

Queue-Aware Optimal Frequency Selection for Energy Minimization in Wireless Networks

Jie Chen and Biplab Sikdar, *Senior Member, IEEE*

Abstract— Reducing the energy consumption of wireless networks is one of the fundamental objectives of green networks. While the use of dynamic frequency scaling has been proposed for reducing the energy consumption, they increase the packet delays and loss rates in the network. This paper addresses the problem of optimally selecting the clock frequency for wireless network interface cards with dynamic frequency scaling, so that the energy consumption is minimized while meeting the packet level performance requirements. The proposed framework is based on modeling the interface card as a *MAP/G/I/K* with threshold based service. The proposed frequency selection mechanism has been verified through simulations.

Keywords— green communications, MAC protocols, queuing models.

I. INTRODUCCION

REDES de comunicación verdes que se han diseñado con el objetivo de reducir el consumo de energía y el impacto ambiental de las tecnologías de información y comunicación (TIC) están ganando popularidad. El interés en este tipo de sistemas se deriva del deseo de reducir la huella de carbono de los servicios TIC, así como de las consideraciones financieras debido a los ahorros en el costo de la energía. Entre las distintas posibilidades para reducir el consumo de energía, el desarrollo de protocolos de eficiencia energética en varias capas ha sido la vía más común de investigación. Sin embargo, estos protocolos se ejecutan en hardware de red tradicionales que son generalmente agnóstica de la carga y cuyo consumo de energía no es en carga. Así, estos dispositivos consumen cerca de la calificación máxima energía incluso cuando la carga es baja [1]-[2].

Para proporcionar el uso de energía de carga proporcional, el uso de hardware equipado con tensión dinámica y escalado de frecuencia (DVFS) se ha propuesto en la literatura [3]-[4]. DVFS técnicas reducen el consumo de energía mediante la reducción de la tensión de alimentación y/o la frecuencia de reloj a los circuitos. Sin embargo, la reducción en el consumo de energía está acompañado por un aumento en los tiempos de procesamiento de paquetes, lo que conduce a mayores longitudes de cola y los retrasos de paquetes, y la posibilidad de pérdida de paquetes. Así, hay una relación directa entre el ahorro de energía y la probabilidad de inestabilidad cola y la selección de la frecuencia de reloj juega un papel crítico en la consecución de la compensación entre el consumo de energía y

los retrasos de paquetes. En este trabajo se aborda el problema de la selección de la frecuencia óptima de escalado de frecuencia dinámica de sistemas (DFS) para redes inalámbricas que minimiza el consumo de energía al tiempo que garantiza el cumplimiento de las restricciones sobre la demora nivel de paquete y las tasas de pérdida.

Para abordar el problema de la selección de la frecuencia óptima a un dispositivo inalámbrico, este trabajo se desarrolla un mecanismo de selección de frecuencia basado en umbral en el que la selección se basa en observaciones de longitud de la cola del dispositivo. Para diseñar el mecanismo de selección de frecuencia, primero desarrollamos un modelo analítico para cuantificar la relación entre el ahorro de energía y la dinámica de las colas en los dispositivos. Modelamos cada nodo inalámbrico como *MAP/G/I/K* cola donde la distribución del tiempo de servicio depende de la longitud de la cola instantánea cuando un paquete se inicia el servicio. Se utiliza entonces Este marco de modelado para evaluar el equilibrio entre el ahorro de energía y de retardo nivel de paquetes y la pérdida de rendimiento con el fin de establecer los umbrales óptimos en la longitud de la cola para la selección de frecuencia. El mecanismo de selección de frecuencia propuesta ha sido evaluado y validado mediante simulaciones realizadas en la plataforma de simulación NS-2.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección II se describe el modelo de sistema asumida en este trabajo. Sección III presenta el modelo de gestión de colas propuesto para cuantificar los retrasos de paquetes y las pérdidas asociadas con cualquier estrategia de selección de frecuencia basados en umbral. Sección IV presenta la metodología para determinar los umbrales óptimos de frecuencia. Sección V presenta los resultados de la simulación para evaluar el marco propuesto. Finalmente, la sección VI concluye el documento.

II. MODELO DEL SISTEMA

El objetivo de este trabajo es en las redes de área local inalámbricas generales. El acceso a las redes inalámbricas en cualquier nodo es por lo general mediante el uso de una tarjeta de interfaz de red, los bloques de construcción fundamentales de los que se muestran en la Figura 1. Estos bloques de construcción son comunes para el control de acceso al medio más popular (MAC) protocolos tales como IEEE 802.11 o IEEE 802.15 familia de protocolos. En consecuencia, el modelo del sistema no asume ninguna protocolo particular de control de acceso al medio (MAC). Como se muestra en la Figura 1, una tarjeta de interfaz de red inalámbrica genérico típicamente consta de los siguientes bloques funcionales:

Jie Chen, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, chenj24@rpi.edu

Biplab Sikdar, National University of Singapore, Singapore, bsikdar@nus.edu.sg

bloques para frecuencia de radio (RF) transmitir y recibir operaciones, que implementan los bloques (PHY) capas MAC y físicas para la red inalámbrica, transmitir (TX) y recepción (RX) tampones que son controlados por un administrador de búfer, unidades opcionales para la gestión y Seguridad del protocolo Internet (IPSec), y una unidad de control. Por último, la tarjeta de red se conecta al nodo de acogida, ya sea a través de un bloque de comunicación (por ejemplo, interconexión de componentes periféricos (PCI)) o, en el caso de un punto de acceso inalámbrico, PHY y MAC capas para la interfaz de red cableada (Ethernet, por ejemplo).

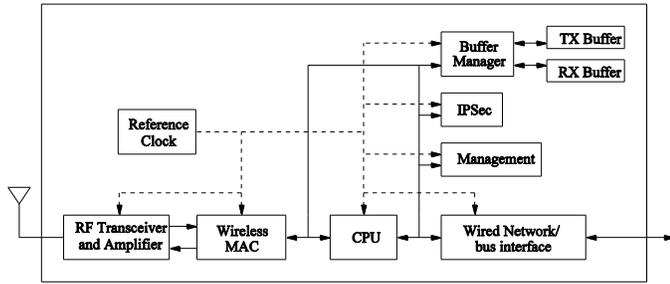


Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de una interfaz de red inalámbrica.

En contraste con los sistemas tradicionales, donde la tensión de alimentación y frecuencias de reloj de los bloques funcionales se mantienen constantes en todo momento, los sistemas con DVFS varían las tasas de tensión y de reloj de algunos o todos los bloques funcionales con el fin de ahorrar energía. Los ahorros de energía con DVFS proviene del hecho de que el consumo de energía de los dispositivos electrónicos depende de tres factores: la tensión de funcionamiento y la frecuencia, y la capacitancia efectiva del dispositivo. El consumo de energía de un dispositivo puede escribirse como [5]:

$$P = \alpha C_{eff} V^2 f \quad (1)$$

donde α es el factor de conmutación, C_{eff} es la capacidad efectiva, V indica la tensión de funcionamiento y f es la frecuencia de funcionamiento. Dado que el consumo de energía está relacionada tanto con la tensión y la frecuencia de reloj, o bien se pueden variar para lograr ahorros de energía. Sin embargo, la aplicación práctica de la escala de tensión es un reto y se asocia con una sobrecarga considerable [3]. Las principales razones detrás de esto son que la escala de voltaje es comparativamente más lento debido al tiempo de respuesta del bucle de control de voltaje y también sufre de las limitaciones de los convertidores DC-DC existentes (por ejemplo, cargar cambio actual después de transiciones de modo que conducen a la tensión de salida cae). En consecuencia, este documento se centra en el uso de DFS. En este trabajo, como en [5], suponemos además que

$$V^2 \propto f. \quad (2)$$

Por lo tanto,

$$P \propto f^2. \quad (3)$$

III. QUEUEING MODELO DE RELACIONES DE INTERCAMBIO DE ENERGÍA RENDIMIENTO

Un aspecto fundamental del uso de DFS es que el ahorro de energía viene con un costo en el rendimiento. Como se reduce la frecuencia de reloj, la velocidad a la que se procesan los paquetes también se reduce, aumentando los retrasos de paquetes y las tasas de pérdida. En consecuencia, la selección de la frecuencia de operación debe hacerse de manera que el ahorro de energía se equilibran con los otros aspectos del rendimiento del sistema. Para facilitar el desarrollo de los mecanismos de selección de frecuencia que maximizan el ahorro de energía, mientras que el cumplimiento de los requisitos de desempeño a nivel de paquetes, esta sección presenta un modelo de gestión de colas que se refiere a la selección de frecuencias de DFS para el rendimiento a nivel de sistema.

La función principal de una tarjeta de interfaz de red inalámbrica es para transmitir y recibir paquetes de datos. La interconexión entre la tarjeta de interfaz y el ordenador principal (o el enlace Ethernet en caso de un punto de acceso) no suele ser un cuello de botella y los paquetes recibidos son enviados a la computadora host inmediatamente. Sin embargo los paquetes salientes son los que pueden encolar en la tarjeta de interfaz debido a factores tales como la contención del canal. En consecuencia, este documento se centra en el retraso y la pérdida de las características de la cola de paquetes de transmisión en la tarjeta de interfaz.

Mecanismos DFS como los propuestos en [4], [6] se basan en la selección de la frecuencia de funcionamiento mediante la observación de los niveles de colas en los nodos. En este trabajo se asume un enfoque similar y considera el siguiente proceso de selección de frecuencia generalizada. Deje que el tamaño máximo del búfer de la cola de transmisión en un nodo se denota por B . También, considere un mecanismo DFS implementado en la tarjeta de interfaz de red que proporciona un conjunto de frecuencias de funcionamiento N , F , con $|F| = N$, para elegir.

Deje que las frecuencias pueden organizar en orden creciente, f_1, f_2, \dots, f_N , con $f_1 < f_2 < \dots < f_N$, y dejar P_i denota el la tasa de consumo de energía de la tarjeta de interfaz de red cuando la frecuencia f_i , $1 \leq i \leq N$, se seleccionan. De la (3), entonces tiene $P_1 < P_2 < \dots < P_N$. Para seleccionar la frecuencia de operación, se utiliza una política basada umbral. El buffer de transmisión de tamaño B está demarcada en N regiones utilizando los valores umbral L_1, L_2, \dots, L_{N-1} . Además, definimos $L_0 = 1$ y $L_N = B$. Luego, se elige operativo frecuencia f_i , $1 \leq i \leq N$, si la longitud actual de la cola de los TX búfer Q satisface $L_{i-1} \leq Q \leq L_i$, por $1 \leq i \leq N-1$, y la frecuencia f_N se elige si $Q > L_{N-1}$.

El rendimiento de nivel de paquete de la tarjeta de interfaz de red, así como el ahorro de energía dependen de la elección de los umbrales, $L_i, 1 \leq i \leq N-1$. Para caracterizar esta relación, se desarrolla un modelo de gestión de colas para cada nodo. El modelo de cola utiliza un proceso de servicio que depende de la longitud de la cola de la memoria tampón TX cuando se inicia el servicio. Para dar cabida a una amplia gama de proceso de llegada, como voz, datos, vídeo, así como el tráfico dependiente de largo alcance, modelamos el proceso de llegada a cada nodo como un proceso de llegada Markovian generalizada (MAP) [7]-[8]. Consideramos un proceso de Markov de tiempo continuo $m+1$ estado donde los estados $1, \dots, m$ son transitorios y el estado $m+1$ está absorbiendo. En el estado de $i, 1 \leq i \leq m$, el tiempo de estancia está distribuida de manera exponencial con el parámetro λ_i . La probabilidad de que el proceso entra en el estado absorbente de estado i e inmediatamente se reinicia en el estado de j a $1 \leq i, j \leq m$ se denota por $p_{i,j}$. Del mismo modo, $q_{i,j}$ indica la probabilidad de que el proceso entra en estado j de estado i sin ser absorbida, con $1 \leq i, j \leq m$ y $i \neq j$. La evolución del proceso de llegada se define por los $m \times m$ matrices C y D cuyos elementos están dados por

$$\begin{aligned} C_{i,j} &= \lambda_i q_{i,j} & i \neq j \\ C_{i,i} &= -\lambda_i \\ D_{i,j} &= \lambda_i p_{i,j} & 1 \leq i, j \leq m \end{aligned} \quad (4)$$

Suponemos que la matriz C es no singular y los vectores de probabilidad de estado estacionario de la π proceso de Markov está dada por la solución de las ecuaciones

$$\pi(C + D) = 0, \quad \pi e = 1 \quad (5)$$

donde e es un vector columna unidad. La tasa media de llegada de la MAP está dada por

$$\bar{\lambda} = \pi D e. \quad (6)$$

Tenga en cuenta que el proceso de Poisson, el proceso de renovación tipo de fase, y el proceso de Poisson modulada Markov son todos los casos especiales de la MAP [9].

El tiempo de servicio de un paquete depende de tres factores: la frecuencia de reloj seleccionada que determina la velocidad a la que se procesa el paquete (por ejemplo, encuadre, cifrado, Cyclic Redundancy Check etcétera), el tiempo de acceso al canal, y la longitud del paquete, que determina la tiempo de transmisión. Los tiempos de contención del canal y de transmisión son independientes de la frecuencia de reloj seleccionada a través de DFS. Denotamos la función de distribución de probabilidad (pdf) del tiempo de contención del canal en $g_i(x)$. Tenga en cuenta que el tiempo de la pelea por protocolos como IEEE 802.11 son bien conocidos [9]. También denotamos el pdf del tiempo de transmisión por $g_t(x)$, en el que el tiempo de transmisión incluye el tiempo necesario para la transmisión de paquetes de

control, tales como el reconocimiento. Por último, dado que la frecuencia de reloj seleccionada es de $g_i(x)$, el pdf del tiempo de servicio requerido para el procesamiento de paquetes se denota por $g_{p,i}(x)$. Denotamos el pdf del tiempo de servicio global y su valor esperado cuando la frecuencia de $f_i, 1 \leq i \leq N$, es seleccionado por $g_{s,i}(x)$ y s_i , respectivamente. Los Laplace-Stieltjes transformación de este tiempo de servicio está dada por

$$G_i(s) = R(s)T(s)P_i(s) \quad (7)$$

donde $R(s)$, $T(s)$, y $P_i(s)$ son Laplace-Stieltjes transformada de $g_r(x)$, $g_t(x)$, y $g_{p,i}(x)$, respectivamente.

Nuestro sistema corresponde a una cola con llegadas caracterizados por una MAP, tiempos de servicio generales caracterizado (7), un único servidor, y un tampón finito de tamaño B . Sin embargo, a diferencia de sistemas de colas tradicionales, la distribución del tiempo de servicio de cada paquete no es idéntico, sino que depende de la longitud de la cola en el momento que se inicia el servicio. Para analizar estos MAP/G/1/B cola con tiempo de servicio basado en longitudes de cola, se utiliza el modelo de [11]. Para analizar el sistema, primero caracterizamos la distribución longitud de la cola estacionaria en un instante arbitrario t . Deja que $Q(t)$ y $J(t)$ denotan el número de paquetes en la cola y el estado del proceso de llegada de Markov, respectivamente, en el momento t . Además, dejé $\chi(t)$ una variable aleatoria que toma el valor i si la frecuencia seleccionada en el momento t es f_i , con $1 \leq i \leq N$. Además, dejé $\xi(t)$ sea un valor binario variable aleatoria que toma un valor de 0 si el servidor está inactivo en el momento t , y un valor de 1 en caso contrario. Las probabilidades de estado estacionario de la longitud de la cola se definen como

$$y(0, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{Q(t) = 0, J(t) = j, \xi(t) = 0\}$$

$$y_0 = (y(0,1), y(0,2), \dots, y(0,m))$$

$$y^r(n, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{Q(t) = n, J(t) = j, \chi(t) = r, \xi(t) = i\}$$

$$y_n^r = (y^r(n,1), y^r(n,2), \dots, y^r(n,m))$$

$$y_n = \sum_{r=1}^{N-1} y_n^r, \quad 1 \leq n \leq B$$

por $1 \leq j \leq m$ y $r = 1, \dots, N-1$. En [10], se ha demostrado que la distribución de probabilidad estacionaria de la ocupación cola, y , viene dada por

$$y_0 = \frac{1}{E} x_0 (-C^{-1}) \quad (8)$$

$$y_B = \pi - \sum_{k=0}^{B-1} y_k \quad (9)$$

y por $1 \leq n < B$,

$$\begin{aligned}
y_n = & \frac{1}{E} \left[x_0 (-C^{-1})^n D \sum_{l=0}^{n-1} A_l^1 C^{-1} [D(-C^{-1})]^{n-l-1} \right. \\
& + \sum_{r=1}^N \sum_{k=L_{r-1}}^{\min\{n, L_r-1\}} x_k \sum_{l=0}^{n-k} A_l^r C^{-1} [D(-C^{-1})]^{n-l-k} \\
& \left. - \sum_{k=0}^n x_k C^{-1} [D(-C^{-1})]^{n-k} \right] \quad (10)
\end{aligned}$$

donde $\sum_{k=a}^b x_k = 0$ si $b < a$, y los parámetros E , x y A se definen en el Apéndice.

La energía media consumida por el nodo se da entonces por

$$\mathcal{E} = \sum_{r=1}^N \sum_{i=L_{r-1}}^{L_r-1} P_k y_i e + P_N y_B e + P_1 y_0 e. \quad (11)$$

La probabilidad de pérdida de paquetes, P_{loss} , y el retraso medio paquete, W , están dadas por

$$P_{loss} = \frac{y_B D e}{\sum_{i=0}^B y_i D e} \quad (12)$$

$$W = \frac{\sum_{i=0}^B i y_i e}{\lambda (1 - P_{loss})}. \quad (13)$$

IV. SELECCIÓN DE OPTIMAL UMBRALES

La sección anterior proporciona un modelo que captura la relación entre la frecuencia seleccionada con las métricas de rendimiento de interés, tales como el consumo de energía, los retrasos de paquetes y las tasas de pérdida de paquetes. En esta sección se utiliza este marco para obtener los umbrales óptimos para la selección de frecuencia.

Consideramos un escenario donde se conocen las características de tráfico de el proceso de llegada, en términos de las matrices C y D . Entonces, el objetivo del mecanismo de DFS es para seleccionar la frecuencia de funcionamiento de manera que el consumo total de energía en un nodo se reduce al mínimo, al tiempo que satisface los requisitos de retardo de paquetes y pérdida media. Este problema de optimización se puede escribir como:

$$\begin{aligned}
P1: \quad & \min_{L_k} \sum_{r=1}^N \sum_{i=L_{r-1}}^{L_r-1} P_k y_i e + P_N y_B e + P_1 y_0 e \\
& \text{subject to } P_{loss} \leq \rho \\
& W \leq \omega
\end{aligned}$$

donde ρ y ω son los límites máximos permitidos en las tasas de pérdida y demora promedio, respectivamente. Tenga en cuenta que las variaciones del problema de optimización P1 pueden incluir los casos en que la restricción es sólo en la pérdida de paquetes o los retrasos de paquetes.

Es obvio que P1 problema es complejo y una solución de forma cerrada para los niveles de umbral óptimo no existe. Para resolver el problema con una complejidad razonable, se propone una heurística como se muestra en el Algoritmo 1.

Algoritmo 1 es un enfoque codiciosos para la selección de los umbrales de cola para la selección de frecuencia. Nos inicializar el sistema con los parámetros de entrada, así como los límites de la probabilidad de pérdida de paquetes y retrasos como se desee por el operador de usuario o de red. Primero empezamos con un sistema con una sola disposición frecuencia de reloj: f_N . El primer paso es comprobar si la pérdida de destino y requisitos de retardo se pueden cumplir. Empezamos por la obtención de los valores de la demora y pérdida como obtenido a partir de los resultados para la Sección III para el sistema sólo con la frecuencia más alta de reloj (denotada en el Algoritmo 1 por $(P_{loss}, W)_{MAP/G/1/B(S,F)}$), y comprobar en contra de las restricciones de pérdidas y retardo especificados. Si los objetivos deseados no pueden alcanzarse cuando se utiliza sólo la frecuencia más alta, entonces es obvio que el uso de las frecuencias más bajas todavía dar lugar a una solución factible.

Algorithm 1 Proceso de selección Umbral

- 1: Entrada: $B, N, \rho, \omega, f_i, P_i, 1 \leq i \leq N$;
 - 2: Inicializar: $L_N = B, L_0 = 1$;
 - 3: Inicializar: $S = \{L_0, L_N\}$;
 - 4: Inicializar: $F = \{f_N\}$;
 - 5: **VERIFICACIÓN DE VIABILIDAD**
 - 6: **if** $(P_{loss}, W)_{MAP/G/1/B(S,F)} > (\rho, \omega)$ **then**
 - 7: Salir: Solución no factible
 - 8: **end if**
 - 9: **DETERMINACIÓN UMBRAL**
 - 10: **for** $i = N - 1$ to 1 by 1 **do**
 - 11: Inicializar: $L_i = L_0$;
 - 12: $S = S \cup L_i$;
 - 13: $F = F \cup f_i$;
 - 14: $L_i = \arg \max_{L_i \in (L_0, L_{i+1})} [(P_{loss}, W)_{MAP/G/1/B(S,F)} \leq (\rho, \omega)]$
 - 15: **end for**
-

Para un sistema que pasa la comprobación de factibilidad, que establece el umbral para cada frecuencia, comenzando con el más alto. Para la frecuencia de orden i , que por lo tanto consideramos un sistema con el más alto i frecuencias (el conjunto F) y para los que el umbral para la frecuencias f_{i+1}, \dots, f_N ha ya se ha determinado (el conjunto S). Para este sistema, entonces elegimos el umbral para la frecuencia de orden i entre el umbral más bajo posible (L_0) y el umbral de cola para la siguiente frecuencia más alta (L_{i+1}). En este rango, fijamos el umbral como los valores de L_i que se traduce en el consumo de energía más bajo, pero todavía logra

los requisitos de retardo y la pérdida. El proceso continúa hasta que se han determinado los umbrales para todas las frecuencias.

Intuitivamente, el sistema de selección de umbral propuesto intenta establecer los umbrales de tal forma que el mayor número posible de longitudes de cola se asigna a la frecuencia más baja desde que se traduce en los mayores ahorros de energía. Además, para cada frecuencia, el esquema de selección de umbral trata de empujar el umbral lo más cerca posible al umbral para la siguiente frecuencia más alta (o hacia el tamaño del búfer B para la frecuencia f_N), mientras que todavía satisfacer los requisitos de pérdida y retardo. Si bien el enfoque codicioso no se traduce necesariamente en la selección umbral óptimo, reduce significativamente el espacio de búsqueda.

V. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación para evaluar el mecanismo propuesto para la selección del umbral de nodos inalámbricos con DFS. Las simulaciones se llevaron a cabo en la plataforma de simulación NS-2, en el que un sistema de DFS que utiliza la selección de frecuencia basado umbral se implementó. Nuestro mecanismo DFS tiene la capacidad de elegir entre un conjunto de cinco frecuencias de funcionamiento. Los cinco frecuencias y la tasa de servicio de paquetes (por segundo) asociados a cada frecuencia se muestran en la Tabla 1. La energía consumida por cada frecuencia se explica por la aplicación de un modelo energético basado en las expresiones de la Sección II en NS-2. Para la implementación del mecanismo de DFS, consideramos el caso en que cada nodo tiene una cola física donde se almacenan los paquetes y el mecanismo de DFS selecciona la frecuencia de funcionamiento basándose en el estado de esta cola.

El marco propuesto se evalúa en virtud de procesos de llegada de dos de tráfico: tráfico de llegadas de Poisson y un proceso de Markov Modulada Poisson 2-estado (MMPP), que son dos casos especiales de un MAP. En nuestras simulaciones, los nodos utilizan el protocolo de datagrama de usuario (UDP) como la capa de transporte y IEEE 802.11 fue usado como la capa MAC. Cada ejecución de la simulación fue de 1000 segundos y cada valor reportado es el promedio de 10 carreras. La longitud de cada paquete fue 1000 bytes. El tamaño de búfer en cada nodo se supone que los paquetes $B = 50$. Las simulaciones consideran un escenario de dos nodos con un solo punto de acceso y una estación de abonado.

TABELA I
DISPONIBLE RELOJ FRECUENCIAS

Frecuencia	Servicio Rate
100 MHz	300
150 MHz	450
200 MHz	600
250 MHz	750
300 MHz	1000

A. Resultados para Poisson Tráfico

Para entender el impacto de la elección de los diversos umbrales y también para validar el modelo propuesto para sistemas de gestión de colas DFS, primero consideramos el caso del tráfico de Poisson. Consideramos dos ajustes de umbral:

$$L1 = [1, 10, 20, 30, 40, 50] \quad \text{y}$$

$L2 = [1, 17, 29, 37, 44, 50]$. Tenga en cuenta que mientras que $L1$ divide uniformemente la gama de longitudes de cola entre las cinco frecuencias, $L2$ utiliza la frecuencia más baja para una gama más amplia de longitudes de cola.

Los resultados analíticos para el paquete experimentaron tasas de abandono para los dos casos de umbral para diversas tasas de llegada de paquetes se muestra en la Fig. 2. El consumo de energía promedio correspondiente se muestra en la Fig. 3. Observamos que el rendimiento de los dos niveles de umbral es aproximadamente el mismo en términos de las tasas de abandono de paquetes. Esto es principalmente porque en ambos casos, la DFS selecciona la frecuencia más alta como la longitud de la cola se acerca B . Sin embargo, el uso de $L2$ reduce significativamente el consumo medio de energía, especialmente a cargas moderadas. Cuando la tasa de llegada (y por tanto la carga) es muy baja, las longitudes de cola son bajas y ambos sistemas tienden a utilizar la frecuencia más baja para la mayoría de las veces. Con cargas moderadas, $L2$ da un importante ahorro energético en comparación con $L1$ ya que utiliza frecuencias más bajas para una mayor gama de longitudes de cola. Además, a muy altas tasas de llegada donde el sistema está altamente cargado, ambos umbrales tienen un rendimiento similar, ya que ambos funcionan a la frecuencia más alta.

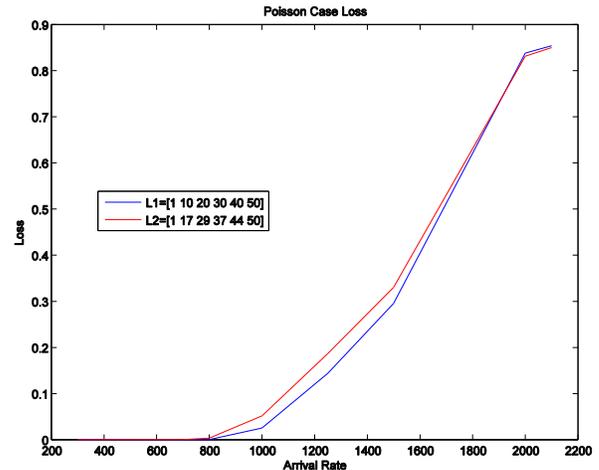


Figura 2. Poisson Tráfico: Tasa de pérdidas.

Las tasas de pérdida de nuestro modelo de análisis se comparan con los resultados de la simulación de la Tabla II, mientras que los resultados para el consumo de energía se muestran en la Tabla III. Tomamos nota de que los resultados muestran un buen partido para los dos el consumo de energía y las tasas de pérdida. Los resultados de pérdida predicho por el análisis es más alto que el de las simulaciones.

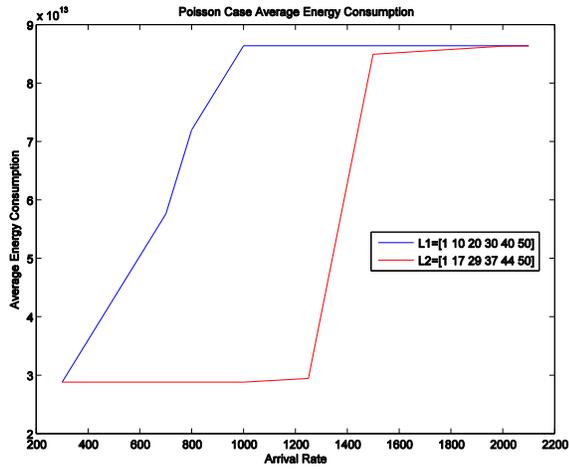


Figura 3. Poisson Tráfico: Consumo de energía media

TABELA II
POISSON TRÁFICO: TASA DE PÉRDIDAS.

λ	L1		L2	
	Analysis	Simulation	Analysis	Simulation
300	6.92E-18	0	7.21E-17	0
500	1.27E-09	0	1.46E-13	0
700	1.81E-04	0	3.67E-06	0
800	3.47E-03	0	4.23E-04	0
1000	5.16E-02	9.36E-05	1.53E-02	0
1250	1.87E-01	2.44E-02	1.14E-01	1.07E-02

TABELA III
POISSON TRÁFICO: CONSUMO DE ENERGÍA MEDIA.

λ	L1		L2	
	Analysis	Simulation	Analysis	Simulation
300	2.88	2.88	2.88	2.88
500	4.32	2.88	4.32	2.88
700	5.76	2.88	5.76	2.88
800	7.20	2.93	7.20	2.88
1000	7.20	2.88	7.20	6.30
1250	7.20	3.42	8.64	7.93
1500	8.64	6.02	8.64	8.50

B. Resultados para 2-Estado MMPP Tráfico

Para evaluar el modelo propuesto en modelos de tráfico más realistas, al lado consideramos el caso en el que las llegadas se generaron de acuerdo con un 2-estado MMPP. Por estos resultados, la probabilidades de transición $p_{i,j}$ y $q_{i,j}$ para los C y D matrices se mantuvieron constantes mientras que las tasas de llegada λ_i se variaron para generar tráfico a un ritmo diferente. Los C y D matrices fueron:

$$C = \begin{bmatrix} -0.1 - \lambda_1 & 0.1 \\ 0.2 & -0.2 - \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}$$

con $\lambda_2 / \lambda_1 = 4$. Para las llegadas MMPP, las Fig. 4 y 5 muestran las tasas de abandono de paquetes y el consumo medio de energía de los dos umbrales: $L1 = [1, 10, 20, 30, 40, 50]$ y $L2 = [1, 17, 29, 37, 44, 50]$. Los resultados de la simulación tienen una precisión similar al

caso de Poisson y se han omitido para evitar resultados repetitivos.

En comparación con el caso de Poisson, las tasas de pérdida de los dos umbrales es significativamente diferente para las llegadas MMPP. Esto es debido a que el proceso de llegada MMPP es significativamente más burstier que las llegadas de Poisson. Como resultado, $L1$ tiene tasas de pérdida inferiores ya que utiliza la frecuencia más alta para una gama más amplia de longitudes de cola, que le permite absorber mejor las ráfagas de llegadas. La tendencia para el consumo medio de energía siguen las del caso de Poisson con límite de $L2$ resultando en un menor consumo energético con cargas moderadas.

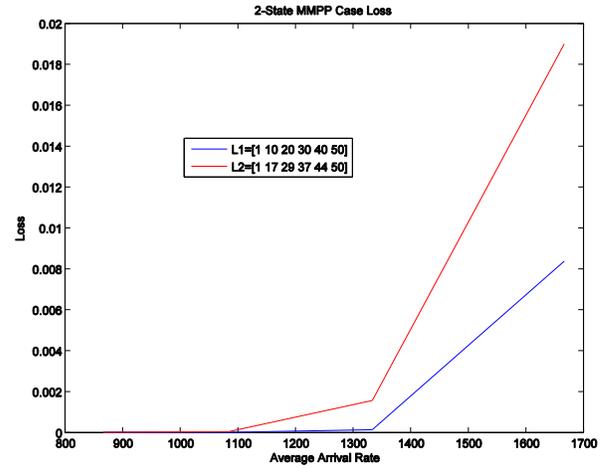


Figura 4. MMPP Tráfico: Tasa de pérdidas.

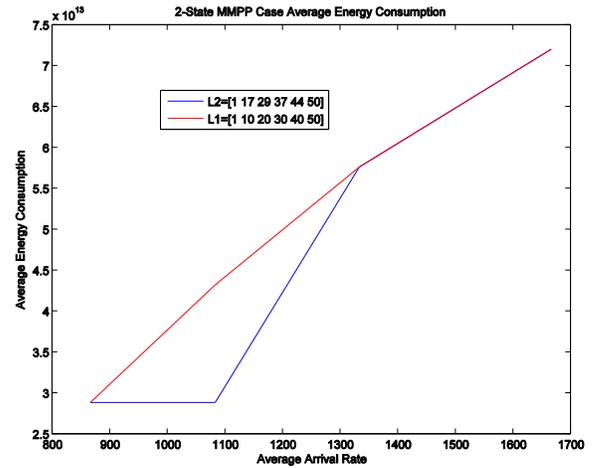


Figura 5. MMPP Tráfico: Consumo de energía media.

C. Selección Óptima Umbral

En esta sección se presentan los resultados para la selección umbral óptimo. Por razones de espacio, sólo mostramos los resultados para el caso de Poisson y los resultados para las llegadas MMPP muestran tendencias similares. Los niveles de umbral óptimo para el tráfico de Poisson con diferentes tasas se muestran en la Tabla IV. Se observa que a medida que la

TABELA IV
POISSON TRÁFICO: SELECCIÓN DEL UMBRAL ÓPTIMO.

λ		Límite Superior de la Pérdida		
		0.01	0.02	0.03
300	Thresholds	[1 47 47 48 49 50]	[1 47 47 48 49 50]	[1 47 47 48 49 50]
	Energy	2.88	2.88	2.88
	Loss	5.71E-08	5.71E-08	5.71E-08
600	Thresholds	[1 38 41 48 49 50]	[1 25 44 48 49 50]	[1 28 47 48 49 50]
	Energy	5.76	4.32	4.32
	Loss	9.94E-03	1.99E-02	2.93E-02
900	Thresholds	[1 22 23 25 49 50]	[1 32 32 34 49 50]	[1 33 34 38 49 50]
	Energy	7.20	7.20	7.20
	Loss	9.94E-03	0.019963419	0.029833535

restricción en la tasa de pérdida se hace más estricta, la gama de longitudes de cola sobre las que la frecuencia más baja se puede utilizar reduce. Del mismo modo, a medida que aumenta la tasa de llegada, los valores de umbral para las frecuencias mueve hacia valores más bajos. Tanto estas observaciones son un resultado del hecho de que a medida que la carga aumenta o cuando se desean tasas de pérdida inferiores, frecuencias más altas deben ser utilizados a los rangos más amplios de la longitud de la cola. También tomamos nota de que la energía consumida se incrementa a medida que aumenta la carga. Esto es debido a cargas más altas el sistema funciona en las frecuencias más altas para una mayor fracción de tiempo, dando lugar a un mayor consumo de energía.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para la selección óptima de las frecuencias de umbral para el hardware de red inalámbrica equipado con DFS. El marco propuesto se basa en el modelado de cada nodo como *MAP/G/1/K* cola con un servicio basado umbral. Nuestros resultados de la simulación muestran que el esquema propuesto alcanza el mínimo consumo de energía al tiempo que garantiza que se mantengan las características de funcionamiento nivel de paquete.

APÉNDICE

La cantidad x utilizado en el modelo presentado en la Sección III representan el estado del sistema en las épocas de salida. Deje $\tau_k, k \geq 1$, denotan las épocas de salidas sucesivas con $\tau_0 = 0$. Además, se denota la longitud de la cola y el estado del proceso de llegada de Markov inmediatamente después de la partida de orden k como Q_k y J_k , respectivamente. Las probabilidades $x_{i,j}$ y el vector x se define entonces como

$$x_{i,j} = \lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{Q_k = i, J_k = j\}, 0 \leq i \leq B-1, 1 \leq j \leq m$$

$$x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m})$$

$$x = (x_0, x_1, \dots, x_{B-1})$$

Las matrices A_k^r forma las probabilidades de transición de un

paso de la cadena de Markov $\{(Q_k, J_k)\}$. La matriz A_k^r está dada por

$$A_k^r = \int_0^{\infty} P(k, x) dG_{s,r}(x), \quad 1 \leq j \leq N, k \geq 0 \quad (14)$$

donde $G_{s,r}(x)$ es la función de distribución acumulada del tiempo de servicio cuando la frecuencia de $r, 1 \leq r \leq N$, se elige. Además, el (i, j) -ésimo elemento de los $m \times m$ matriz $P(k, x)$ se define como la probabilidad condicional

$$p_{i,j}(k, x) = \Pr\{M(x) = k, J(x) = j | M(0) = 0, J(0) = i\},$$

$$k \geq 0, 1 \leq i, j \leq m$$

donde $M(x)$ es el número de llegadas de paquetes en el intervalo $(0, x]$. Por último,

$$E = x_0(-C^{-1})e + s_1 x_0 e + \sum_{k=1}^N s_k \sum_{n=L_{k-1}}^{L_k-1} x_n e$$

es el tiempo medio entre dos salidas consecutivas de la cola.

REFERENCIAS

- [1] B. Sikdar, "A Study of the Environmental Impact of Wired and Wireless Local Area Network Access," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 59, no. 1, February 2013.
- [2] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis and O. Blume, "Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks," in Proc. Future Network and Mobile Summit, Florence, Italy, June 2010.
- [3] H-S. Jung, A. Hwang and M. Pedram, "Predictive-flow-queue Based Energy Optimization for Gigabit Ethernet Controllers," IEEE Transactions on VLSI Systems, vol. 17, no. 8, pp. 1113-1126, August 2009.
- [4] J. Chen and B. Sikdar, "A Mechanism for Load Proportional Energy Use in Wireless Local Area Networks," in Proc. IEEE GLOBECOM, Atlanta, GA, December 2013.
- [5] K. Choi, R. Soma and M. Pedram, "Dynamic Voltage and Frequency Scaling based on Workload Decomposition," in Proc. Symposium on Low Power Electronics and Design, pp. 174-179, Newport Beach, CA, August 2004.
- [6] R. Bolla, R. Bruschi and C. Lombardo, "Dynamic Voltage and Frequency Scaling in Parallel Network Processors," in Proc. of IEEE HPSR, pp. 242-249, Belgrade, Serbia, June 2012.
- [7] S. Shah-Heydari and T. Le-Ngoc, "MMPP Models for Multimedia Traffic," Telecommunication Systems, vol. 15, no. 3-4, pp. 273-293, December 2000.
- [8] A. Andersen and B. Nielsen, "A Markovian Approach for Modeling Packet Traffic with Long Range Dependence," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 5, pp. 719-732, June 1998.

- [9] D. Lucantoni, K. Meier-Hellstern and M. Neuts, "A single-server queue with server vacations and a class of non-renewal arrival processes," *Advances in Applied Probability*, vol. 22, no. 3, pp. 676-705, 1990.
- [10] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000.
- [11] D. Choi, "MAP/G/1/K Queue with Multiple Thresholds on Buffer," *Communications of the Korean Mathematical Society*, vol. 14, no. 3, pp. 611-625, 1999.



Jie Chen received the Bachelor's degree in Electronic and Electronics Engineering from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China in 2004 and the Master's degree in Telecommunications from University College London, London, England in 2005. She is currently a doctoral candidate in the Department of Electrical, Computer and Systems Engineering at Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA. Her research interests are in the broad area of wireless networks. She is a freelancing charitable educator, certified psychology counselor and Chinese language teacher.



Biplab Sikdar (S'98-M'02-SM'09) received the B. Tech degree in electronics and communication engineering from North Eastern Hill University, Shillong, India, the M. Tech degree in electrical engineering from Indian Institute of Technology, Kanpur and Ph.D in electrical engineering from Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA in 1996, 1998 and 2001, respectively. He is currently an Associate Professor in the Department of Electrical and Computer Engineering of National University of Singapore, Singapore. Dr. Sikdar is a member of IEEE, Eta Kappa Nu and Tau Beta Pi and is an Associate Editor of the *IEEE Transactions on Mobile Computing*.