Status_Slave desde su posición actual (j) hasta la siguiente posición ($j+1$).

END FOR

IF aún existe espacio disponible en memoria

Incrementar en una unidad la cantidad de elementos en memoria.

END IF

END IF

END

6.2.2 Bloque 5. Backward SIC.

El proceso de cancelación de interferencias entre frames inicia formalmente aquí. Básicamente, consiste en utilizar la nueva información decodificada en el frame actual j (indicada a través de Vector_Transición) para aplicar la cancelación de interferencias en frames anteriores. Conociendo los nuevos mensajes que han sido decodificados, es posible volver al frame anterior almacenado en $(j+1)$, resolver las colisiones causadas por estos dispositivos y decodificar paquetes que no pudieron resolverse en el frame actual. Nuevamente, la información obtenida en $j+1$ se utiliza para resolver las colisiones del frame $j+2$, y el proceso se repite hasta llegar al último elemento almacenado en memoria.

El procedimiento es el siguiente: para cada uno de los frames en memoria, identificados con el índice j se realiza el proceso Intra-frame SIC con la información en las variables de memoria.

Para conocer los nuevos dispositivos exitosos, se obtiene el Vector_Transición comparando el status de los dispositivos entre el frame j -ésimo y su predecesor, frame $j+1$. Si existe un nuevo dispositivo exitoso, se señalará con el valor "1" en Vector_Transición.

El siguiente paso es eliminar las referencias de los slaves exitosos en la posición de memoria $j+1$, esto es, disminuir la cantidad de paquetes en los slots seleccionados por este dispositivo en dicho frame y cambiar el status de los dispositivos a "transmisión exitosa".

Es posible que la sustracción de señales en el frame $j+1$ deje slots con exactamente un paquete de datos (con posibilidad de decodificar), y esto se resuelve en la siguiente iteración del ciclo, donde se aplica la cancelación de interferencias intra-frame en $j+1$, y las referencias de los dispositivos exitosos se sustraen en el frame $j+2$. El proceso continua hasta el último frame almacenado en memoria, para el cual solo se realiza la cancelación de interferencias intra-frame.

BEGIN

FOR cada uno de los elementos almacenados en memoria (indicado con j)

Realizar cancelación de Interferencias Intra-frame en j .

Obtener nuevos dispositivos exitosos con respecto al frame $j+1$.

IF el frame actual j no es el último almacenado en memoria:

FOR cada uno de los dispositivos que tuvieron éxito en este frame:

Cambiar status del dispositivo a "Transmisión exitosa" en el frame $j+1$.

Disminuir en una unidad la cantidad de paquetes en los slots seleccionados para transmitir las réplicas en el frame $j+1$.

END FOR

END IF

END FOR

END

6.2.3 Bloque 6. Forward SIC.

Alcanzado este punto, se ha trasladado la información de los paquetes decodificados desde el frame más reciente hasta el más antiguo que pudo ser almacenado. En este sentido, la cantidad de dispositivos exitosos en el frame más antiguo es mayor o igual a la que existe en el frame actual.

Es posible seguir decodificando paquetes de datos, y para actualizar la información de dispositivos exitosos en todos los frames anteriores a aquel en que se realizó la decodificación, el proceso de cancelación de interferencias Inter-frame se debe realizar en sentido opuesto, desde el frame más antiguo al más reciente.

BEGIN

FOR cada uno de los elementos almacenados en memoria (indicado con j)

Realizar cancelación de Interferencias Intra-frame en j .

Obtener nuevos dispositivos exitosos con respecto al frame $j-1$.

IF el frame actual j no es el más reciente almacenado en memoria:

FOR cada uno de los dispositivos que tuvieron éxito en este frame:

Cambiar status del dispositivo a "Transmisión exitosa" en el frame $j-1$.

Disminuir en una unidad la cantidad de paquetes en los slots seleccionados para transmitir las réplicas en el frame $j-1$.

END FOR

END IF

END FOR

END

CAPÍTULO 7. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS PROTOCOLOS DESARROLLADOS

En esta sección se presentan los resultados de rendimiento de los protocolos Intra-frame SIC-FSA e Inter-frame SIC-FSA y se comparan con FSA. Para evaluar el desempeño de los protocolos se realizaron simulaciones sobre el software desarrollado en MATLAB. Con el fin de determinar cuál es el protocolo que brinda las mejores prestaciones se evalúan las siguientes variables:

- Delay promedio.
- Energía promedio consumida por el coordinador.
- Energía promedio consumida por cada dispositivo.

Para cada caso de estudio se promediaron 1000 muestras. Los parámetros de la simulación fueron seleccionados de acuerdo con el estándar IEEE 802.11 y según las especificaciones energéticas de un dispositivo Wi-Fi de bajo consumo llamado RN-131 de Roving Networks comúnmente utilizado en redes M2M. Los parámetros se presentan en la Tabla 7.1

Tabla 7.1. Parámetros del sistema.

Parámetro	Valor
MAC Header	30 bytes
CRC	4 bytes
FBP Payload	16 bits/slot
Data Payload	1024 bytes
Tasa de Transmisión	54 Mbps
TIFS	10us
Potencia de transmisión P_{tx}	210 mA * 3V
Potencia de recepción P_{rx}	40 mA * 3V
Potencia en modo sleep P_{sleep}	3.4 uW
Preamble time	20 us

Las operaciones realizadas por los protocolos MAC se implementaron sin realizar simplificación alguna. Se asume que el coordinador posee completo conocimiento sobre el canal de comunicación, y que las características del canal son invariantes en el tiempo. Adicionalmente, no se consideran los efectos de degradación en las señales por ruido o interferencias. Básicamente, se considera que la SNR es lo suficientemente alta como para permitir la decodificación de los mensajes en los slots exitosos.

7.1 Intra-frame SIC-FSA

El primer paso para el estudio del protocolo Intra-frame SIC-FSA consiste en obtener los valores óptimos del número de slots por frame (m) y del número máximo de réplicas a transmitir (k) que minimizan el delay y el consumo energético. Es importante recordar que para la implementación del protocolo Intra-frame SIC-FSA se ha considerado que el número de réplicas por frame es aleatorio, de modo que puede ser diferente en cada dispositivo y en cada frame. En un frame de transmisión cada dispositivo elige aleatoriamente el número de réplicas que va a transmitir a través de una función de densidad de probabilidad (FDP) definida. Se consideran las siguientes FDP para el número de réplicas: (i) uniforme, (ii) irregular.

G. Liva introduce las distribuciones irregulares como funciones de densidad de probabilidad que han sido optimizadas a través de técnicas de evolución diferencial para maximizar el rendimiento del protocolo IRSA (Irregular Slotted-ALOHA) [3]. El uso de distribuciones irregulares da lugar a “*irregular graphs*”, que no son más que esquemas de selección de slots en los que los nodos (o dispositivos) de una red eligen diferentes cantidades de slots para transmitir su información (k variable).

Una vez optimizados los parámetros del número de slots por frame (m) y del número máximo de réplicas a transmitir (k), se realiza el estudio para redes más densas, incrementando el número de dispositivos involucrados en el proceso de transmisión.

7.1.1 Optimización del número de slots (m) y número máximo de réplicas a transmitir (k)

7.1.1.1 FDP Uniforme

En el protocolo Intra-frame SIC-FSA con número aleatorio de réplicas con FDP uniforme, cada dispositivo i elige un número k_i de réplicas según la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$K_i \sim Unif(1, k) \quad (6.1)$$

El objetivo es lograr reducir los mínimos de delay y consumo energético obtenidos para FSA y SIC-FSA, cuyos valores se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Mínimos de delay, energía promedio consumida por coordinador y dispositivo para D-FSA y SIC-FSA

	Delay [s]	Energía Promedio consumida por el Coordinador [J]	Energía promedio consumida por dispositivo [J]
FSA	0.07426	0.009031	0.1815
SIC-FSA ($k=3, m=2n$)	0.03549	0.004334	0.1914

Las Fig. 7.1, 7.2 y 7.3 muestran el delay promedio, la energía promedio consumida por coordinador y la energía promedio consumida por dispositivo, respectivamente, considerando un total de 100 dispositivos. Los 3 parámetros han sido evaluados en función del número máximo de réplicas k , para diferentes longitudes de frame ($m=n$, $m=1.25n$, $m=1.5n$, $m=2n$, $m=3n$). Adicionalmente, se incluyen los resultados para el protocolo D-FSA y para la implementación convencional de Intra-frame SIC-FSA, denominado SIC-FSA, en el que k es un valor constante entre los dispositivos que participan en la transmisión de datos.

Los resultados del protocolo FSA corresponden con D-FSA cuando $k=1$, es decir, cuando se envía una única réplica sin realizar el proceso de cancelación de interferencias.

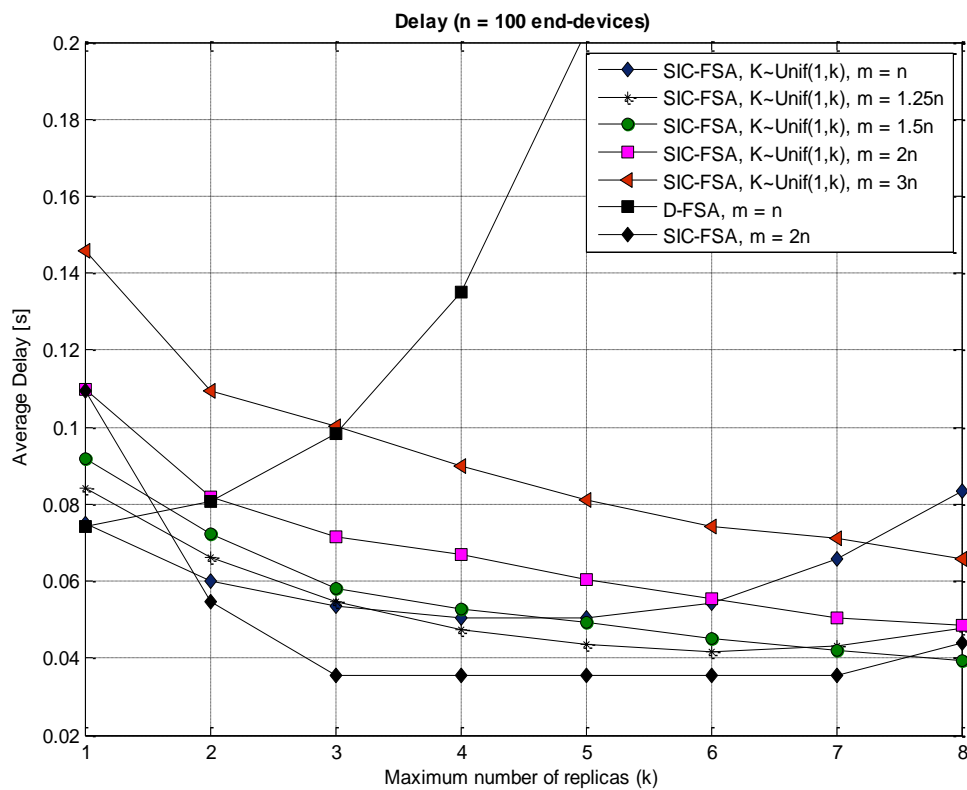


Fig. 7.1 Delay promedio para finalizar DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

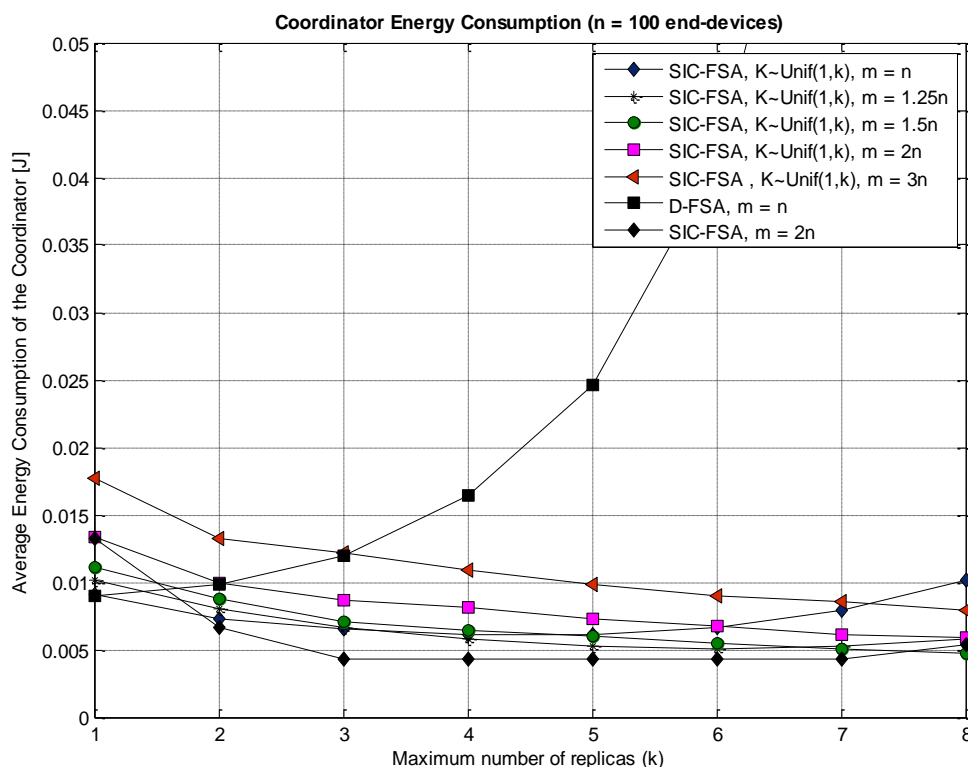


Fig. 7.2 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

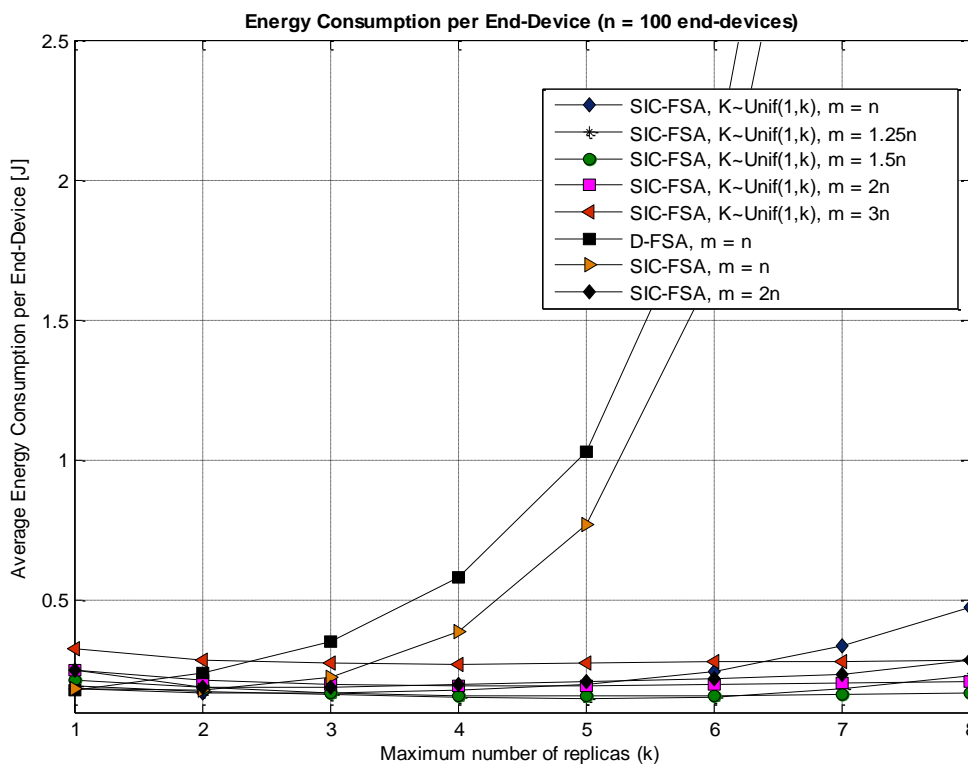


Fig. 7.3 Energía promedio consumida por dispositivo durante DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

Como se esperaba, los resultados de delay y consumo energético usando Intra-frame SIC-FSA con k uniforme tienen una tendencia similar al protocolo SIC-FSA (k fijo). Para todos los valores de k , Intra-frame SIC-FSA con FDP uniforme mejora los resultados respecto a D-FSA. Los mínimos de delay, energía consumida por coordinador y energía consumida por dispositivo se presentan cuando se fija $k=6$. Sin embargo, Intra-frame SIC-FSA con FDP uniforme no representa una mejora significativa respecto a los resultados obtenidos con SIC-FSA convencional con número fijo de réplicas.

Llegados a este punto, es importante reconocer que es posible mejorar el desempeño de FSA convencional a través de la aplicación de técnicas de cancelación de interferencias, incluso cuando la selección de la cantidad de réplicas a transmitir es variable entre dispositivos en cada frame de transmisión. La posibilidad de mejorar los resultados obtenidos con SIC-FSA convencional dependerá entonces de la selección de una FDP apropiada. La investigación conduce a la evaluación de números aleatorios de réplicas con FDP irregulares, que se evaluarán en el siguiente apartado de esta sección.

7.1.1.2 FDP Irregular

Del trabajo presentado por G. Liva [4] se extraen las FDP que se evalúan en este apartado. De acuerdo con el análisis realizado en [4], dichas FDPs han mejorado el rendimiento de protocolos basados en Slotted-ALOHA en redes de comunicaciones por satélite. Cada dispositivo i elige un número aleatorio k_i de réplicas según la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$FDP_{LIVA} = \begin{cases} 0.5102x^2 + 0.48982x^4 & \text{para } k = 4 \\ 0.5631x^2 + 0.0436x^3 + 0.3933x^5 & \text{para } k = 5 \\ 0.5465x^2 + 0.1623x^3 + 0.2912x^6 & \text{para } k = 6 \\ 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8 & \text{para } k = 8 \end{cases} \quad (7.2)$$

Para esta distribución, la probabilidad de que un dispositivo i elija transmitir k_i réplicas viene representada por el coeficiente de cada uno de los términos del polinomio, mientras que el número máximo de réplicas que se pueden transmitir k lo determina el orden del polinomio. Por ejemplo, si $k=5$, las probabilidades de que este dispositivo transmita 2, 3 ó 5 réplicas en un frame son 56.13%, 4.36% y 39.33% respectivamente.

Las Fig. 7.4, 7.5 y 7.6 muestran el delay promedio, la energía promedio consumida por coordinador y la energía promedio consumida por dispositivo, respectivamente, considerando un total de 100 dispositivos. Los 3 parámetros han sido evaluados en función del número máximo de réplicas k y para diferentes longitudes de frame ($m=n$, $m=1.25n$, $m=1.5n$, $m=2n$, $m=3n$).

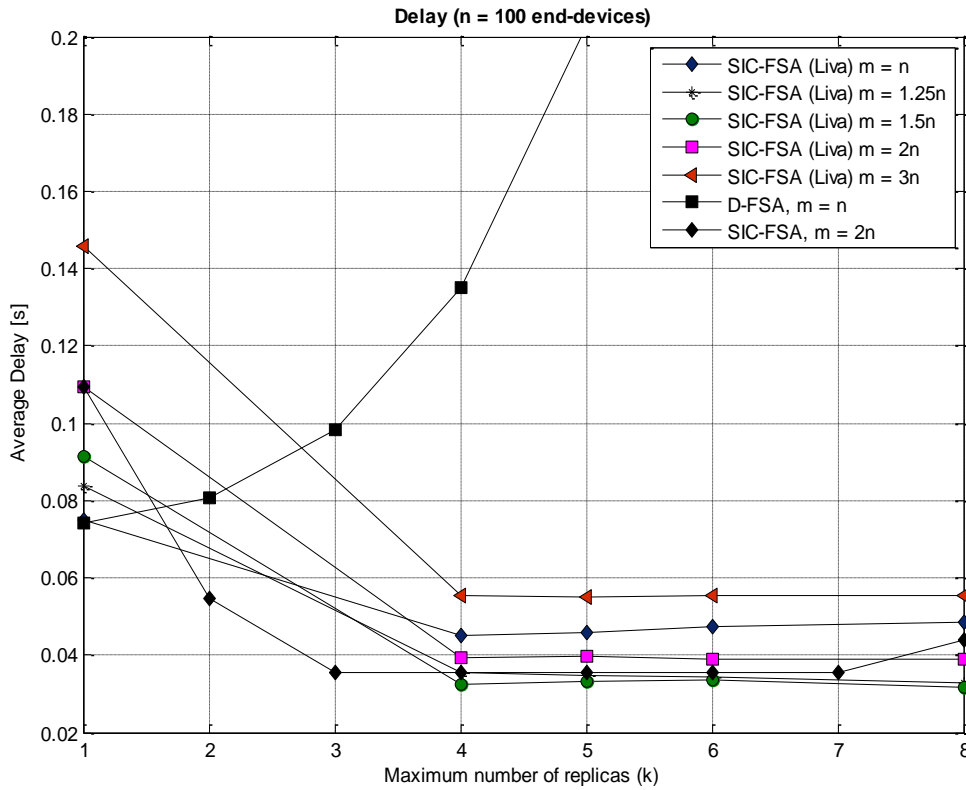


Fig 7.4 Delay promedio para finalizar un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDP}_{\text{LIVA}}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

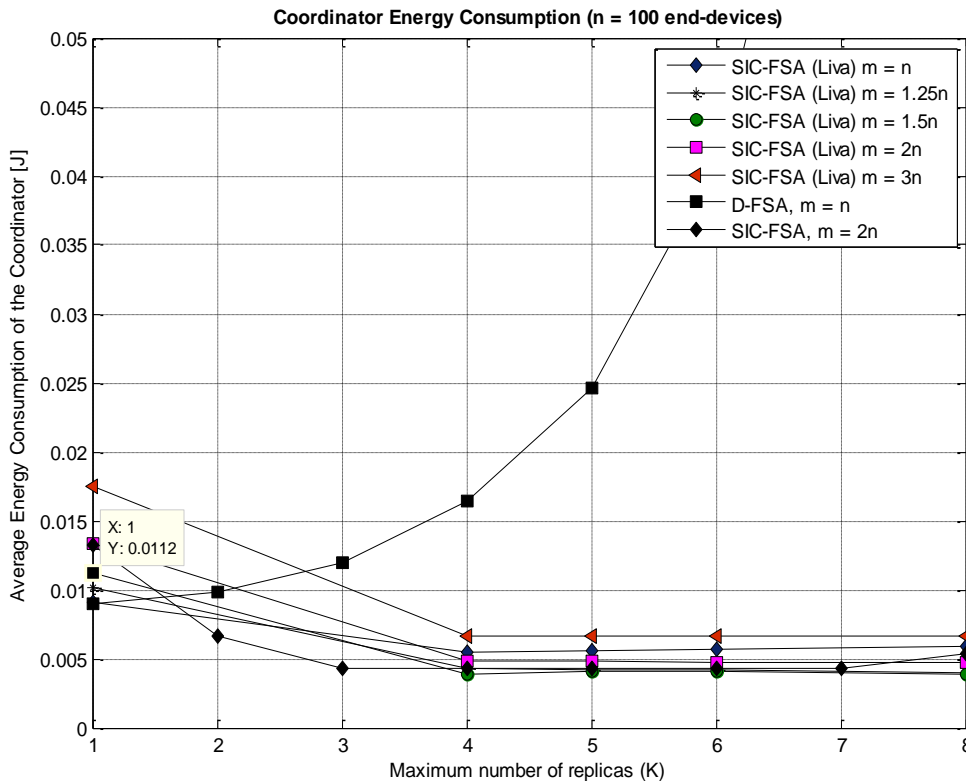


Fig 7.5 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDP}_{\text{LIVA}}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

Como se esperaba, el delay y energía promedio consumida por el coordinador presentan la misma tendencia, debido a que dependen directamente del número de slots en el frame de transmisión. Se observa un rango de valores de k en el que se consiguen los valores mínimos de delay y consumo energético. Cuando k está por debajo de este rango, Intra-frame SIC-FSA con FDP irregular ofrece resultados similares a los de FSA. Al transmitirse pocas réplicas del paquete de datos, resulta imposible realizar el proceso de cancelación de interferencias. Debido a las colisiones no resueltas, el número de tramas necesario para completar la transmisión aumenta, y consecuentemente incrementa el delay así como el consumo de energía.

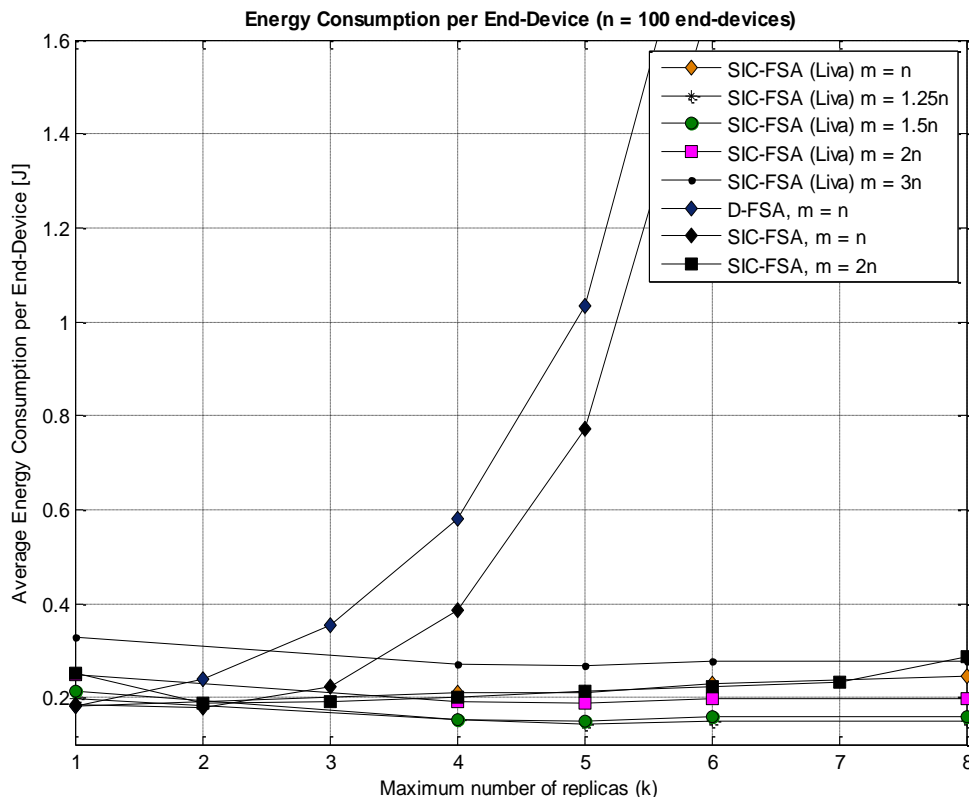


Fig. 7.6 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDP}_{\text{LIVA}}(1, k)$ en Intra-frame SIC-FSA.

La Fig. 7.6 ilustra los resultados de la energía promedio consumida por dispositivo. Como puede observarse, la energía consumida por los dispositivos es prácticamente constante con respecto al número máximo k de réplicas. Para entender este comportamiento resulta interesante evaluar el valor medio del número de réplicas que transmite un dispositivo en cada frame (Ki_{avg}), que se calcula según la expresión:

$$Ki_{avg} = \sum_{j=1}^{j=k} jP(ki = j) \tag{7.3}$$

La tabla 7.3 muestra el número medio de réplicas que un dispositivo transmite en cada frame, considerando una FDP irregular, según sea el número máximo k de réplicas.

Tabla 7.3 número medio de réplicas a transmitir por dispositivo en cada frame (Ki_{avg}) para Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular

	Ki_{avg}
$k = 4$	2,9772
$k = 5$	3,2235
$k = 6$	3,3271
$k = 8$	3,6

De acuerdo con estos resultados, para las FDP irregulares los dispositivos transmiten entre 3 y 4 réplicas, independientemente de la cantidad máxima de réplicas. Por tanto, la energía consumida por los dispositivos presenta poca variación respecto a k .

Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular de mejora el desempeño del protocolo D-FSA y reduce el delay y consumo energético por debajo de los valores mínimos obtenidos con SIC-FSA convencional (número de réplicas constante).

Utilizando el protocolo Intra-frame SIC-FSA con FDP irregular los valores mínimos de delay, energía consumida por el coordinador y energía consumida por dispositivo se alcanzan cuando $m=1.5n$ y se selecciona un número máximo de réplicas $k=4$.

Utilizando estos parámetros óptimos, el delay se reduce más del 55% con respecto a FSA, mientras que se alcanza un ahorro de energía del 57% en el coordinador y un 14% en cada dispositivo. Por otra parte, es posible mejorar el delay y energía del coordinador en 6%, y disminuir la energía consumida por dispositivo en 28%, cuando se compara con Intra-frame SIC-FSA con k constante ($m=2n$, $k=3$).

Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4 Mínimos de delay, energía promedio consumida por coordinador y dispositivo para Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular.

	Delay [s]	Energía Promedio consumida por el Coordinador [J]	Energía promedio consumida por dispositivo [J]
SIC-FSA con $ki \sim FDP_{LIVA}(1,4)$ y $m=1.5n$	0.0325	0.0039	0.1525

Además de reducir el consumo energético y delay dentro de la red, es posible disminuir la duración de los frames de transmisión, desde $m=2n$ (para el caso óptimo de SIC-FSA convencional, $m=2n$, $k=3$) a un nuevo número de slots $m=1.5n$ en Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular (con los parámetros óptimos $m=1.5n$, $k=4$). Reducir la cantidad de slots permite minimizar la longitud de los frames de transmisión. Esto puede tener un efecto positivo si se considera la

posibilidad de pérdida de sincronización en la red cuando los frames de transmisión tienen una duración muy larga.

En general, el éxito del uso de las FDP irregulares en conjunto con el proceso de cancelación de interferencias puede explicarse con un ejemplo muy sencillo. Suponiendo una red muy simple formada por un número de dispositivos $n=6$ que disponen de $m=1.5n$ slots por frame para realizar su transmisión, siendo capaces de transmitir un máximo de $k=4$ veces su paquete de datos. Se considerará el uso de SIC-FSA convencional y Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular. Asumiendo el peor de los casos, en el que todos los dispositivos eligen exactamente los mismos slots para transmitir sus paquetes, se tendría un total de 4 colisiones (en cada slot) para SIC-FSA convencional. Por otra parte, utilizando Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular, el máximo número de colisiones que podrían presentarse es nuevamente 4, *pero sólo en el caso de que todos los dispositivos elijan transmitir la misma cantidad de réplicas* (lo cual sucede con una probabilidad definida, y claramente menor que 1). En este sentido, la ventaja del uso de FDP irregulares radica en la posibilidad de reducir el número de colisiones en un frame, y el posterior procedimiento de cancelación de interferencias, que resolverá las colisiones que podrían ocurrir.

Además, las distribuciones propuestas por G. Liva permiten esperar un número medio de réplicas a transmitir prácticamente constante (entre 2 y 4), aun cuando existe la posibilidad de transmitir hasta un máximo de $k=8$ veces el paquete de datos. El hecho de que este valor promedio no difiera de los parámetros óptimos para SIC-FSA ($k \in [2,3]$ dependiendo del número de slots) garantiza la posibilidad de ubicarnos en el rango óptimo de aplicación del proceso de cancelación de interferencias.

7.1.2 Delay y consumo energético en redes M2M densas

Para determinar numéricamente la eficiencia de Intra-frame SIC-FSA con FDP irregular en redes densas, se evaluó el comportamiento del protocolo al aumentar el número de dispositivos en la red, considerando los parámetros óptimos de los protocolos:

- FSA ($m=n$).
- D-FSA ($m=2n$).
- Intra-frame SIC-FSA con k fijo ($m=2n$, $k=3$).
- Intra-frame SIC-FSA con k irregular ($m=1.5n$, $k=4$).

El delay, energía promedio consumida por coordinador y la energía promedio consumida por end-device se muestran en las Fig. 7.7, 7.8 y 7.9 respectivamente.

La tendencia para las variables bajo estudio es aumentar linealmente a medida que incrementa el número de dispositivos. Cuando el número de dispositivos es relativamente bajo ($n=100$ o menos) la ventaja de algún protocolo sobre otro es relativamente baja, un hecho que puede corroborarse con la revisión de las gráficas del apartado anterior. Sin embargo, a medida que el número de dispositivos aumenta, es posible apreciar las diferencias en las variables de estudio.

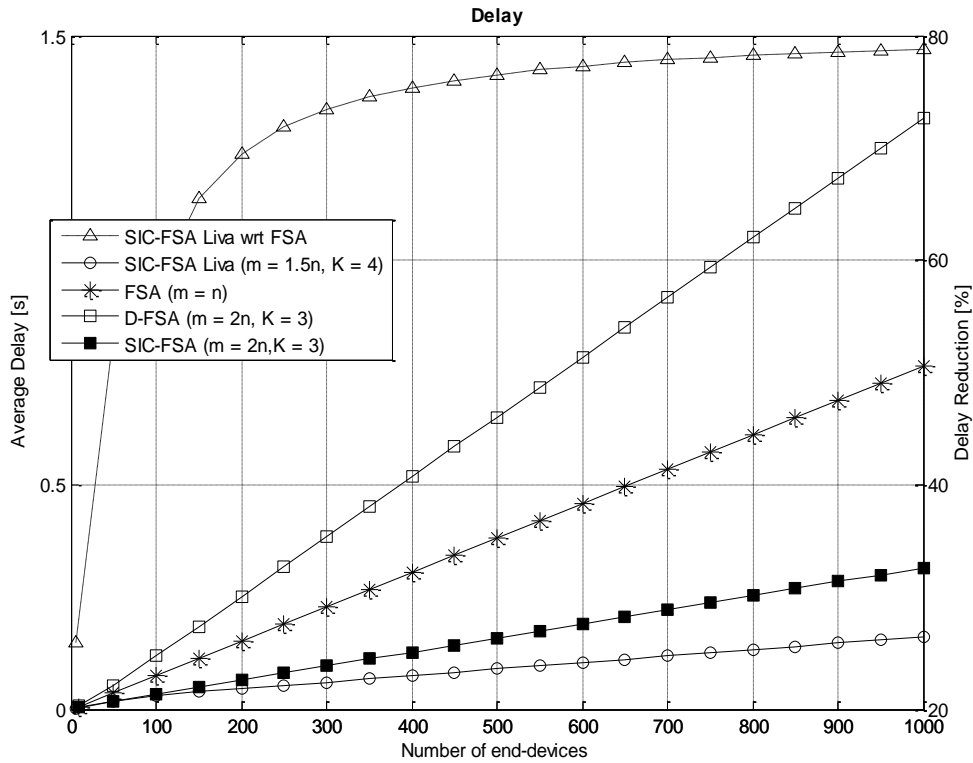


Fig 7.7. Delay promedio para finalizar un DCR en función del número de dispositivos (n)

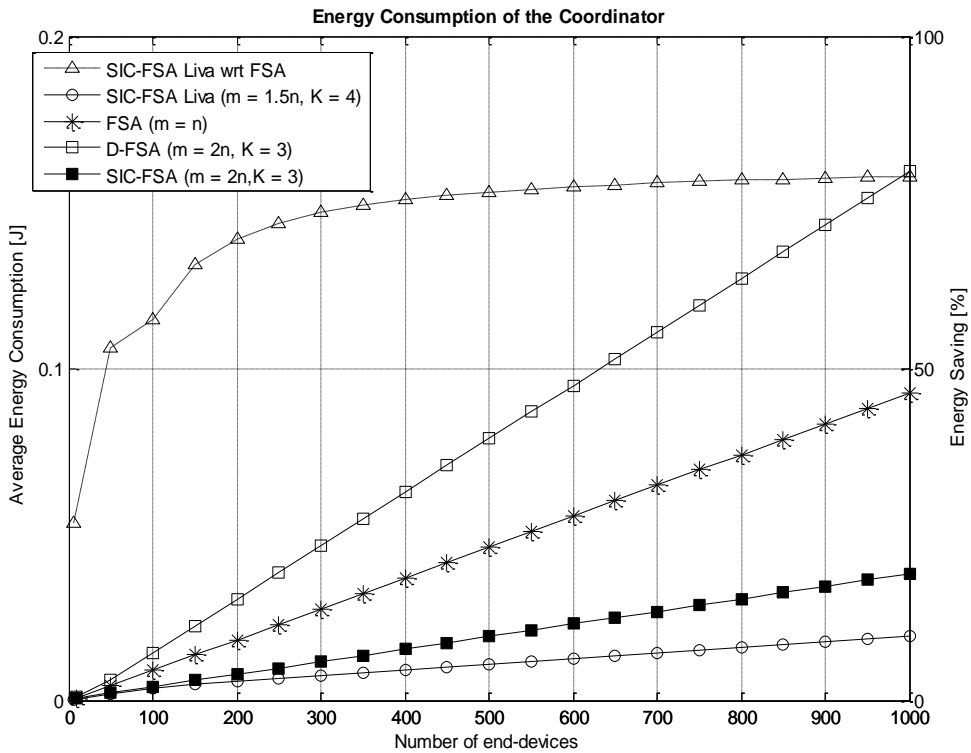


Fig. 7.8 Energía promedio consumida por el coordinador durante un round de transmisión en función del número de dispositivos (n)

Las Fig. 7.7 y 7.8 muestran el comportamiento del delay promedio y la energía promedio consumida por el coordinador, respectivamente. De nuevo, la tendencia de estas dos variables es similar, ya que son dependientes de los mismos parámetros. Se observa que el uso de protocolos que involucran el proceso de cancelación sucesiva de interferencias (SIC) permite reducir drásticamente el consumo energético y delay frente a FSA, e incluso en mayor proporción frente a D-FSA. La implementación de Intra-frame SIC-FSA con FDP irregular genera mejores resultados que la aplicación de SIC-FSA con k fijo, para todo número de dispositivos.

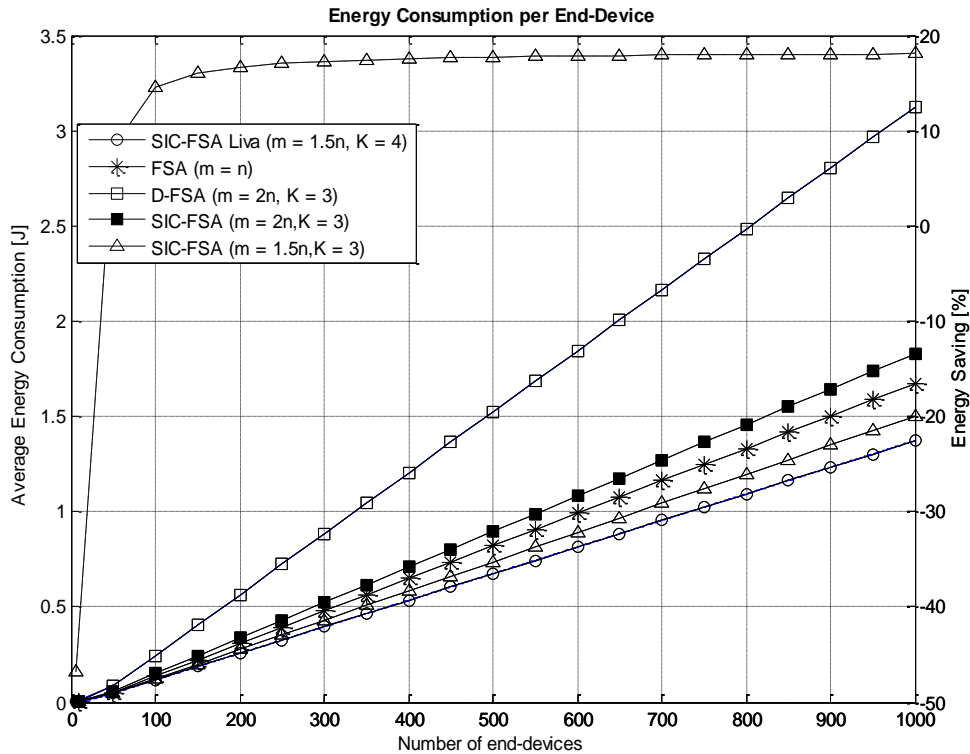


Fig. 7.9 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del número de dispositivos (n)

En relación a la energía promedio consumida por los dispositivos (Fig.7.9), nuevamente, el uso de Intra-frame SIC-FSA con FDP irregular genera mejoras frente a SIC-FSA con k fijo, D-FSA y FSA, aunque no en un rango tan amplio.

Con el fin de establecer una medida cuantitativa de las prestaciones del nuevo protocolo se definen los parámetros que permitirán estimar las eficiencias frente a FSA.

$$Delay\ Reduction = \frac{Delay\ SICFSA_{Irregular} - Delay\ FSA}{Delay\ FSA} \cdot 100\% \quad (7.4)$$

$$Coordinator\ Energy\ Saving = \frac{Coord.Energy\ SICFSA_{Irregular} - Coord.Energy\ FSA}{Coord.Energy\ FSA} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

$$DevicesEnergy Saving = \frac{Devices Energy SICFSA_{Irregular} - Devices Energy FSA}{Devices Energy FSA} \cdot 100\% \quad (7.6)$$

Las medidas de reducción de delay, ahorro de energía del coordinador y ahorro de energía por dispositivo se muestran en el eje vertical de la derecha de las Fig. 7.7, 7.8 y 7.9, respectivamente.

La reducción del Delay es cercana al 58% cuando se consideran redes M2M compuestas por 100 dispositivos, y continúa aumentando a medida que crece el número de dispositivos, hasta alcanzar su valor asintótico a partir de los 500 dispositivos. El ahorro es de 78.8% cuando el protocolo es implementado en redes con 1000 dispositivos.

Con respecto al ahorro energético por parte del coordinador, para un número de dispositivos reducido (por ejemplo $n=100$), se consigue reducir en un 57.3% la energía consumida por el coordinador. A medida que aumenta el número de dispositivos participantes del proceso de transmisión, este porcentaje incrementa hasta estabilizarse a partir de 500 dispositivos, logrando su valor máximo cuando la red incorpora 1000 dispositivos, con lo que se alcanza un 78.9% de reducción de energía frente a FSA.

Con respecto a la reducción de energía por parte de los dispositivos, la evolución con el aumento en la densidad de la red no es tan drástico. Se inicia logrando un 14.5% cuando la red está formada por 100 dispositivos y aumenta progresivamente hasta lograr un máximo de 18% de ahorro de energía cuando 1000 dispositivos interactúan en la red.

En general, el uso de las FDPs propuestas por G. Liva para la selección de la cantidad de réplicas a transmitir, en conjunto con las técnicas de cancelación de interferencias conocidas como Intra-frame SIC-FSA permiten mejorar algunos parámetros de interés en redes M2M densas, tales como el delay introducido por fallos en la transmisión y el consumo energético por parte de los dispositivos que envían la información y del coordinador encargado de procesarla.

Las mejoras introducidas frente al mejor protocolo desarrollado anteriormente son evidentes. Para SIC-FSA convencional, se logró reducir el delay y energía consumida por el coordinador en una proporción cercana al 60%, mientras que el ahorro en energía consumida por dispositivo se estimó en 10%. Mediante el uso de Intra-frame SIC-FSA con FDP Irregular, la reducción en el delay y energía del coordinador alcanza el 78%, mientras que se ha logrado la disminución de energía consumida por dispositivos hasta un 18%, con respecto a FSA.

Para obtener máximos beneficios, es recomendable utilizar la parametrización óptima obtenida en este estudio, esto es, una red que contenga un número superior a los 500 dispositivos, en los que cada uno de ellos debe elegir la cantidad de réplicas a transmitir, según la distribución de probabilidad propuesta por G. Liva, donde el número máximo de réplicas a transmitir será $k=4$. Todo esto, dentro de un frame de transmisión cuya longitud permita un total de slots igual a $m=1.5$ veces la cantidad de dispositivos en la red.

7.2 Inter-frame SIC-FSA

Para evaluar el desempeño del protocolo Inter-frame SIC-FSA el primer paso es obtener los valores óptimos de los parámetros del sistema:

1. Número de slots por frame de transmisión (m).
2. Número máximo de réplicas a transmitir (k).
3. Cantidad de frames involucrados en Inter-frame SIC (s).

Una vez optimizados estos parámetros, se evaluará el comportamiento del protocolo aplicado en redes densas.

Se estudiarán tres métodos para la selección de réplicas: el primero de ellos involucra un número de réplicas fijo para todos los dispositivos, mientras que en los dos restantes cada dispositivo es capaz de elegir el número de réplicas que desea transmitir en los frames en los que participa. Para estos dos últimos casos, la selección de la cantidad de réplicas k_i se realiza de acuerdo con una función de densidad de probabilidad definida.

7.2.1 Optimización del número de slots (m), máxima cantidad de réplicas a transmitir (k) y cantidad de frames almacenados en memoria (s)

7.2.1.1 K constante

Para esta implementación, todos los dispositivos transmiten un número fijo de réplicas, que se mantiene constante durante todos los frames de transmisión.

La Fig. 7.10 ilustra el número promedio de frames necesarios para finalizar un DCR en función del número de réplicas k que envían cada uno de los dispositivos, cuando $m=n$. Se muestran los resultados para el protocolo D-FSA e Inter-frame SIC-FSA, considerando el número de frames que pueden almacenarse en memoria.

Se observa que para todo valor menor o igual a $k=7$, Inter-frame SIC-FSA reduce el número de tramas necesarias para finalizar un DCR con respecto a FSA y D-FSA. El mínimo número de frames es igual a 2 y se consigue cuando $k \in [2,3]$ en Inter-frame SIC-FSA.

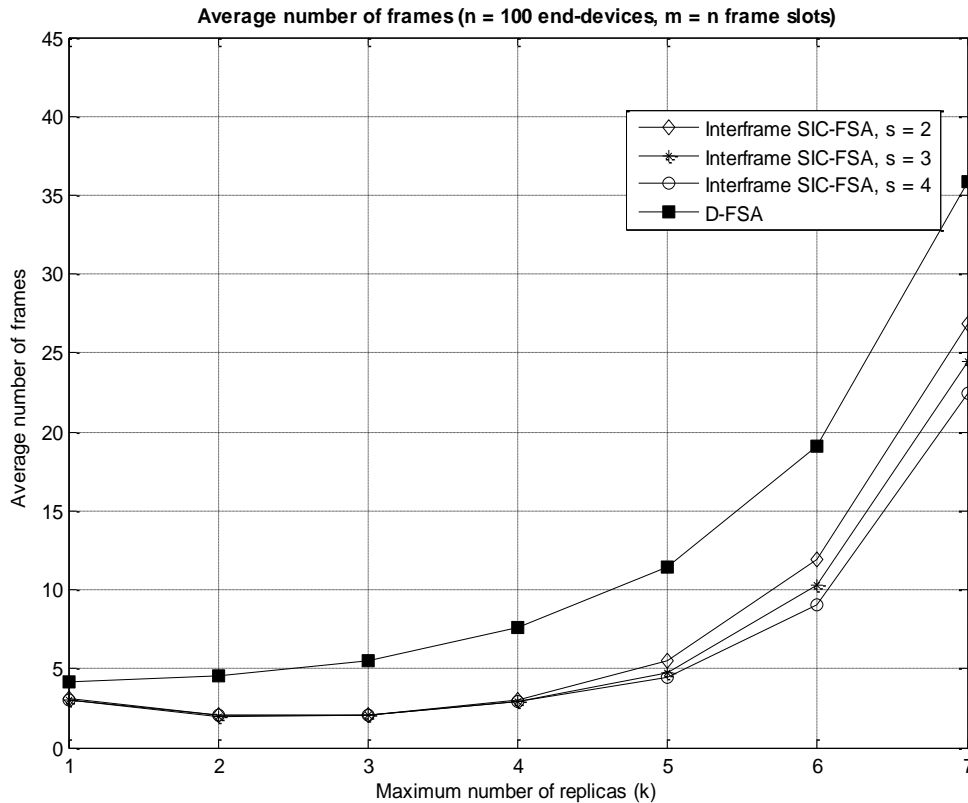


Fig. 7.10 Número de frames para finalizar un DCR en función de s , cuando k_i es una constante en Inter-frame SIC-FSA

El desempeño de Inter-frame SIC-FSA es indistinguible (en referencia al parámetro s) para cualquier valor de k inferior o igual a 4. Este comportamiento puede explicarse de manera muy sencilla. En este rango de valores de k , el número promedio de frames necesarios para culminar la transmisión oscila entre 2 y 3, por lo que cualquier Inter-frame SIC-FSA que garantice que se almacenan al menos 2 frames en memoria generará el mismo resultado (por ejemplo, almacenar 9 frames no tendrá ningún beneficio frente a almacenar 2 elementos si la transmisión finaliza en 2 frames).

Los beneficios de disponer de un rango más amplio de memoria para almacenar frames se aprecian cuando $k \geq 4$, donde el número de frames (para Inter-frame SIC-FSA) es superior a 4. En este caso, a medida que aumenta la capacidad en memoria, el proceso se puede finalizar en la menor cantidad de frames posible, por lo que Inter-frame SIC-FSA con $s=4$ genera el mejor resultado en estos casos.

Ahora, ¿cuál es el criterio para seleccionar el número óptimo de elementos almacenados en memoria? Basados en el conocimiento de nuestro modelo, se estableció que la energía promedio consumida por el coordinador, así como el delay, dependen directamente del número de frames en que se realiza el DCR; en este sentido, el objetivo es minimizar esta variable.

Con base en los resultados obtenidos en la Fig. 7.10, se utilizará un valor de s que nos brinde un rango de operación cómodo alrededor del número de frames mínimo. Si bien es cierto, esta investigación no realiza la valoración cuantitativa

del delay considerando las operaciones de lectura y escritura en memoria, la valoración cualitativa es necesaria para garantizar que los procesos que se proponen son viables. La evaluación de delay, y consumo energético se realizará utilizando $s=3$.

Las Fig. 7.11, 7.12 y 7.13 muestran el delay, energía promedio consumida por el Coordinador y la energía promedio consumida por dispositivo para los protocolos D-FSA e Inter-frame SIC-FSA, con respecto al número de réplicas k , y al número de slots m .

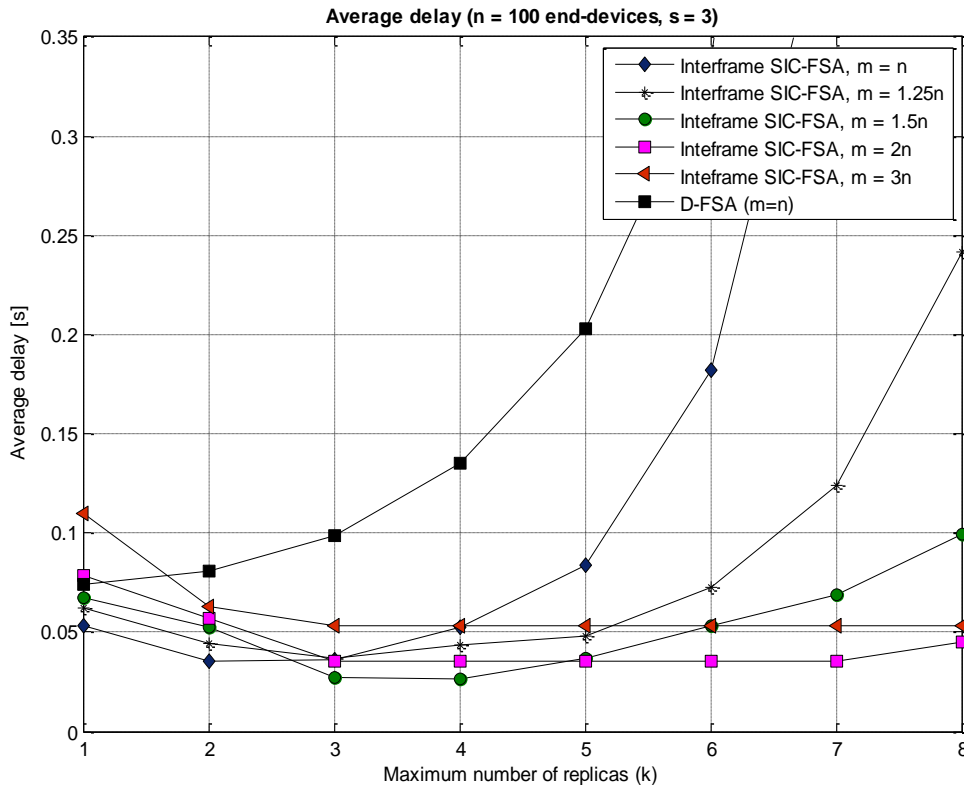


Fig.7.11 Delay promedio para finalizar un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando k_i es una constante en Inter-frame SIC-FSA

Con respecto al Delay, D-FSA alcanza su mínimo cuando se transmite únicamente una réplica (FSA), la transmisión de más réplicas en un proceso en el que no se realiza la cancelación de interferencias se traduce en mayor cantidad de colisiones que no son resueltas. Por esta razón, a medida que aumenta el valor de k , D-FSA crece exponencialmente.

Evaluando el delay en Inter-frame SIC-FSA, para todo valor de m existe un rango de operación en el cual cada serie minimiza el tiempo empleado en finalizar la transmisión. Al superar este rango de operación, el delay aumenta con el número de réplicas. Por debajo de este rango de operación el delay tiende a aumentar, sin embargo, no colapsa en FSA cuando $k=1$, debido a que en Intra-frame SIC-FSA es posible realizar el proceso de cancelación de interferencias aun cuando solo se envía un paquete de datos.

El valor mínimo de delay ocurre en Inter-frame SIC-FSA cuando $k \in [3,4]$ y $m=1.5n$. Para estos valores, se obtiene un 63% de reducción del delay con respecto a FSA.

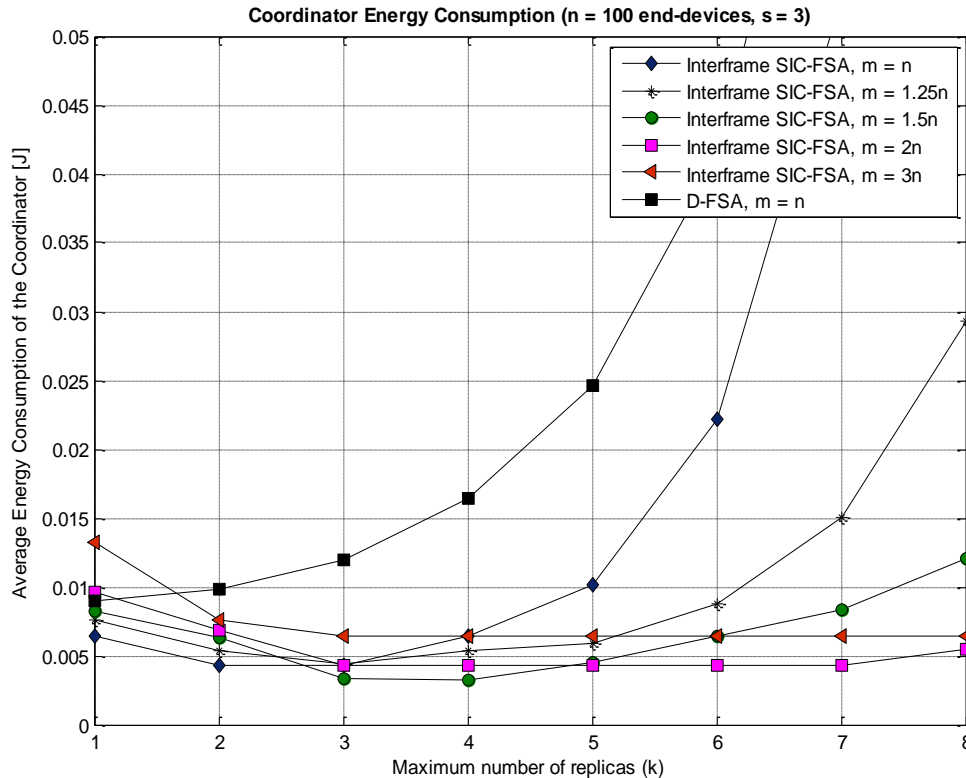


Fig. 7.12 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando k_i es constante en Inter-frame SIC-FSA

Con respecto a la energía promedio consumida por el coordinador, es válido análisis aplicado al delay. Nuevamente, el valor mínimo ocurre para Inter-frame SIC-FSA cuando $k \in [3,4]$ y $m=1.5n$ y representa un descenso del 63% en la energía consumida por dispositivo, con respecto a FSA.

La energía promedio consumida por dispositivo depende de la cantidad de frames en los que el dispositivo permanezca activo o inactivo, así como de la cantidad de réplicas k , o el número de slots m . La Fig. 7.13 nos muestra que tiende a aumentar con k , y a presentar un crecimiento más rápido a medida que el valor de m es menor.

La energía consumida por los dispositivos tiende a mantenerse constante desde $k=1$ hasta determinado valor de k , a partir del cual empieza a crecer de manera exponencial. El rango en el que la energía se mantiene constante es más amplio mientras mayor sea m . Naturalmente, si existe un número elevado de slots disponibles para transmitir, la cantidad de réplicas no es un factor muy importante, debido a la posibilidad de que existan menos colisiones. Sin embargo, un número de slots muy elevado genera delay y consumo energético excesivo.

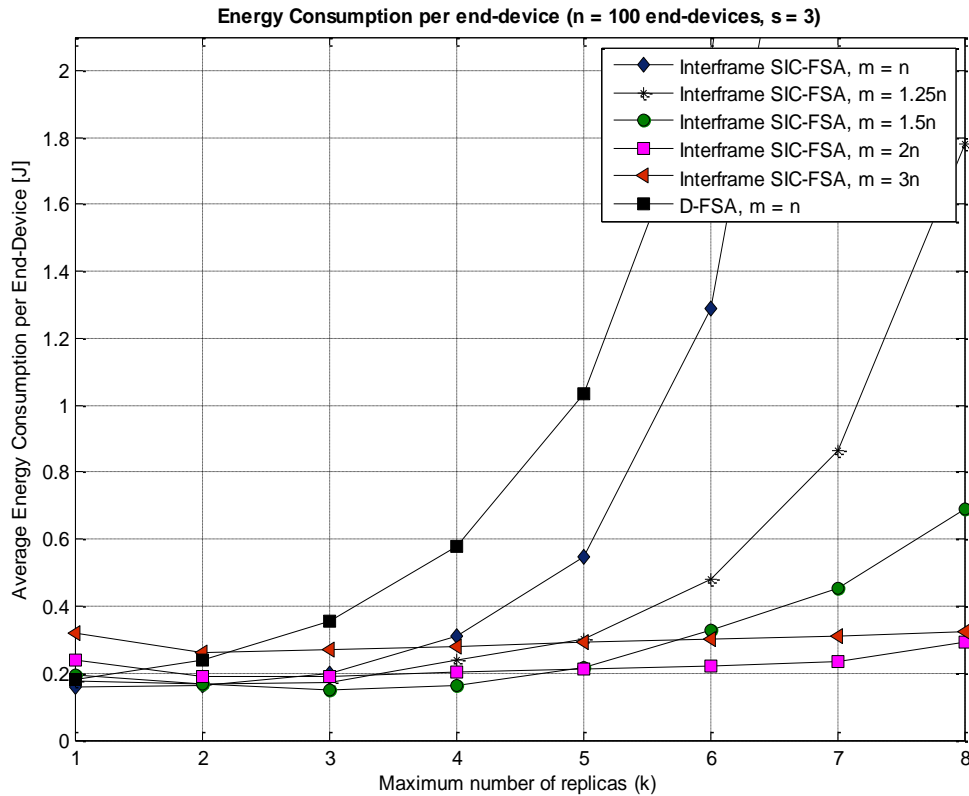


Fig. 7.13 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando k_i es constante en Inter-frame SIC-FSA.

Es posible apreciar que la transmisión de $k=2$ o $k=3$ réplicas no disminuye de manera considerable la energía del dispositivo con respecto a $k=1$. Esto se debe a que incluso con una única réplica es posible aplicar el proceso de cancelación de interferencias.

Utilizando un número fijo de réplicas, Inter-frame SIC-FSA es capaz de mejorar el desempeño de FSA cuando se utiliza en el rango óptimo, $k=3$ y $m=1.5n$. El ahorro de energía consumida por dispositivo alcanza el 16%.

7.2.1.2 FDP Uniforme

Utilizando la función de densidad de probabilidad uniforme, cada dispositivo i elige la cantidad de réplicas k_i , que desea transmitir en el frame de transmisión en el que compete.

$$K_i \sim Unif(1, k) \quad (6.1)$$

La Fig. 7.14 presenta el número promedio de frames necesarios para finalizar un DCR. En la gráfica se incluyen los resultados para D-FSA e Inter-frame SIC-FSA para k fijo y k elegido a través de la FDP uniforme.

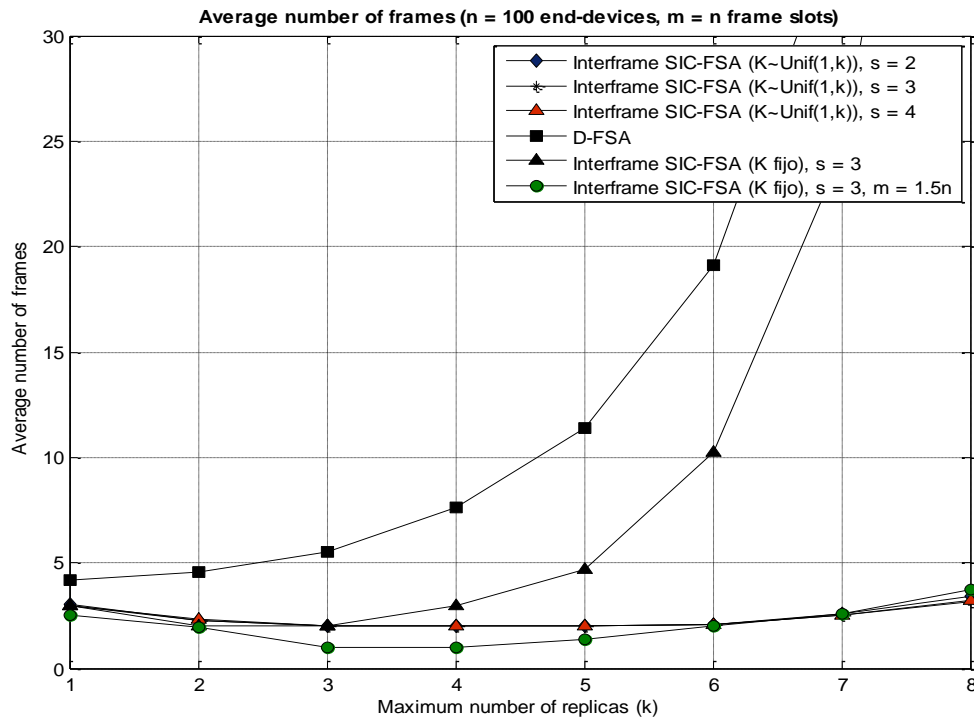


Fig. 7.14 Número de frames para finalizar un DCR en función de s , cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

Utilizando la FDP uniforme, el número de frames tiende a crecer a medida que el número máximo de réplicas k aumenta. Sin embargo, comparando con D-FSA e Inter-frame SIC-FSA con k fijo, su crecimiento es más lento. En la gráfica se observa que el número de frames es igual a 3 cuando $k=1$, disminuye a 2 (su valor mínimo para esta FDP) para $k \in [2,7]$ y empieza a aumentar exponencialmente cuando $k \geq 7$.

El efecto del parámetro s sobre el número de frames empieza a apreciarse a partir de $k=8$. Por debajo de este valor de k , cualquier s superior a 2 tendrá el mismo resultado sobre esta variable. Para garantizar que Inter-frame SIC-FSA se realiza de forma eficiente, se selecciona $s=3$ para simular el delay y consumo energético en la red.

El uso de la distribución uniforme no mejora el desempeño de Inter-frame SIC-FSA con k fijo, con respecto al número promedio de frames, sin embargo, es capaz de generar el mismo resultado en un rango más amplio de operación (con respecto a k).

A partir del análisis de la Fig. 7.14, es posible prever que el uso de la FDP uniforme en Inter-frame SIC-FSA no representará una mejora frente a Inter-frame SIC-FSA de k fijo en la disminución de delay y consumo energético en la red.

Las Fig. 7.15, 7.16 y 7.17 muestran el delay, energía promedio consumida por el coordinador y la energía promedio consumida por end-device, respectivamente. Para cada una de ellas, se evalúan las variables en función de m y k . Se incluyen los resultados de Inter-frame SIC-FSA con k uniforme, así como Inter-frame SIC-FSA con k fijo y $m=1.5n$, y D-FSA para $m=n$.

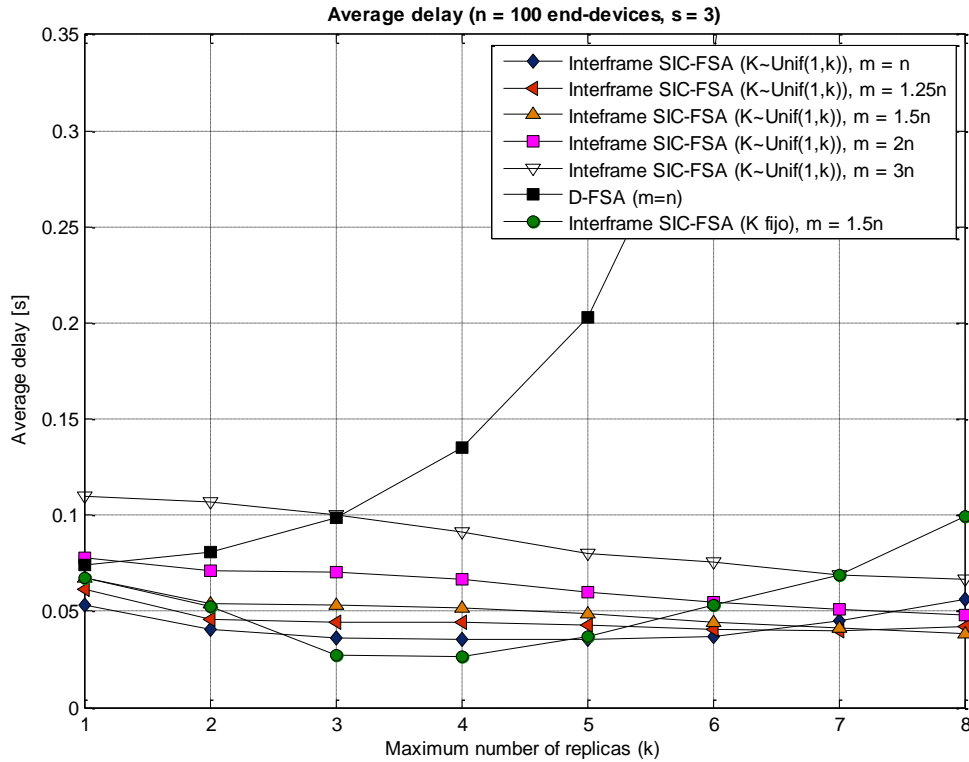


Fig. 7.15 Delay promedio para finalizar un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

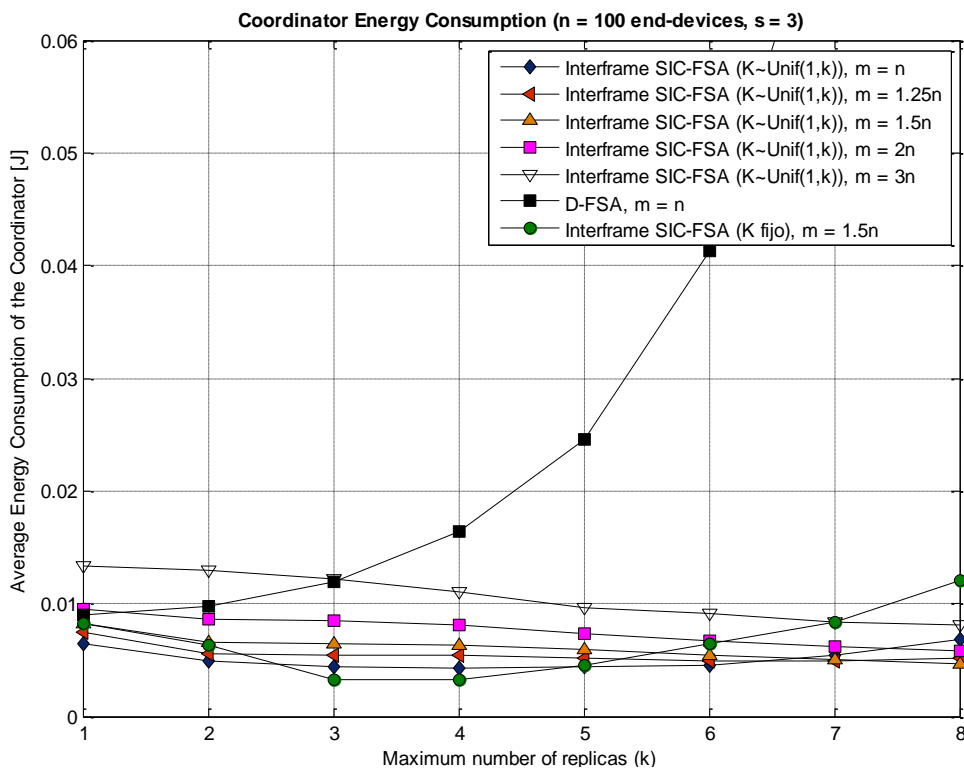


Fig. 7.16 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

Tal como podría haberse intuido a partir de los resultados obtenidos en la Fig. 7.14, el delay y la energía promedio consumida por el coordinador tienden a mantenerse constante a lo largo de k . Se espera que a partir de $k \geq 8$, ambos parámetros aumenten a medida que crece la cantidad de réplicas transmitidas.

Los mínimos para el delay y el consumo de energía del coordinador en Inter-frame SIC-FSA con k uniforme se obtienen cuando $m=n$ y $k \in [2,3]$. La mejora frente a FSA es del 51% para ambas variables, sin embargo Inter-frame SIC-FSA con k uniforme no mejora el desempeño de Inter-frame SIC-FSA con k fijo.

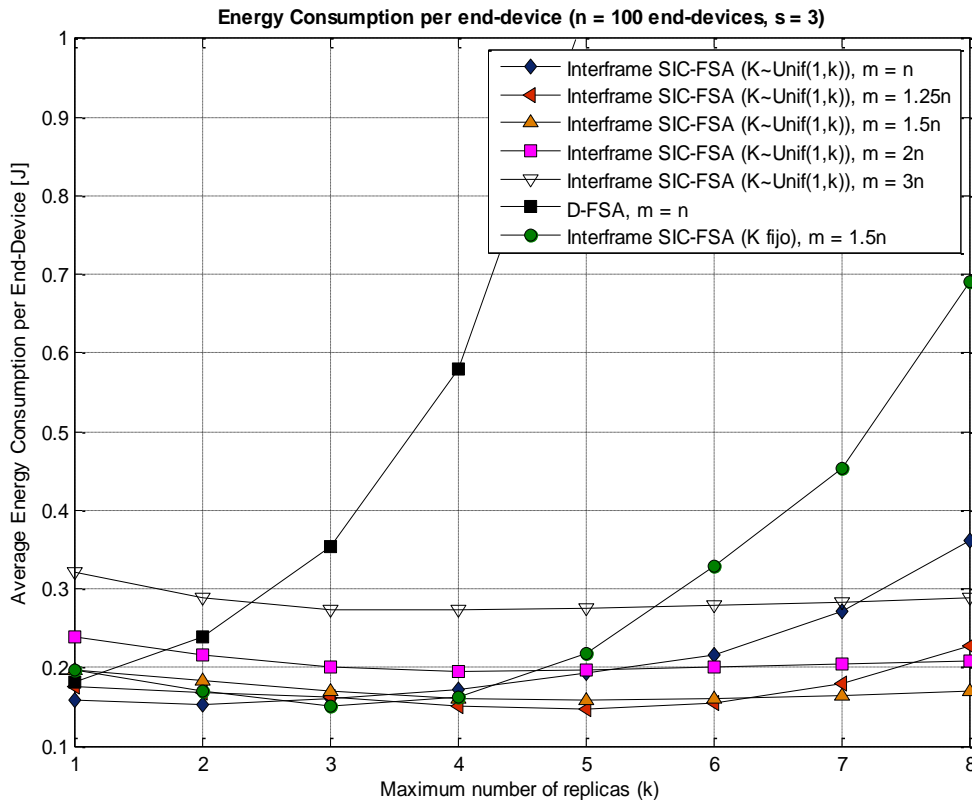


Fig. 7.17 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{Unif}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

El mínimo para la energía consumida por end-device en Inter-frame SIC-FSA con k uniforme se obtiene cuando $m=n$ y $k \in [2,3]$. Es posible reducir el consumo de energía de los dispositivos en 17% con respecto a FSA, sin embargo, el uso de una FDP uniforme no mejora el desempeño del protocolo Inter-frame con k fijo y sus parámetros óptimos ($m=1.5n$, $k=3$, $s=3$).

7.1.2.3 FDP Irregular.

Para este caso bajo estudio, cada dispositivo i elige un número de réplicas k_i según las funciones de densidad de probabilidad propuestas por G. Liva. El número máximo de réplicas viene representado por el grado del polinomio,

mientras que la probabilidad de elegir k_i réplicas se determina según el coeficiente de los términos del polinomio.

$$FDP_{LIVA} = \begin{cases} 0.5102x^2 + 0.48982x^4 & \text{para } k = 4 \\ 0.5631x^2 + 0.0436x^3 + 0.3933x^5 & \text{para } k = 5 \\ 0.5465x^2 + 0.1623x^3 + 0.2912x^6 & \text{para } k = 6 \\ 0.5x^2 + 0.28x^3 + 0.22x^8 & \text{para } k = 8 \end{cases} \quad (6.2)$$

La Fig. 7.18 ilustra el número promedio de frames que se necesitan para finalizar un round de transmisión. Se muestran los resultados en función del número de réplicas k , y se consideran diferentes valores para s . La gráfica evalúa el comportamiento del protocolo Inter-frame SIC-FSA con k irregular, así como D-FSA, e Inter-frame SIC-FSA con k fijo (hasta los momentos, la implementación que ofrece mejores prestaciones).

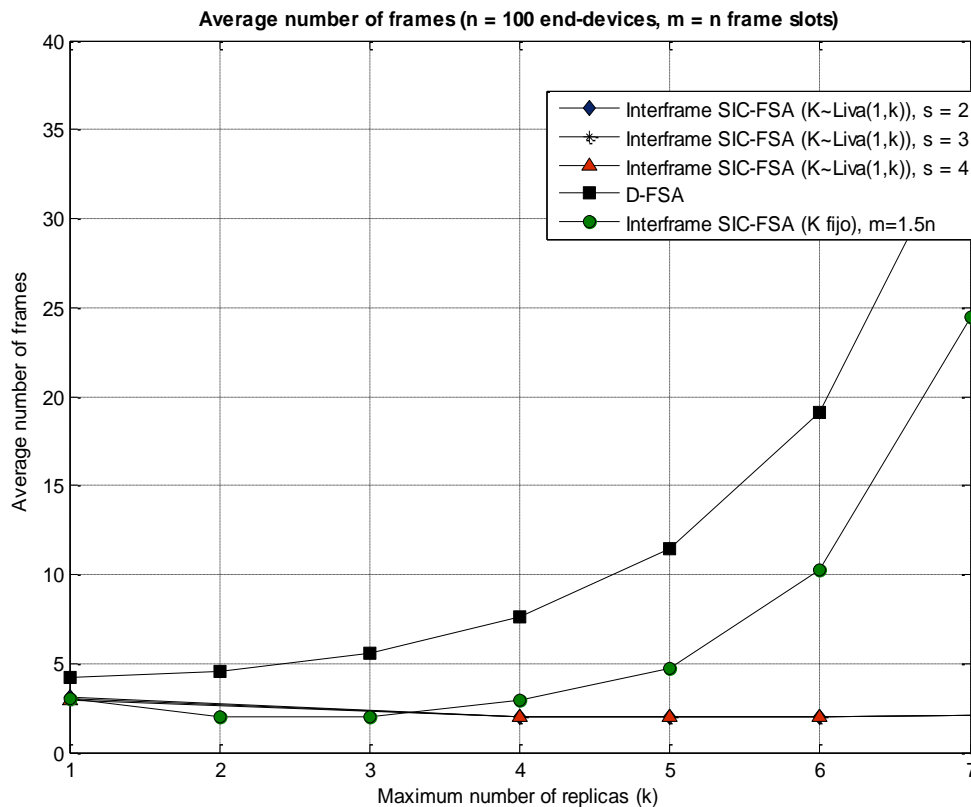


Fig. 7.18 Número de frames para finalizar un DCR en función de s , cuando $k_i \sim FDP_{LIVA}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

El número de frames necesarios para resolver la transmisión es igual a 2, y este valor se mantiene constante desde $k=1$ hasta $k=7$ para cualquiera de los valores de s bajo estudio. Este comportamiento puede explicarse a través del cálculo de la esperanza para cada una de las FDPs propuestas por Liva. Los valores esperados se muestran en la Tabla 7.3.

Para las funciones descritas por Liva, los valores esperados para el número de réplicas seleccionado por los dispositivos oscilan entre $\bar{k}_i=2$ y $\bar{k}_i=4$. Para cualquiera de estos valores, Inter-frame SIC-FSA es capaz de resolver los procesos de transmisión en 2 frames de contención (según los resultados obtenidos para Inter-frame SIC-FSA con k fijo, donde $k \in [2,4]$). Por esta razón, cualquier $s \geq 2$ genera el mismo resultado.

Las Fig. 7.19 y 7.20 presentan el delay y energía promedio consumida por el coordinador en un DCR. Se incluyen los resultados para D-FSA e Inter-frame SIC-FSA para k fijo y k elegido a través de FDP irregular.

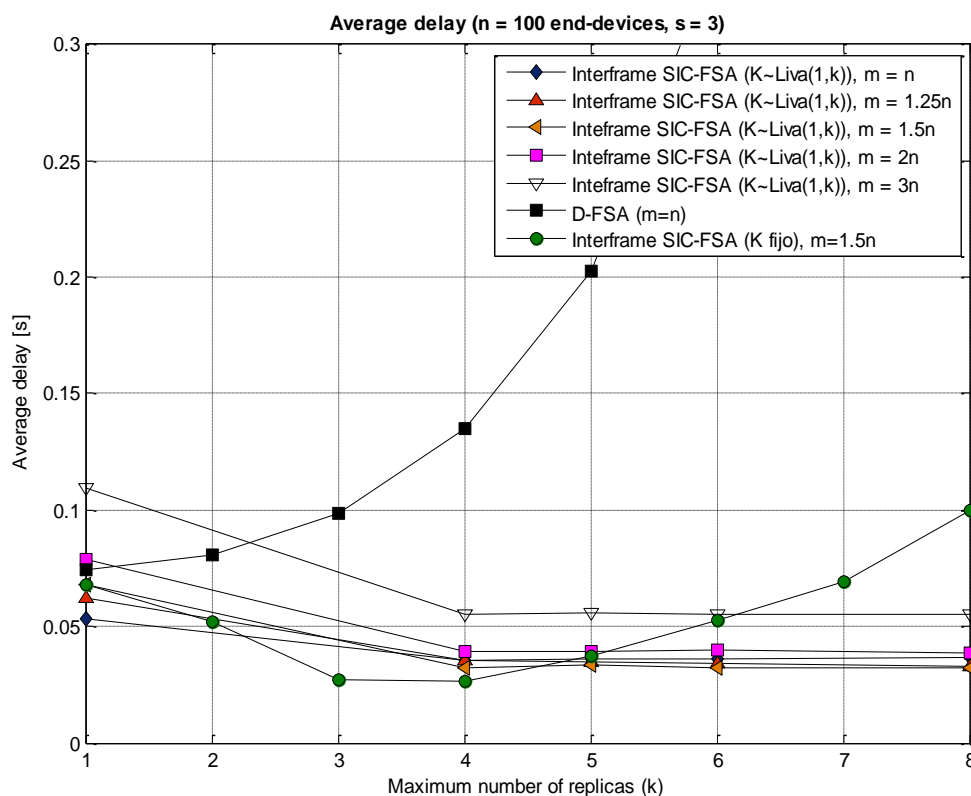


Fig. 7.19 Delay promedio para finalizar un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDPLIVA}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

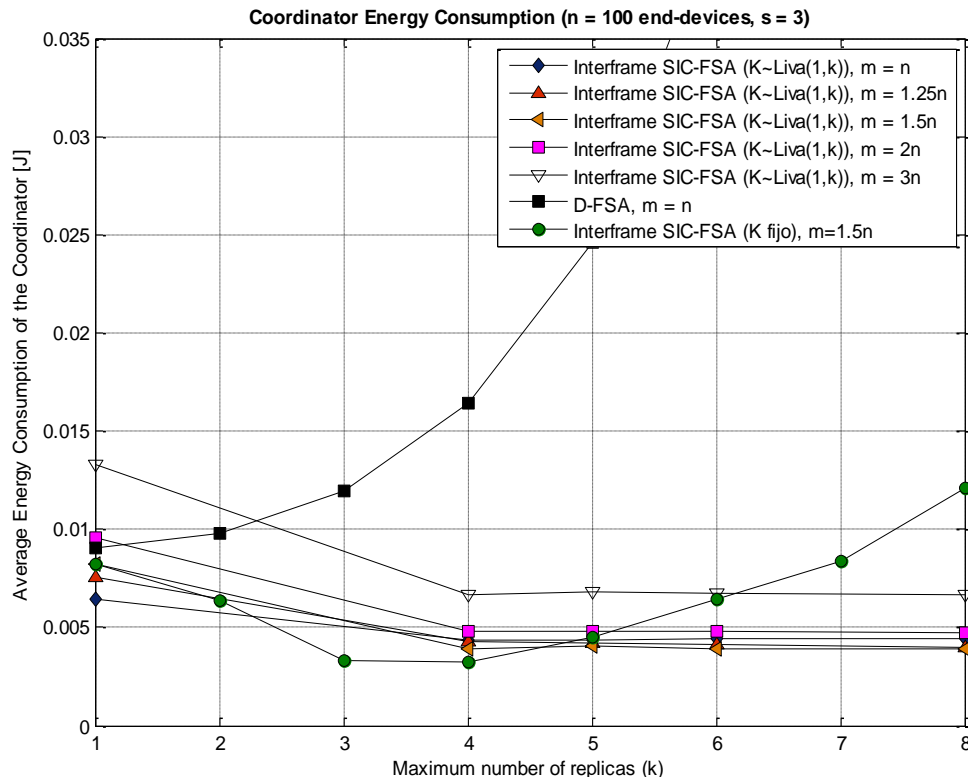


Fig. 7.20 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDP}_{\text{LIVA}}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

Para las distribuciones propuestas por G. Liva, el delay promedio, mostrado en la Fig. 7.19 permanece constante, para todo $k \geq 4$. En la Fig. 7.20 se verifica que el consumo de energía por parte del coordinador presenta el mismo comportamiento. Para ambas variables, el mejor resultado ofrecido por las distribuciones de Liva ocurre para $m=1.5n$ y $k \in [2, 4]$. Haciendo uso de estos valores, es posible reducir los resultados obtenidos en FSA, la reducción de delay y energía del coordinador alcanza el 55%, sin embargo, no mejora el desempeño de Inter-frame SIC-FSA con k fijo.

La energía promedio consumida por dispositivo se muestra en la Fig. 7.21. Se evalúan los protocolos D-FSA e Inter-frame SIC-FSA para k fijo y k elegido a través de FDP irregular.

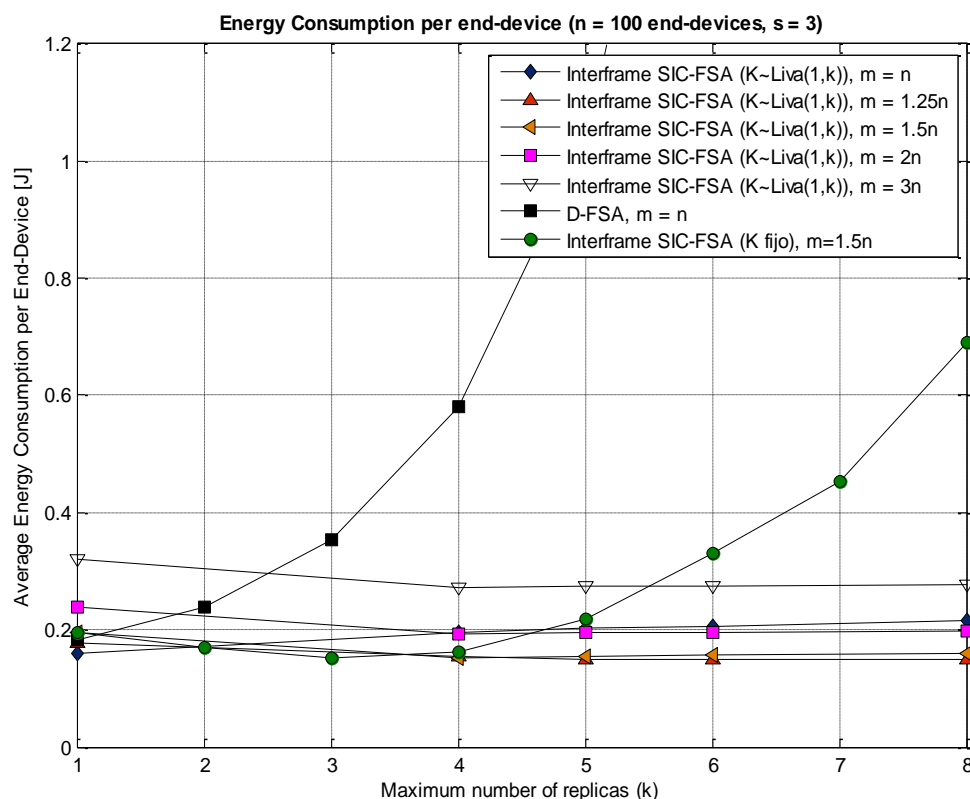


Fig. 7.21 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k) cuando $k_i \sim \text{FDP}_{\text{LIVA}}(1, k)$ en Inter-frame SIC-FSA

Con respecto a la Fig. 7.21, el uso de las FDPs irregulares iguala el mínimo valor obtenido por Inter-frame SIC-FSA para k fijo, obteniendo un 16% de reducción en la energía de los dispositivos.

Mediante las distribuciones de Liva, tomando $m=1.5n$ es posible obtener el valor mínimo de energía consumida por los dispositivos para cualquier k empleada en las distribuciones irregulares.

7.2.2 Delay y desempeño energético en redes M2M densas.

Para evaluar el desempeño de los protocolos desarrollados en redes con una gran cantidad de dispositivos, se seleccionaron los valores óptimos de m , k , y s en FSA, D-FSA y las implementaciones de Inter-frame SIC-FSA que permiten mejorar el desempeño de los protocolos anteriores.

Se evaluó el desempeño de los métodos propuestos, utilizando los parámetros m , k y s óptimos establecidos en el apartado anterior, en este sentido:

- FSA ($m=n$).
- Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n$, $k=3$ y $s=3$).
- Inter-frame SIC-FSA con k uniforme ($m=n$, $k=3$ y $s=3$).
- Inter-frame SIC-FSA con k irregular ($m=1.5n$, $k=4$ y $s=3$).

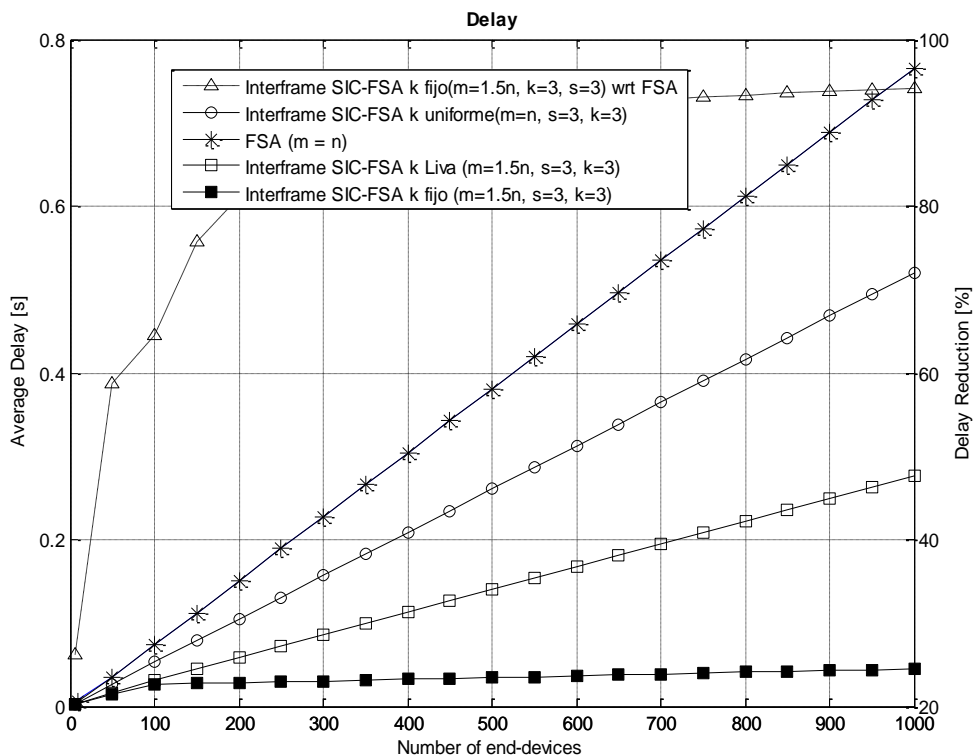


Fig.7.22 Delay promedio para finalizar un DCR en función del número de dispositivos (n) en Inter-frame SIC-FSA

La Fig. 7.22 ilustra el delay promedio en función del número de dispositivos en la red. El delay aumenta de manera lineal a medida que se incluye mayor número de dispositivos en el proceso de transmisión, esto ocurre para todos los protocolos evaluados. Sin embargo, se confirma que todo protocolo que involucra el proceso de cancelación de interferencias inter-frame muestra un mejor desempeño frente a FSA.

En especial, cuando se evalúa el desempeño de Inter-frame SIC-FSA con k fijo, se observa que el incremento del número de dispositivos n genera muy poca variación en el delay, por lo que este protocolo se muestra como el más adecuado.

Cuando el número de dispositivos es relativamente bajo, por ejemplo $n=100$, las diferencias con respecto al desempeño de los protocolos son pequeñas, sin embargo, los resultados se mantienen coherentes con respecto al análisis realizado en la sección anterior, el uso de k fijo ofrece las mejores prestaciones frente a k irregular, k uniforme, y especialmente con respecto a FSA. En una red pequeña como la planteada, la reducción del delay en Inter-frame SIC-FSA con k fijo alcanza casi el 65% frente a FSA.

Sin embargo, cuando aumenta la cantidad de dispositivos en la red por encima de $n=500$, es posible reducir hasta en un 94% el delay generado por FSA haciendo uso de Inter-frame SIC-FSA con k fijo parametrizado de manera óptima.

La situación con respecto a la energía consumida por el coordinador (Fig. 7.23) es muy similar a la anterior. Para todos los protocolos evaluados, la energía

aumenta linealmente conforme la red se hace más densa. A partir de $n=100$ dispositivos empieza a diferenciarse el efecto de la cancelación de interferencias sobre el protocolo FSA, donde el uso de k fijo genera mejores resultados entre todos los protocolos evaluados.

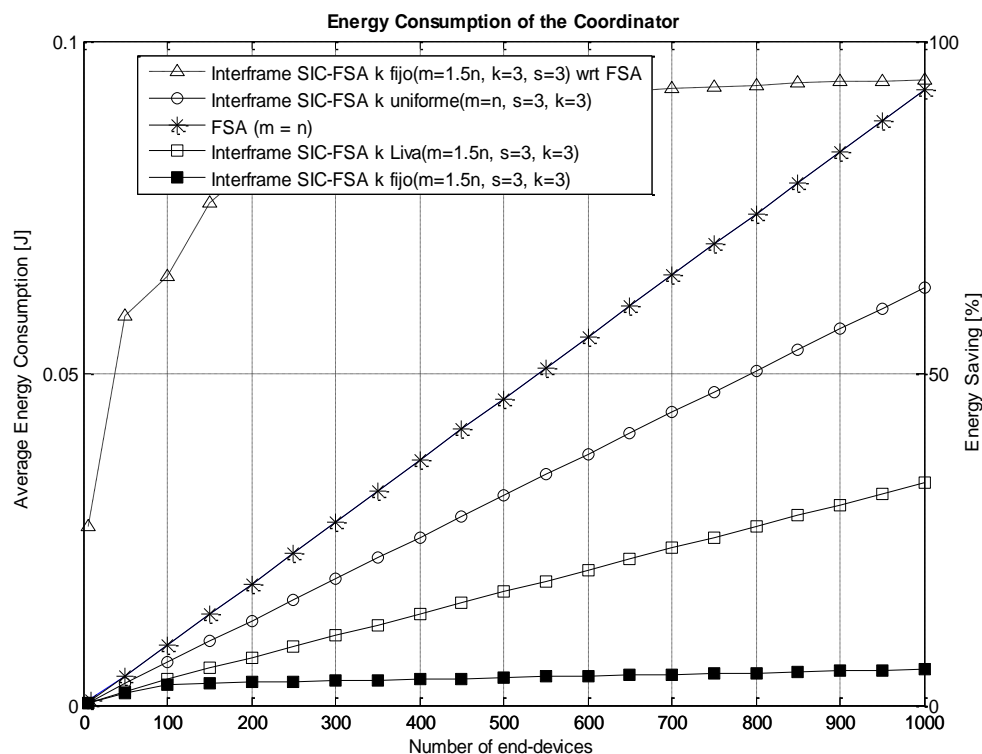


Fig. 7.23 Energía promedio consumida por el coordinador durante un round de transmisión en función del número de dispositivos (n) en Inter-frame SIC-FSA

Para redes pequeñas (aproximadamente $n=100$ dispositivos) Inter-frame SIC-FSA con k fijo alcanza un 65% en la reducción de la energía del coordinador frente a FSA. Este porcentaje aumenta con el número de dispositivos, hasta estabilizarse alrededor de 90% a partir de $n=500$. Al igual que en el delay, la reducción más importante alcanza el 94% cuando se consideran $n=1000$ dispositivos.

Finalmente, la Fig. 7.24 ilustra el consumo de energía por parte de los dispositivos en función del número de dispositivos en la red.

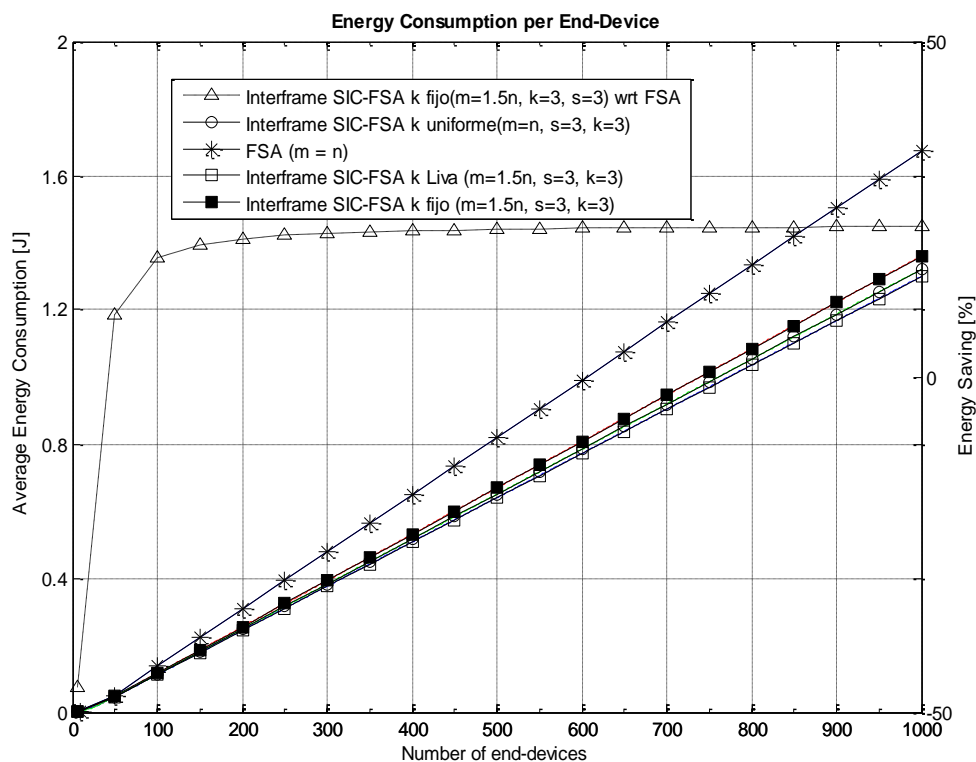


Fig. 7.24 Energía promedio consumida por el coordinador durante un round de transmisión en función del número de dispositivos (n) en Inter-frame SIC-FSA

Considerando $n=100$ dispositivos, es muy difícil establecer la superioridad de un protocolo frente a otro. Como se analizó en el apartado anterior, las mejoras en cuanto a la energía consumida por dispositivo no son evidentes para todos los protocolos bajo estudio.

Sin embargo, con el crecimiento de la red, los beneficios derivados de la cancelación de interferencias son más claros. El procedimiento de cancelación de interferencias Inter-frame garantiza menor consumo energético por dispositivo frente a FSA, para cualquiera de los protocolos propuestos (k fijo, uniforme o irregular).

Es posible establecer que el mejor desempeño en cuanto a reducción del consumo energético por end-device está garantizado por Inter-frame SIC-FSA con k fijo. El ahorro de energía otorgado por este protocolo alcanza el 22% con respecto al consumo en FSA.

7.3 Comparación entre Intra-frame e Inter-frame SIC-FSA

Una vez evaluados los protocolos Intra-frame e Inter-frame SIC-FSA y planteados los parámetros y criterios de selección de réplicas que los optimizan es posible comparar el rendimiento de ambos protocolos entre sí.

Las Fig. 7.25, 7.26 y 7.27 muestran el delay, consumo energético del coordinador y los dispositivos para los protocolos:

- FSA ($m=n$).
- Intra-frame SIC-FSA con k seleccionada a través de FDP irregular ($m=1.5n$)
- Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n, s=3$).

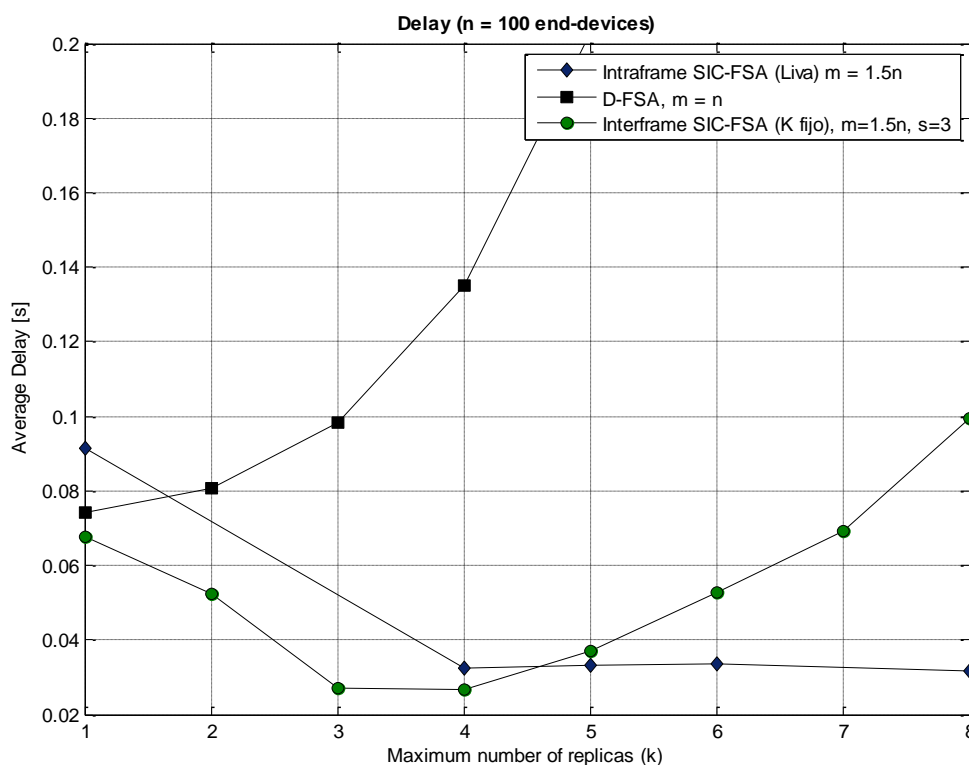


Fig. 7.25 Delay promedio durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k).

Con respecto al delay promedio, Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n, k=3$) logra un 16% de reducción con respecto al mejor resultado de Intra-frame SIC-FSA con k irregular ($m=1.5n, k=4$).

La energía promedio consumida por el coordinador (Fig. 7.26) es mínima en el protocolo Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n, k=3$), reduciendo el consumo de energía de Intra-frame SIC-FSA óptimo en 16%.

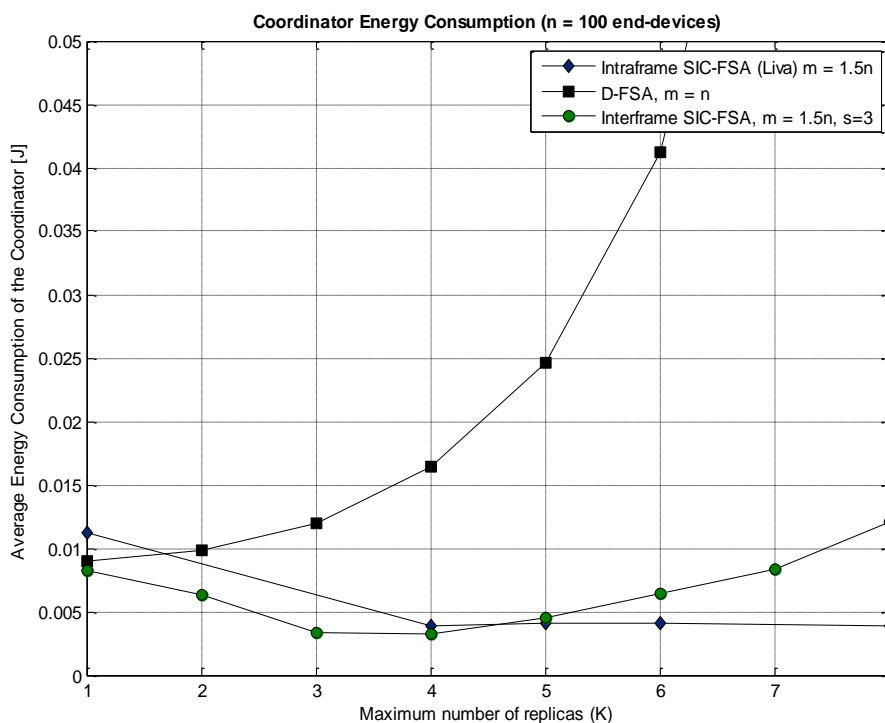


Fig. 7.26 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del máximo número de réplicas (k).

Finalmente, Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n$, $k=3$) disminuye la energía promedio consumida por los dispositivos (ilustrada en la Fig. 7.27) en un 5% con respecto a Intra-frame SIC-FSA con k irregular ($m=1.5n$, $k=4$).

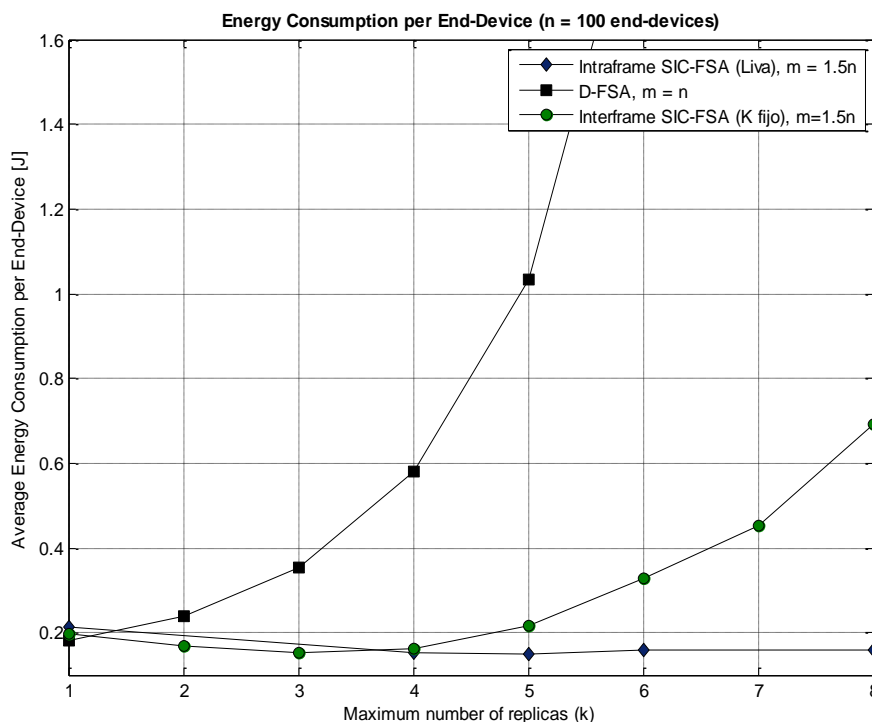


Fig. 7.27 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del número de dispositivos (n).

Los resultados de las Fig. 7.25, 7.26, y 7.27 muestran cuán superior resulta el protocolo Inter-frame SIC-FSA sobre Intra-frame SIC-FSA aun cuando ambos son capaces de reducir el delay y consumo energético con respecto a FSA.

Para evaluar las prestaciones de Inter-frame SIC-FSA sobre Intra-frame SIC-FSA cuando el número de dispositivos aumenta, las Fig. 7.28, 7.29 y 7.30 ilustran el delay, la energía consumida por coordinador y dispositivos, respectivamente. Adicionalmente, se calcula el porcentaje de ahorro energético y reducción de delay que genera Inter-frame SIC-FSA con respecto a Intra-frame SIC-FSA.

Cuando se trata de redes muy densas, Inter-frame SIC-FSA optimizado ($m=1.5n$, $k=3$ fijo) logra mejorar el desempeño de Intra-frame SIC-FSA ($m=1.5n$, $k=4$ irregular) en todas las variables estudiadas. La reducción del delay alcanza el 72%, al igual que la energía promedio consumida por el coordinador.

La Fig. 7.30 Con respecto a la energía consumida por los dispositivos, la reducción alcanza el 7% con respecto a Intra-frame SIC-FSA ($m=1.5n$, $k=4$ irregular).

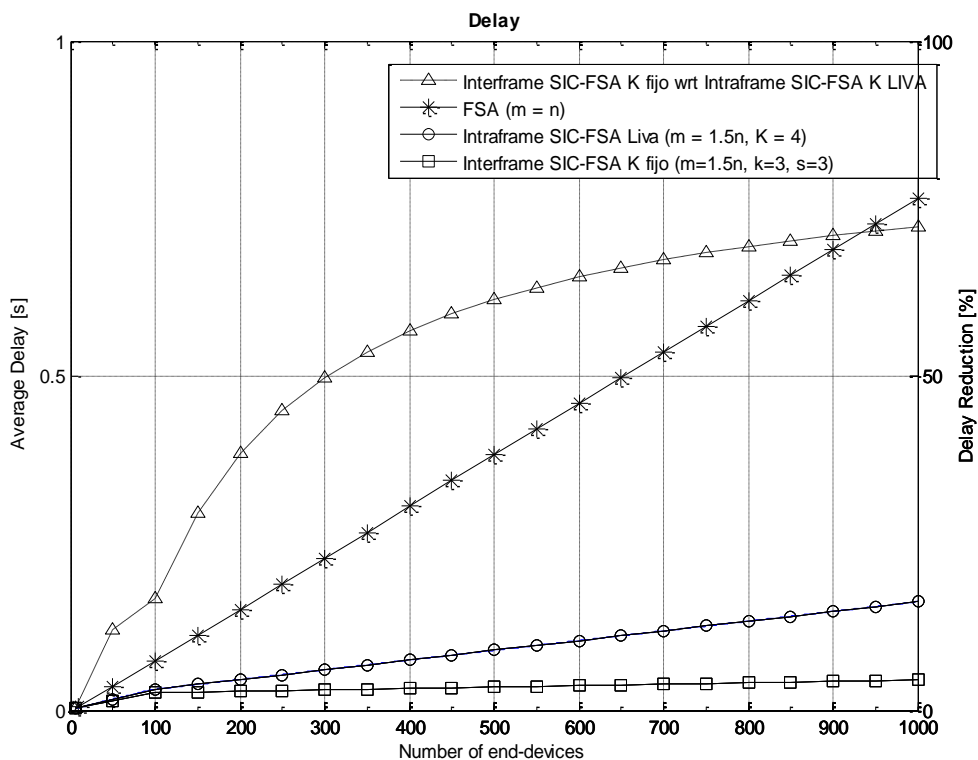


Fig. 7.28 Delay promedio durante un DCR en función del número de dispositivos (n).

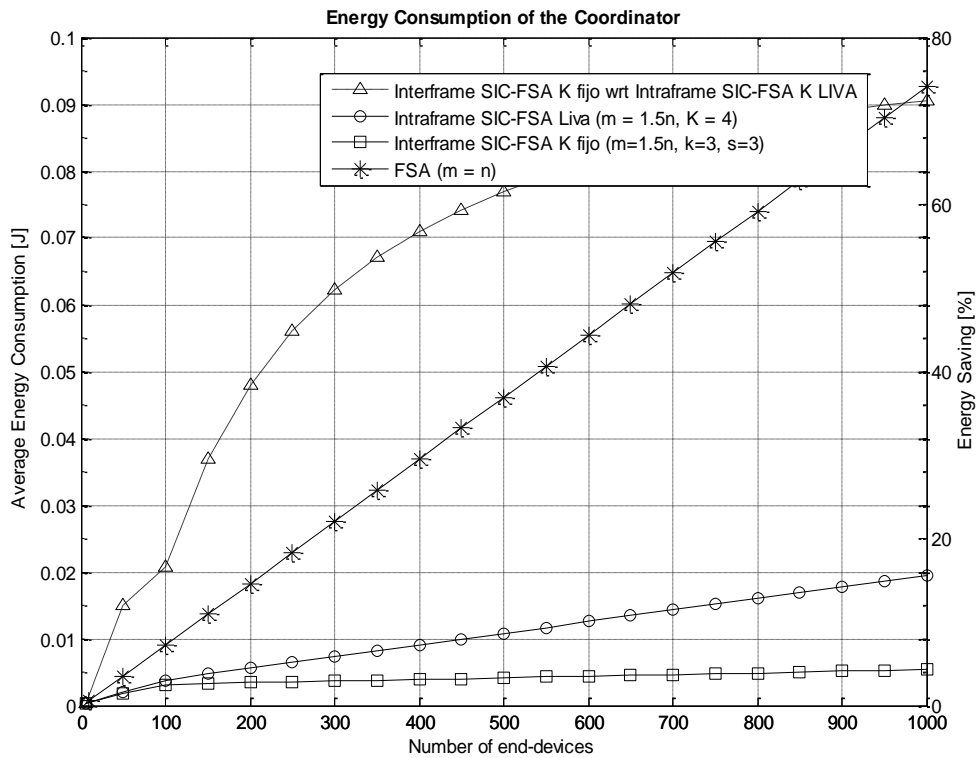


Fig. 7.29 Energía promedio consumida por el coordinador durante un DCR en función del número de dispositivos (n).

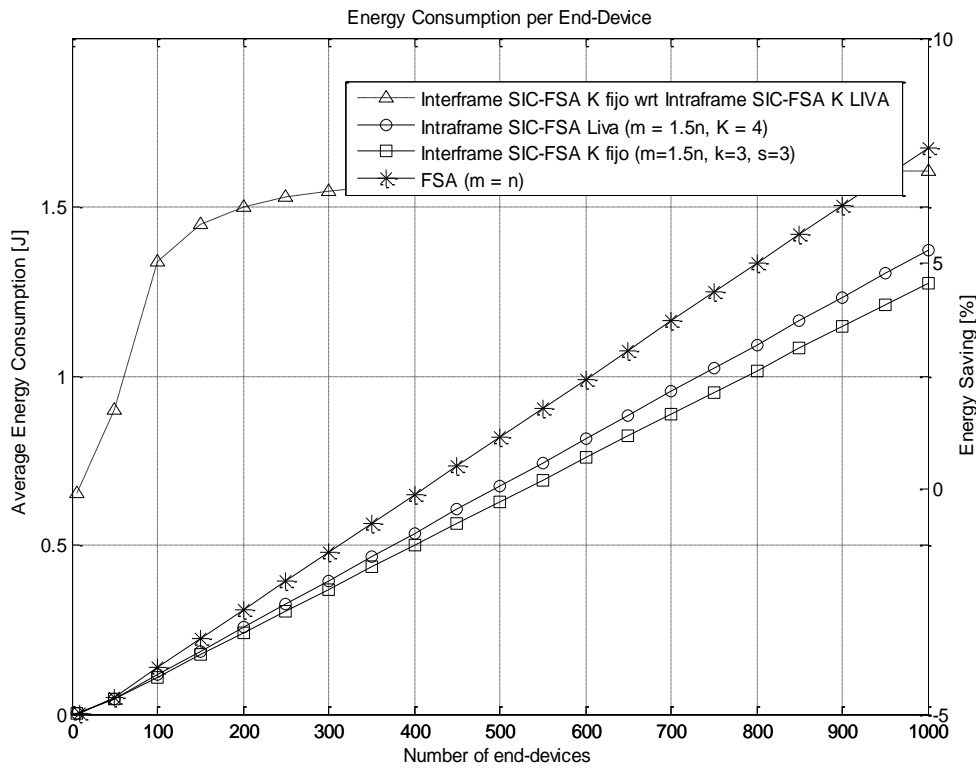


Fig. 7.30 Energía promedio consumida por dispositivo durante un DCR en función del número de dispositivos (n).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

La eficiencia en el consumo energético y la reducción del retardo en las redes M2M dependen de la gestión de acceso al medio de comunicación en la capa MAC. El objetivo de este trabajo ha sido minimizar el delay y consumo energético en redes M2M capilares mediante el uso de procedimientos de cancelación de interferencias en protocolos de acceso al medio.

En este trabajo se han evaluado dos técnicas de cancelación sucesiva de interferencias (SIC) sobre protocolos de acceso al medio basados en Frame Slotted-ALOHA (FSA): Intra-frame e Inter-frame SIC.

En Intra-frame SIC, se utiliza la información de un paquete de datos decodificado en un slot exitoso para resolver las colisiones en otros slots en los que las réplicas de este paquete estaban involucradas.

Por otra parte, en Inter-frame SIC-FSA se emplea la técnica anterior hasta que no es posible decodificar más información; es entonces cuando el coordinador utiliza los paquetes decodificados para resolver las colisiones en los frames previos al actual. Para llevar a cabo esta operación, se debe proveer al coordinador o gateway de un sistema de memoria, donde se almacenen todos los datos necesarios a las transmisiones fallidas que sucedieron anteriormente.

Mientras que en trabajos previos se estudiaron las técnicas de cancelación de interferencias considerando la transmisión de un número fijo de réplicas de los paquetes de datos, en este trabajo se ha propuesto un nuevo modelo de diversidad en el protocolo FSA, en el que cada dispositivo puede elegir aleatoriamente la cantidad de réplicas a enviar en cada frame siguiendo una función de densidad de probabilidad. Se han evaluado 3 criterios de selección del número de réplicas k_i : mantener fijo el valor de k_i , selección aleatoria con función de densidad de probabilidad uniforme, y selección aleatoria con distribuciones irregulares.

En relación a los parámetros del sistema, los resultados muestran que existe un valor óptimo para el número máximo de réplicas a transmitir k , y el número de slots m que es capaz de minimizar el consumo energético y delay en la red. Ambos parámetros deben ser optimizados en función del número de dispositivos n , y según la distribución empleada en la selección de k (k constante, de distribución uniforme o de distribución irregular). En el caso de Inter-frame SIC-FSA además de k y m es necesario optimizar el valor de s . Este parámetro representa la cantidad de frames involucrados en el proceso de cancelación de interferencias y debe ser optimizado en función de k y m .

Con respecto a Intra-frame SIC-FSA, el uso de las distribuciones irregulares en la selección de réplicas logró ser el criterio más efectivo para minimizar el consumo energético y el delay promedio con respecto a FSA. Los valores óptimos se obtuvieron para $m=1.5n$ y $k=4$. La reducción en el delay y consumo energético se hizo más evidente con el aumento de la densidad de la red, llegando a superar el 75% en la reducción de delay y energía consumida por el coordinador, y alcanzando hasta un 18% de ahorro energético por dispositivo, frente a FSA.

En Inter-frame SIC-FSA, recurrir a los elementos almacenados en memoria permite disminuir considerablemente el número de frames necesarios para completar una transmisión, con respecto a FSA.

Para Inter-frame SIC-FSA el mejor resultado fue obtenido a través de la transmisión de un número fijo de réplicas, cuando $m=1.5n$, $k=3$ y $s=3$. En este caso, la reducción en el delay y energía promedio del coordinador alcanzó un 94%, mientras que se logró una disminución de 24% en la energía consumida por cada uno de los dispositivos, con respecto a FSA.

La evaluación del rendimiento entre ambos protocolos demostró que Inter-frame SIC-FSA con k fijo ($m=1.5n$, $k=3$, $s=3$) genera mejores resultados frente a Intra-frame SIC-FSA con k irregular ($m=1.5n$, $k=4$).

Haciendo uso de los parámetros óptimos, Inter-frame SIC-FSA es capaz de reducir el delay y la energía consumida por el coordinador en 72% con respecto a Intra-frame SIC-FSA, mientras que la energía consumida por dispositivo disminuye un 7%.

CAPÍTULO 9. FUTUROS CAMPOS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo da continuación a una línea de investigación encargada del estudio de los procesos de cancelación de interferencias en FSA. En este sentido, se espera que sirva como base para la representación de modelos reales, en los que puedan considerarse todas las variables físicas involucradas en los procesos de recolección de datos en redes M2M.

Durante la realización de este proyecto, algunas condiciones fueron asumidas como ideales. A continuación se plantean una serie de líneas que pueden ser objeto de investigación:

- Evaluación de los protocolos desarrollados considerando condiciones no ideales en el canal (errores de transmisión).
- Estudio del efecto captura y su influencia sobre los protocolos Intra-frame e Inter-frame SIC-FSA.
- Evaluación del protocolo Inter-frame SIC-FSA a través de modelos matemáticos que comprendan el tiempo de acceso, lectura y escritura en memoria, así como el consumo energético requerido por estas operaciones.

CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mundo Contact, «MundoContact,» 17 febrero 2014. [En línea]. Available: <http://mundocontact.com/habra-250-millones-de-conexiones-m2m-en-2014/>.
- [2] F. Vázquez-Gallego y M. Rietti, «Performance Evaluation of Frame Slotted-ALOHA with Successive Interference Cancellation in Machine-to-Machine Networks,» Barcelona, 2014.
- [3] F. Ricciato y P. Castiglione, «Pseudo-random ALOHA for Enhanced Collision-recovery in RFID,» Lecce, 2012.
- [4] G. Liva, «Graph-Based Analysis and Optimization of Contention Resolution Diversity Slotted-ALOHA,» 2011.
- [5] C. Min , W. Jiafu y L. Fang, «Machine-to-Machine communications: Architectures, Standars and Applications,» 2012.
- [6] K. Dyer, «Insight Report,» *Mobile Europe*, nº 216, pp. 14-29, 2011.
- [7] M. D. Molina González, «Departamento de Ingeniería de Telecomunicaciones. Universidad de Jaén,» 2011. [En línea]. Available: <http://www4.ujaen.es/~mdmolina/rrcc/Tema3MAC.pdf>. [Último acceso: 26 julio 2014].
- [8] R. Montañana, «Universidad de Valencia. Redes de Computadores,» [En línea]. Available: http://www.uv.es/~montanan/redes/cap_04.pdf. [Último acceso: 30 julio 2014].
- [9] Lay Networks, [En línea]. Available: <http://www.laynetworks.com/Pure%20Aloha%20Protocol.htm>. [Último acceso: 30 julio 2014].