Evaluación experimental de algoritmos de control de potencia distribuidos en redes de sensores inalámbricos móviles

M.A. Díaz-Ibarra, D.U. Campos-Delgado, C.A. Gutiérrez J.M. Luna-Rivera

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, San Luís Potosí, México (e-mail: madiazibarra@gmail.com, ducd@fciencias.uaslp.mx, caqutierrez@ieee.org, mlr@uaslp.mx)

Resumen: El control de potencia en una red de sensores inalámbricos móviles (MWSN) es un proceso esencial para mejorar la eficiencia energética y la calidad de servicio (QoS) en cada nodo. Así este trabajo de investigación tiene como propósito evaluar diferentes algoritmos de control de potencia distribuidos a través de un banco de pruebas experimental, donde los nodos inalámbricos se encuentran en movimiento. Para ello, se realizan las siguientes contribuciones originales: i) Para la actualización del nivel de potencia de transmisión, se propone una estimación de la razón señal-interferencia-ruido (SINR) a través de las métricas del indicador de potencia de la señal recibida por paquete (RSSIp) y el indicador de potencia de la señal recibida general (RSSIg) del nodo inalámbrico, y ii) Se analizan seis algoritmos de control de potencia distribuidos del estado del arte, considerando un nuevo algoritmo en este trabajo: paso-fijo modificado. Finalmente, los resultados de la evaluación experimental indican que el algoritmo de paso-fijo modificado tiene el mejor desempeño en función del seguimiento de la referencia de la QoS y el consumo de potencia. Además, en general, los resultados muestran que un esquema de asignación de potencia dinámico no sólo permite el uso eficiente de la batería, prolongando su vida útil, sino que también es capaz de garantizar la QoS deseada a pesar de la movilidad de los nodos.

Palabras clave: Eficiencia energética, calidad de servicio, algoritmos de control de potencia, red móvil de sensores inalámbricos.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las redes de sensores inalámbricos (WSNs) han avanzado considerablemente para atender las necesidades del ser humano. Estas redes están formadas por un grupo de pequeños nodos o "motes" con ciertas capacidades de percepción y de comunicación (Seungku et al., 2013). Además, estos nodos pueden ser estacionarios o móviles (Papadopoulos et al., 2016). Las WSNs tienen aplicaciones en diferentes áreas (Yick et al., 2008), por ejemplo, en medicina, sistemas de seguridad, agricultura, industria, monitoreo ambiental, hábitat, entre otras.

El control de potencia juega un papel muy importante en las redes de sensores inalámbricos móviles, ya que este proceso ayuda a prolongar la vida útil de la batería. En este sentido, la finalidad de actualizar dinámicamente el nivel de potencia de transmisión es compensar las variaciones del canal. En general, el control de potencia se clasifica como esquema de lazo-abierto y esquema de lazo-cerrado (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). Por otro lado, para garantizar la QoS en las MWSNs, una métrica que se podría monitorear es la tasa señal-interferencia-ruido (SINR) en la estimación de la información del nodo móvil (NM) que es recibida por la estación base (BS). Sin embargo, el estándar para redes de sensores IEEE 802.11.15.4 no proporciona una métrica para cuantificar el SINR de forma directa. Por lo tanto, en

este trabajo se propone hacer uso de las funciones RSSIp y RSSg proporcionadas por la norma IEEE 802.15.4 para estimar la SINR. La solución propuesta se basa en un filtro $\alpha-\beta-\gamma$ con el objetivo de reducir la variabilidad que tiene la estimación del SINR entre los paquetes recibidos (Tenne and Singh, 2002). Cabe resaltar que el SINR propuesto, representa una contribución original de este trabajo.

En la literatura se han propuesto mecanismos para el control de potencia en WSNs. En (Fu et al., 2012), se propone un esquema de control proporcional-integral (PI) que mantiene una calidad de enlace deseada a través del ajuste dinámico del nivel de potencia de transmisión basado en las mediciones de la calidad del enlace en línea (tasa de recepción de paquetes, PRR). En (Seungku et al., 2013), se propone un esquema de control de potencia de transmisión para aplicaciones médicas, es decir, se propone un protocolo práctico el cual utiliza el indicador de la potencia de la señal recibida (RSSI) y el indicador de calidad del enlace (LQI) para regular la potencia de transmisión. Un control de potencia adaptivo (ATCP) se propone en (Lin et al., 2016) con el objetivo de lograr una eficiencia energética y garantizar la QoS entre los nodos vecinos. Además, en Lin et al. (2016) se muestra la correlación que existe entre el RSSI y LQI con la calidad del enlace. Mediante la combinación de la SINR y el LQI, en (Qin et al., 2013) se propone el filtro de Kalman

para la predicción del SNR efectivo con la finalidad de mejorar la estimación de la QoS en las WSNs. En (Jeong et al., 2007), se realiza una evaluación experimental de varios algoritmos de control de potencia propuestos en la literatura con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de las WSNs. Sin embargo, la actualización del nivel de potencia de transmisión se realiza con base a las mediciones de la PRR.

En este contexto, este trabajo de investigación tiene como propósito proponer una nueva métrica de la QoS asociada con el SINR y evaluar el desempeño de las siguientes cinco estrategias de control tomadas del estado del arte: control de paso-fijo (PF), control Foschini-Miljanic (FM), control proporcional-integral-derivativo (PID), control de estructura variable (VSC), control de rellenado de agua (WF) (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013); y proponer un nuevo esquema: control de paso fijo modificado (MFS). En particular, se evaluará la variabilidad en el seguimiento de la referencia del SINR y el nivel de potencia de trasmisión acumulada; buscando evidenciar sus ventajas y desventajas comparado con una transmisión a potencia constante.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

2.1 Nodos inalámbricos

Los nodos inalámbricos a utilizar en este estudio provienen de la compañía Zolertia, en particular de la plataforma Z1 y contienen una unidad de procesamiento MSP430 y un transceptor CC2420, así como un sensor de temperatura y un acelerómetro de 3 ejes (Zolertia, 2013). La comunicación inalámbrica se basa en la tecnología de espectro extendido por secuencia directa (DSSS), la cual utiliza la modulación por desplazamiento de fase cuaternaria escalonada (OQPSK) (Instruments, 2014). El sistema operativo *Contiki* se utiliza para la programación de los nodos inalámbricos Z1, el cual permite regular de manera precisa el nivel de potencia de transmisión ya sea bajo el sistema operativo Windows o Mac OS.

2.2 Transceptor de radiofrecuencia CC2420

El transceptor CC2420 opera en la banda Industrial Científica Médica (ISM) de 2.4 GHz bajo el estándar IEEE 802.15.4, con una tasa máxima efectiva de transmisión de 250 Kbps. La banda ISM está dividida en 16 canales de 3 MHz cada uno y una separación entre canales de 5 MHz para evitar así la interferencia co-canal. La potencia de transmisión de salida se regula a través del comando set_txpower: CC2420_set_txpower(power) como un número entero, donde la variable power hace referencia al nivel de potencia de transmisión cuyo valor fluctúa entre 0 y 31, es decir 32 niveles.

2.3 Indicador de potencia de la señal recibida

El RSSI provee una estimación de la potencia de la información recibida en el nodo inalámbrico (Mukhopadhyay et al., 2015). Esta métrica se calcula sobre el promedio de 8 periodos del símbolo (128 μ s) y es almacenada en un registro $RSSI_VAL$. El transceptor emplea la siguiente

fórmula para calcular la potencia de la señal recibida en

$$RSSI = RSSI_VAL + RSSI_OFFSET \tag{1}$$

donde $RSSI_OFFSET$ es aproximadamente -45 (Instruments, 2014). Existen dos interfaces que proporcionan la lectura de la métrica RSSI:

- RSSIg : el comando CC2420_rssi() proporciona valores del RSSI de forma instantánea, es decir, cuantifica la interferencia más el ruido por paquete.
- RSSIp: el comando CC2420Packet.getRssi(msg) proporciona un valor del RSSI por cada paquete que se recibe.

2.4 Tasa de recepción de paquetes

Un parámetro estrechamente relacionado con la QoS, es la tasa de recepción de paquetes (PRR). La PRR se calcula como el número de paquetes recibidos con éxito para un número de paquetes transmitidos. Otra métrica similar se llama la tasa de pérdida de paquetes (PDR). La PDR se calcula como 1-PRR (Srinivasan and Levis, 2006; Vlavianos et al., 2008). Sin embargo, la cuantificación de estas métricas requiere de cierto tiempo de procesamiento.

2.5 Evaluación de la calidad de servicio

Los esquemas de control de potencia propuestos previamente en la literatura requieren de la estimación de la SINR (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). Los nodos inalámbricos Z1 no proporcionan la SINR como una medida para el desempeño del enlace de comunicación, pero en su lugar se ofrece el RSSIp y RSSIg. Por lo tanto, en esta sección se deriva la relación entre el RSSIp y RSSIg con la SINR, la cual es estimada en la plataforma experimental. El parámetro SINR para el *i*-ésimo NM puede definirse por:

$$\gamma_i = \frac{Energía \ por \ paquete \ estimado}{Energía \ de \ la \ interferencia + Energía \ del \ ruido},$$

debido a que la métrica RSSIp proporciona la energía del paquete y la RSSIg cuantifica la energía de la interferencia más la energía del ruido. Por lo tanto la SINR en dB puede ser cuantificada en el k-ésimo instante de tiempo por:

$$\hat{\gamma}_i[k] = \text{RSSIp}[k] - \text{RSSIg}[k] - 30, \tag{3}$$

donde el término escalar de -30 representa la conversión de dBm a dB. Cabe mencionar que las métricas RSSIp y RSSIg incluyen la medición del $RSSI_OFFSET$, este nivel es determinado experimentalmente por el fabricante y para estos nodos inalámbricos se encuentra estimado en -45dBm como se ha mencionado en la sección 2.3. Finalmente, la SINR estimada se calcula promediando sobre 10 muestras de paquetes y se pasa a través del filtro $\alpha - \beta - \gamma$.

2.6 Filtro
$$\alpha - \beta - \gamma$$

El filtro $\alpha - \beta - \gamma$ es comúnmente empleado en sistemas de radar (Mohammed et al., 2010). En este trabajo, el filtro $\alpha - \beta - \gamma$ se utiliza para obtener una mejor estimación de la QoS por la variabilidad que presentan en la práctica RSSIp y RSSIg. Este filtro se ha utilizado

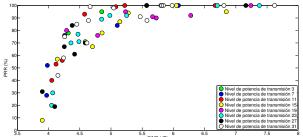


Figura 1. PRR contra SINR para los diferentes niveles de potencia de transmisión.

previamente en estimaciones de aceleración, velocidad y posición utilizando retroalimentación de ubicación. Las ecuaciones están dadas para el i-ésimo NM por (Tenne and Singh, 2002):

$$x_i[k+1] = \gamma_i[k] + T v_{i,s}[k] + \frac{1}{2}T^2 a_{i,s}[k]$$
 (4)

$$v_{i,p}[k+1] = v_{i,s}[k] + T a_{i,s}[k],$$
(5)

donde las variables filtradas $\gamma_i[k]$, $v_{i,s}[k]$ y $a_{i,s}[k]$ se derivan con la predicción anterior y la innovación ponderada como sigue:

$$\gamma_i[k] = x_i[k] + \alpha(\hat{\gamma}_i[k] - x_i[k]), \tag{6}$$

$$v_{i,s}[k] = v_{i,p}[k] + \frac{\beta}{T}(\hat{\gamma}_i[k] - x_i[k]),$$
 (7)

$$a_{i,s}[k] = a_{i,s}[k-1] + \frac{\gamma}{2T^2}(\hat{\gamma}_i[k] - x_i[k]),$$
 (8)

T es el intervalo de muestreo, y las constantes α , β y γ definen el comportamiento del sistema en términos de estabilidad y capacidad de seguimiento.

2.7~Resultados~experimentales~en~la~estimación~de~la~SINR~y~PRR

En esta sección se presentan los resultados de la estimación de la SINR y PRR, en un entorno de línea de vista entre el nodo receptor y el nodo transmisor. Con este fin, se utiliza como ejemplo el canal 26 del estándar IEEE 802.15.4 para mostrar la correlación entre PRR y SINR. De esta manera, se busca dar una evidencia de que la métrica SINR propuesta en realidad tiene una implicación con respecto de la QoS en los enlaces de comunicación. La estimación de la SINR se recopila en el nodo receptor cuando se recibe un paquete. Cuando se pierde un paquete, éste no se incluye en los cálculos del SINR. La PRR se calcula como el número de paquetes recibidos dividido por el número de paquetes enviados. En la Figura 1 se muestra la PRR contra SINR para los diferentes niveles de potencia de transmisión con una distancia de separación mínima de 5 m y una máxima de 75 m entre en nodo receptor y el nodo transmisor, donde el incremento de la SINR está en función de la distancia y el nivel de potencia. En esta figura se observa cómo se incrementa la PRR a medida que aumenta la SINR. Además, se puede apreciar en la gráfica que el umbral a partir del cual la PRR aumenta de forma brusca se encuentra alrededor de 5 dB para los diferentes niveles de potencia de transmisión. Por lo tanto, en este trabajo el valor SINR objetivo se fija en 7 dB debido a que a partir de este umbral se obtiene el 100 % de PRR y además, este es el valor usualmente utilizado en la literatura (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013).

3. ALGORITMOS DE CONTROL DE POTENCIA

En esta sección, se describen las seis estrategias de asignación de potencia que se evalúan de manera experimental en este trabajo. Estos algoritmos se implementan en una estructura de lazo-cerrado, con el fin de actualizar el nivel de potencia de transmisión en el enlace de subida. El ajuste de potencia de transmisión para el i-ésimo NM se realiza de la siguiente manera: la BS estima la QoS por medio de la SINR $(\gamma_i[k])$ y la compara con el valor objetivo fijo de $\gamma^{obj}[k]$, que garantiza la QoS deseada para ese NM. La BS retroalimenta el error de seguimiento de la referencia al NM, dado que con base a la información recibida se lleva acabo el proceso de actualización del nivel de potencia de transmisión. Cabe resaltar que en los nodos móviles se tienen predefinidos niveles de potencia mínima p_{min} y máxima p_{max} , los cuales sirven de límites para los algoritmos de control.

3.1 Control de paso fijo

Esta técnica de control es una de las estrategias inicialmente utilizadas en la tecnología de acceso múltiple por división de código (CDMA), donde de acuerdo con el signo del error dado por $e_i[k] = \gamma^{obj} - \gamma_i[k]$, el NM aumenta, disminuye o mantiene la potencia de transmisión (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). El ajuste de potencia se realiza con base a la siguiente expresión:

$$p_i[k+1] = p_i[k] + \Delta_p sign(e_i[k]), \tag{9}$$

donde $\Delta_p = 1$, $sign(\cdot)$ representa la función de signo y $e_i[k]$ es la señal de error recibida en el NM, su expresión está dada por:

$$e_i[k] = \gamma^{obj} - \gamma_i[k]. \tag{10}$$

3.2 Control Foschini-Miljanic

El algoritmo de FM es una de las primeras estrategias propuestas de control distribuido en la literatura, el cual se caracteriza por una baja complejidad. La potencia de transmisión se actualiza de acuerdo con la siguiente expresión (Foschini and Miljanic, 1993):

$$p_i[k+1] = p_i[k] + k_{FM}e_i[k], \tag{11}$$

donde $k_{FM} \in (0,1]$ es una ganancia que balancea el compromiso entre rapidez de respuesta y robustez y el error de seguimiento de la referencia $e_i[k]$ se cuantifica con base a la siguiente ecuación:

$$e_i[k] = \left[\frac{\gamma^{obj}}{\gamma_i[k]} - 1\right] p_i[k]. \tag{12}$$

3.3 Control proporcional-integral-derivativo

El control PID es una estrategia básica para el ajuste de la potencia de transmisión en redes inalámbricas, el cual se propuso inicialmente en (Paul et al., 2005). Esta acción de control se basa en la transformación no-lineal del error de seguimiento $e_i[k]$ en (12), y la asignación de potencia PID se expresa por:

Algoritmo 1 Control de rellenado de agua

```
Entrada: \gamma_{i}[k], \gamma_{i}^{obj}, \epsilon, \delta;

Salida: p_{i}[k+1]; {Nivel de potencia limitado por p_{min} y p_{max}}

1: \mathbf{si} \ \gamma_{i}[k] > \gamma_{i}^{obj} + \epsilon \ \mathbf{entonces}

2: p_{i}[k+1] = \max\{p_{min}, p_{i}[k] - \delta\};

3: \mathbf{si} \ \mathbf{no}

4: p_{i}[k+1] = p_{i}[k];

5: \mathbf{fin} \ \mathbf{si}

6: \mathbf{si} \ \gamma_{i}[k] < \gamma_{i}^{obj} + \epsilon \ \mathbf{entonces}

7: p_{i}[k+1] = \min\{p_{max}, p_{i}[k] + \delta\};

8: \mathbf{fin} \ \mathbf{si}

9: \mathbf{devolver} \ p_{i}[k+1];

p_{i}[k+1] = k_{p}e_{i}[k] + k_{i}w_{i}[k] + k_{d}(e_{i}[k] - e_{i}[k-1])(13)

w_{i}[k+1] = w_{i}[k] + e_{i}[k]
```

donde $e_i[k]$ denota la señal de error recibida en el NM que se expresa en (12), $w_i[k]$ representa la componente integral del error y k_p , k_i , k_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

3.4 Control de estructura variable

El algoritmo de control de estructura variable se propuso en (Uykan and Koivo, 2006), donde esta técnica es una combinación del control propuesto por Foschini-Miljanic y el algoritmo de paso fijo. La actualización de potencia de transmisión se realiza con base en la siguiente expresión:

$$p_i[k] = p_i[k] + c \cdot e_i[k] + d \cdot sign(e_i[k]) \tag{14}$$

donde c and d son los parámetros de ganancia en este control y $e_i[k]$ representa la señal del error recibida en el NM definida en (12).

3.5 Control de rellenado de agua

El algoritmo de rellenado de agua se ha utilizado para la asignación de potencia en multicanalización por división de frecuencias ortogonales (OFDM) (Qi et al., 2012). Este algoritmo de control se emplea para asignar una potencia apropiada para cada usuario y/o subcanal con el fin de mejorar la QoS del sistema. En este sentido, el algoritmo distribuye la potencia entre todos los usuarios con la ayuda del SINR. Por lo tanto, una vez que el SINR se obtiene por la BS, esta información se envía al NM para actualizar el nivel de potencia de transmisión con base en el Algoritmo 1, donde δ es el tamaño de paso fijo y ϵ es el 10 % del valor objetivo $\gamma^{obj}[k]$ (Yu et al., 2002).

3.6 Control de paso fijo modificado

El algoritmo descrito en esta sección se titula paso fijo modificado (MFS). En el diseño de este esquema de control contempla los 32 niveles de potencia de transmisión discretos proporcionados por el transceptor CC2420, donde el umbral η_{th} fue seleccionado para ser 0.5 dBm, si el error se encuentra en el rango de $-\eta_{th}$ a η_{th} , el desempeño se considera aceptable en términos de PRR y de acuerdo con los umbrales $(\eta_{th}, -\eta_{th})$ del algoritmo propuesto, se envía al NM tres tipos de acciones: aumentar, disminuir o mantener el nivel de potencia de transmisión. Esta estrategia de control es de baja complejidad computacional. La estructura distribuida de control está dada por el Algoritmo 2. Cabe destacar que este algoritmo representa una contribución de este trabajo de investigación.

```
Algoritmo 2 Control de paso fijo modificado

Entrada: e_i[k], \eta_{th}, \delta;

Salida: p_i[k+1]; {Nivel de potencia limitado por p_{min} y p_{max}}

1: si e_i[k] < -\eta_{th} entonces

2: p_i[k+1] = \max\{p_{min}, p_i[k] - \delta\};

3: fin si

4: si e_i[k] > \eta_{th} entonces

5: p_i[k+1] = \min\{p_{max}, p_i[k] + \delta\};

6: fin si

7: si -\eta_{th} \le e_i[k] \le \eta_{th} entonces

8: p_i[k+1] = p_i[k];

9: fin si

10: devolver p_i[k+1];
```

4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

La evaluación de los seis algoritmos de ajuste de potencia en lazo-cerrado descritos en la sección anterior se realiza a través de un banco de pruebas experimental, donde se considera el siguiente escenario: un NM y una BS, como se muestra en la Figura 2.

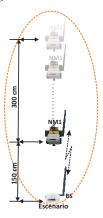


Figura 2. Esquema para la evaluación experimental.

Escenario: se coloca un NM y una BS fija, y se transmiten 100 paquetes (que contienen la siguiente información: temperatura, número de secuencia y potencia de transmisión) periódicamente desde el NM a la BS utilizando cada una de las estrategias de control de potencia. Primero, el NM se encuentra estacionario (caso estático), una vez que transcurren 1,000 segundos, el NM se aleja (caso dinámico), cuando el NM llega a su destino se repite la primer etapa, posteriormente se realiza el proceso inverso. El desplazamiento del NM se realiza a través de un robot Lego RCX para programar de forma precisa la trayectoria, como se muestra en la Figura 2. Cabe mencionar que en este escenario no existen retrasos en la cuantificación de la SINR, ni interferencia de acceso múltiple por otros usuarios activos en el sistema; por lo que la evaluación de la estabilidad de lazo cerrado se verifica de forma sencilla.

Finalmente, se presentan los resultados de los seis algoritmos de control de potencia. Para esto, se evaluá el desempeño considerando 100 tramas del esquema de asignación de potencia, donde cada trama consiste de 10 paquetes. Las ganacias de los algoritmos y los parámetros del filtro $\alpha-\beta-\gamma$ se muestran en la Tabla 1 y 2, respectivamente, donde el ajuste de las ganancias de los controladores se ha realizado de manera heurística, es decir, realizando pruebas con los nodos inalámbricos. Además, estas ganancias cumplen con el margen de estabilidad. En la Figura 3, se

Cuadro 1. Ganancias de los algoritmos de asignación de potencia.

Parámetro	Valor	
$\Delta_p(FS)$	1	
k_{FM}	0.4	
$k_p(PID)$	1.6	
$k_i(PID)$	0.6	
$k_d(PID)$	0.01	
c(VSC)	0.4	
d(VSC)	0.3	
$\delta(WF)$	1	
$\epsilon(WF)$	$0.7~\mathrm{dB}$	
$\eta_{th}(MFS)$	$0.5~\mathrm{dB}$	

Cuadro 2. Parámetros del filtro $\alpha - \beta - \gamma$.

Parámetro	Valor	
α	0.1	
β	0.001	
γ	1×10^{-5}	
T	5 s	

muestra el desempeño de los seis algoritmos de asignación de potencia a lo largo de 100 tramas de la estructura de control. En la Figura 3a, se observa que los algoritmos FS, FM y WF mantienen un error mayor en el seguimiento de la referencia, lo que degrada su desempeño. Por otro lado, las estrategias restantes (PID, VSC y MFS) poseen un desempeño muy similar, manteniendo una buena regulación. Mientras tanto, en la Figura 3b, se visualiza el nivel de potencia de transmisión requerida para las seis estrategias. A continuación, considerando $\gamma^{obj}=7$ dB, el error porcentual absoluto medio (MAPE) para N muestras de datos se puede definir como:

$$MAPE = \frac{1}{N} \frac{\sum_{k=1}^{N} |\gamma^{obj} - \gamma[k]|}{\gamma^{obj}}. \tag{15}$$
 Con el objetivo de determinar que algoritmo tiene mejor

desempeño en términos de error porcentual absoluto medio y nivel de potencia de transmisión acumulada (NPTA), se muestra en la Tabla 3 una comparación de las estrategias de asignación de potencia evaluadas en este trabajo, donde el mejor desempeño lo obtiene el MFS seguido del control VSC. Por otro lado, el peor desempeño lo obtienen los esquemas de control FS, FM y WF. Además, se presenta la evaluación para una transmisión con los siguientes niveles de potencia fijos: 3, 4, 5, 6 y 7 dB, donde se puede observar que el error porcentual promedio es mayor con respecto a un control dinámico, como se muestra en dicha tabla. En ese sentido, en la Figura 4a, se muestran los resultados obtenidos al evaluar el SINR para los diferentes niveles de potencia de transmisión fijos, donde se demuestra que estos niveles de potencia no son capaces de seguir la referencia en la etapa dinámica. Del mismo modo, en la Figura 4b, se ilustra los diferentes niveles de potencia de transmisión constantes.

5. CONCLUSIONES

En este artículo, se evaluaron seis estrategias de control de potencia para MWSNs: paso-fijo, Foschini-Miljanic, proporcional-integral-derivativo, estructura variable, rellenado de agua y paso-fijo modificado (Campos-Delgado and Luna-Rivera, 2013). Para la corrección del nivel de potencia de transmisión, se propuso una estimación de la SINR a través de las métricas RSSIp y RSSIg obtenidas

Cuadro 3. Error porcentual absoluto medio y NPTA.

Algoritmo	Error porcentual	NPTA
	absoluto medio	
FS	0.0590	681
FM	0.0850	736
PID	0.0493	759
VSC	0.0534	636
WF	0.0600	874
MFS	0.0422	558
Nivel de potencia 3	0.2234	300
Nivel de potencia 4	0.1110	400
Nivel de potencia 5	0.1152	500
Nivel de potencia 6	0.0983	600
Nivel de potencia 7	0.1046	700

bajo el estándar IEEE 802.15.4. Los resultados de la evaluación experimental indican que el algoritmo de pasofijo modificado (propuesta de este trabajo) tiene el mejor desempeño de los controladores candidatos disponibles en este trabajo. Además, los resultados muestran que en general un esquema de asignación de potencia dinámico no sólo ayuda a ahorrar el consumo de energía de la batería, sino que también es capaz de alcanzar la QoS deseada a pesar de la movilidad de cada nodo en comparación con un esquema de potencia constante. La comparación de los algoritmos de asignación de potencia se llevó a cabo con un solo nodo móvil. Por lo tanto, como trabajo a futuro se propone evaluar una red con varios nodos móviles, y por consiguiente la capacidad de esta red se verá limitada por la interferencia de acceso múltiple. Debido a esto, es importante el control de potencia en la red con la finalidad de alcanzar los requerimientos de la QoS demandados por los nodos móviles usando el mínimo consumo de recursos posible.

REFERENCIAS

Campos-Delgado, D.U. and Luna-Rivera, J.M. (2013). Performance study of distributed power control algorithms under time-delays and measurement uncertainty. Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina), 7(4), 690–697.

Foschini, G.J. and Miljanic, Z. (1993). A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *IEEE transactions on vehicular Technology*, 42(4), 641–646.

Fu, Y., Sha, M., Hackmann, G., and Lu, C. (2012). Practical control of transmission power for wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 2012 20th, 1–10. IEEE.

Instruments, T. (2014). 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBeeready RF Transceiver.

Jeong, J., Culler, D., and Oh, J.H. (2007). Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. In Fourth International Conference on Networked Sensing Systems, 2007. INSS'07., 27–34. IEEE.

Lin, S., Miao, F., Zhang, J., Zhou, G., Gu, L., He, T., Stankovic, J.A., Son, S., and Pappas, G.J. (2016). Atpc: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* (TOSN), 12(1), 6.

Mohammed, D., Mokhtar, K., Abdelaziz, O., and Abdelkrim, M. (2010). A new imm algorithm using fixed coef-

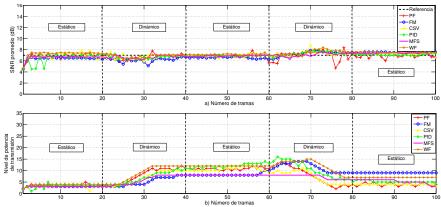


Figura 3. Desempeño de los diferentes algoritmos de control de potencia en lazo-cerrado: a) SINR promedio contra número de tramas. b) Nivel de potencia de transmisión contra número de tramas.

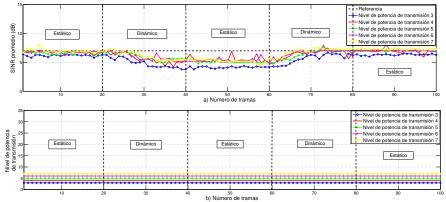


Figura 4. Desempeño de los diferentes niveles de potencia fijos: a) SINR promedio contra número de tramas. b) Nivel de potencia de transmisión contra número de tramas.

ficients filters (fastimm). AEU-International Journal of Electronics and Communications, 64(12), 1123–1127.

Mukhopadhyay, B., Sarangi, S., and Kar, S. (2015). Performance evaluation of localization techniques in wireless sensor networks using RSSI and LQI. 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC), (1-6).

Papadopoulos, G.Z., Kotsiou, V., Gallais, A., Chatzimisios, P., and Noel, T. (2016). Low-power neighbor discovery for mobility-aware wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 48, 66–79.

Paul, A., Akar, M., Safonov, M.G., and Mitra, U. (2005). Adaptive power control for wireless networks using multiple controllers and switching. *IEEE Transactions* on Neural Networks, 16(5), 1212–1218.

Qi, Q., Minturn, A., and Yang, Y. (2012). An efficient water-filling algorithm for power allocation in OFDMbased cognitive radio systems. In 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), 2069–2073.

Qin, F., Dai, X., and Mitchell, J.E. (2013). Effectivesnr estimation for wireless sensor network using kalman filter. Ad Hoc Networks, 11(3), 944 – 958.

Seungku, K., Seokhwan, K., and Doo-Seop, E. (2013). RSSI/LQI-Based transmission power control for body area networks in healthcare environment. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 17(3).

Srinivasan, K. and Levis, P. (2006). Rssi is under appreciated. In Proceedings of the Third ACM Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006). Tenne, D. and Singh, T. (2002). Characterizing performance of alpha;- beta;- gamma; filters. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 38(3), 1072–1087.

Uykan, Z. and Koivo, H.N. (2006). Variable structure power control algorithm in mobile radio systems. IEEE Transactions on Wireless Communications, 5(10), 2633–2637.

Vlavianos, A., Law, L.K., Broustis, I., Krishnamurthy, S.V., and Faloutsos, M. (2008). Assessing link quality in IEEE 802.11 wireless networks: Which is the right metric? 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1–6.

Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. Computer networks, 52(12), 2292–2330.

Yu, W., Ginis, G., and Cioffi, J.M. (2002). Distributed multiuser power control for digital subscriber lines. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 20(5), 1105–1115.

Zolertia (2013). Z1 Starter Platform Datasheet.