

# Evaluación sobre la Calidad de un Enlace Inalámbrico para Transmisor con Batería Li-Ion

T. A. Cortes Aguilar<sup>#1</sup>, A. Tovar Arriaga<sup>\*2</sup>

<sup>#</sup> Tecnológico Nacional de México: Departamento de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Zapopan, Jalisco, México

<sup>\*</sup> Tecnológico Nacional de México: Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Zapopan, Jalisco, México

<sup>1</sup>teth.cortes@zapopan.tecmm.edu.mx, <sup>2</sup>adriana-tovar@zapopan.tecmm.edu.mx

**Resumen**—La tasa de recepción de paquetes de datos en una red de sensores inalámbricos es un parámetro importante que determina la calidad de un enlace punto a punto. Sin embargo, este parámetro puede verse afectado por la distancia del transmisor al receptor, así como de la energía disponible para el transmisor, principalmente si tiene su fuente en baterías recargables de Ion de Litio. Para una aplicación real, el tiempo que la batería puede suministrar energía al transmisor no solo depende de la carga almacenada sino del voltaje umbral para el cual el circuito de protección desactiva la salida por sobre descarga. En este artículo presentamos los resultados experimentales sobre la calidad y tiempo de vida útil de un enlace inalámbrico para un transmisor alimentado mediante una batería de Ion de Litio.

**Palabras clave**—Batería de Ion de Litio, Redes de Sensores Inalámbricos, Tasa de Recepción de Paquetes.

## I. INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Networks*) es una red inalámbrica de estructura jerárquica que permite la comunicación entre dos tipos de dispositivos, un nodo coordinador que se encarga de administrar las comunicaciones con otros nodos inferiores denominados nodos sensores y que a su vez se encargan de controlar actuadores y transductores [1-2].

El consumo de energía es uno de los desafíos que enfrentan el desarrollo de una WSN, en particular para los sistemas que requieren que cada nodo sensor tenga su propia batería. Por otro lado, utilizar módulos de comunicación más potentes para elevar el rango de alcance o reducir la tasa de errores en las transmisiones incrementa el costo de implementación y el consumo de energía. No obstante, para muchas aplicaciones es conveniente reducir el consumo de energía y el costo de los transceptores.

La implementación de una WSN tiene restricciones importantes, cuando los nodos inferiores funcionan con baterías, debido a que su reemplazo se asocia con altos costos de operación. En consecuencia, es necesario estimar con precisión el tiempo de vida de la batería y considerar que la calidad del enlace de radiofrecuencia se ve afectada por la reducción de la energía almacenada en la batería.

En la actualidad, las baterías de ion de Litio (*Li-ion*) han ganado popularidad por su uso en vehículos eléctricos [3]

equipos de cómputo, teléfonos móviles, sistemas IoT [2], en redes inalámbricas [1] y en muchas otras aplicaciones debido a sus características técnicas de seguridad intrínseca, estabilidad térmica, menor toxicidad para el medio ambiente, larga duración, alta densidad de energía, disponibilidad de materias primas, bajo costo y una curva de tensión relativamente plana [4].

El presente artículo está dividido de la siguiente forma, en la sección II se describe el método utilizado para la adquisición de los datos experimentales, así como las especificaciones técnicas del transceptor y la batería de Li-ion. También se incluye una descripción de los sistemas de gestión de la energía en baterías. En la sección III se presenta una comparación de los métodos teóricos usados para la estimación de la carga de la batería. En la sección IV se presentan los resultados y en la sección V las conclusiones.

## II. MÉTODO

Para la obtención de los resultados experimentales se usó una conexión punto a punto entre un transceptor configurado como transmisor, que envía 100 paquetes de prueba hacia otro transceptor configurado como receptor. Para el control de la transmisión y recepción de los paquetes de prueba se utilizó una tarjeta Arduino uno conectada al transceptor. El cálculo de la tasa de paquetes recibidos con éxito PRR (*Packet Reception Rate*) se llevó a cabo en el circuito receptor y el registro de las mediciones se realizó en tiempo real a través de una computadora.

### A. Transceptor

En el presente trabajo se utilizó el transceptor NRF24L01 del fabricante Nordic Semiconductor [5], ver Fig. 1. Cabe señalar, que este transceptor se ha usado anteriormente para aplicaciones de bajo costo en WSN [1]. Para la obtención de las mediciones de PRR, se modificó la potencia del transmisor dentro de sus parámetros de configuración permitidos de -18dBm, -12dBm, -6dBm y 0dBm y para cada una de las distancias de experimentación de 1m, 5m, 10m, 15m, y 20m. Todos los paquetes de prueba enviados se reciben sin errores, cuando el cálculo de PRR es igual 1.



Fig. 1. Transceptor de radiofrecuencia NRF24L01 y especificaciones técnicas relevantes.

## B. Batería Li-ion

El nodo sensor configurado para enviar los paquetes de prueba hacia el receptor se conectó a la batería de Li-ion de la Fig. 2. Para obtener los datos experimentales de voltaje contra tiempo de la Fig. 3 y de tiempo contra corriente de carga de la Fig. 4 se conectó a la batería una carga resistiva además de los circuitos del transceptor para simular un consumo de corriente de 500 mA, 425mA, 350mA, 325mA y 150mA con el propósito de acortar los tiempos de descarga de la batería. Cabe señalar, que para una aplicación real, el consumo de energía es muy bajo, alrededor de 15mA en modo de transmisión activa, además el consumo de energía se puede reducir hasta 3mA cambiando la configuración del transceptor a modo *Sleep* y alargando el tiempo de muestreo del sensor. Este ajuste prolongaría el tiempo de descarga hasta en 7 días, y no es un tiempo viable para los varios experimentos realizados en el presente trabajo, por esta razón, se decidió aumentar artificialmente el consumo de corriente.



Fig. 2. Imagen y especificaciones técnicas relevantes de la batería de alimentación del transmisor.

## C. Sistema de gestión de la Batería.

Las baterías de Li-ion utilizan un sistema de gestión de la energía BMS (*Battery Management System*) que tiene como propósito proteger tanto a la batería como al dispositivo de carga. La falta de un BMS puede dañar las celdas de la batería y llegar a provocar un incendio. La mayoría de las baterías comerciales integra un BMS para cortar el suministro de energía cuando se detecta un funcionamiento anómalo [6]. Las fallas típicas contra las que ofrecen seguridad los BMS son las siguientes.

*Sobre carga:* La regulación de voltaje o corriente se usa para evitar que las celdas tomen demasiada energía, demasiado rápido y se sobrecarguen. En circuitos simples, se utilizan reguladores lineales para limitar el voltaje o la corriente. En circuitos más avanzados, se usa un microcontrolador ( $\mu C$ ) para monitorear y controlar las funciones de carga. El método de protección de las celdas de iones de litio requiere un método de carga de corriente constante sobre voltaje constante en dos etapas.

*Sobre descarga.* La descarga de la batería hará que el voltaje de la celda caiga. Esta protección monitorea el voltaje de la celda, apagando la salida cuando el voltaje cae por debajo de un umbral preestablecido. La salida no se volverá a encender hasta que el voltaje de la celda se eleve nuevamente. La protección contra sobre descarga puede ocurrir prematuramente si la energía consumida por la carga es demasiado alta, pero no lo suficientemente alta como para activar la protección contra cortocircuitos.

*Protección contra cortocircuito.* Cuando una carga extrae demasiada corriente de la salida de la batería, el circuito de protección desconecta la salida. En ocasiones, esta función requiere restablecer manualmente la batería, incluyendo la desconexión y reconexión de la carga.

*Exceso de temperatura.* Si las celdas se cargan o descargan demasiado rápido entonces las reacciones químicas que tienen lugar en su interior pueden generar un calor excesivo. El circuito de protección puede ser un interruptor térmico o un  $\mu C$  que registra los cambios de una resistencia térmica y desactiva la entrada o salida de la batería hasta que la temperatura haya vuelto a las condiciones normales de funcionamiento.

## III. MÉTODOS TEÓRICOS DE ESTIMACIÓN DE *SoC*

El estado de carga de la batería *SoC* (*State of Charge*) expresado como porcentaje, no se puede medir directamente, de ahí que en años recientes se han propuesto muchos enfoques para estimar el *SoC* [7]. Aunque se han publicado numerosos métodos de cálculo, aún se necesitan soluciones de estimación más precisas, eficientes y confiables para aplicaciones reales [8]. En la Tabla I se presenta una comparación de los cinco métodos de estimación del *SoC*.

El estado de carga de la batería se puede definir como la relación entre la carga almacenada en un instante de tiempo  $\mu(t)$  sobre la capacidad nominal  $\mu_n$  de la batería [9].

$$SoC(t) = \frac{\mu(t)}{\mu_n} \quad (1)$$

El *SoC* también se puede estimar mediante el método de conteo de Coulomb de la ecuación (2), donde  $SoC(t - 1)$  es la carga inicial de la batería,  $i(t)$  es el consumo de corriente y  $\Delta t$  es un intervalo de tiempo.

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{i(t)}{\mu_n} \cdot \Delta t \quad (2)$$

El tiempo de vida de la batería TVB se puede estimar mediante la ecuación (3), a partir de conocer la carga actual

de la batería  $C_{bat}$  en mAh, la corriente de descarga  $I$  y un factor  $c$  asociado a la rapidez de descarga.

$$TVB = \frac{C_{bat}}{I} \cdot c \quad (3)$$

De la ecuación (3) se deduce que un incremento en la corriente de descarga o un porcentaje bajo en la carga actual de la batería reduce de TVB.

TABLA I  
MÉTODOS TEÓRICOS DE ESTIMACIÓN DEL  $SoC$

Método	Ventaja	Desventaja
Conteo de Coulomb	Calcula el $SoC$ a través de la integración de la corriente y tiene una alta eficiencia computacional	Su precisión es sensible al $SoC$ inicial y la acumulación de la medición actual.
Voltaje de circuito abierto OCV ( <i>Open Circuit Voltage</i> )	Se adapta a la caracterización de una curva no lineal de respuesta de la batería, también considera la temperatura.	Depende de la relación entre $SoC$ y OCV. Además el largo tiempo de relajación de la batería para medir el OCV lo hace impráctico para estimaciones en tiempo real [10].
Espectroscopia de impedancia	Mide la impedancia de una celda de batería en diversas frecuencias	Requiere sensores costosos y es difícil de medir con precisión
Redes neuronales	Tienen alta precisión.	Están fuertemente relacionadas con las muestras de entrenamiento
Estimación basada en modelos	En general tienen un rendimiento superior	Dependen de un modelo exacto de la batería.

#### IV. RESULTADOS

En la Fig. 3 se observa que el voltaje en la batería decae conforme transcurre el tiempo para un consumo constante de corriente eléctrica. A menor consumo de corriente se registra un mayor tiempo de descarga. Las mediciones se hicieron con un  $SoC$  inicial del 95%. Cuando el voltaje alcanzó el límite inferior de 6 volts, el BMS de la batería detecta una falla por sobre descarga y desconecta la salida. Para reiniciar las mediciones con otra corriente de carga se desconectó la batería del circuito transceptor y fue necesario restaurar la carga almacenada en la batería a través del conector micro USB.

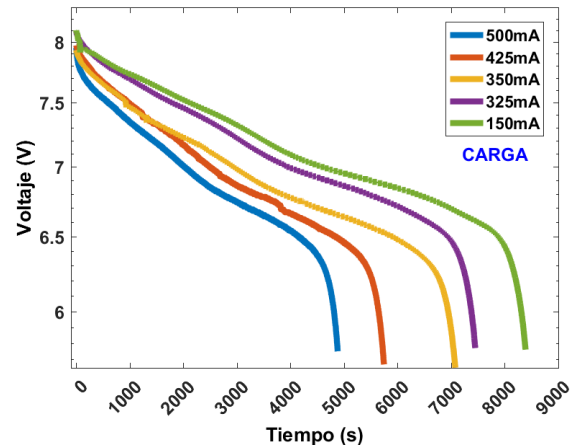


Fig. 3. Descarga de la batería de Li-ion, graficas de voltaje contra tiempo para diferentes corrientes de carga.

En la Fig. 4 se muestran una comparación entre las gráficas del tiempo de vida de la carga almacenada en la batería para los resultados experimentales y los datos teóricos estimados con la ecuación (3), considerando un factor de descarga  $c = 1$ . Un incremento en el consumo de corriente agotará más rápidamente la energía de la batería reduciendo su tiempo de vida útil antes de necesitar ser recargada. A excepción de la carga de 150mA, los resultados teóricos son cercanos a los resultados experimentales

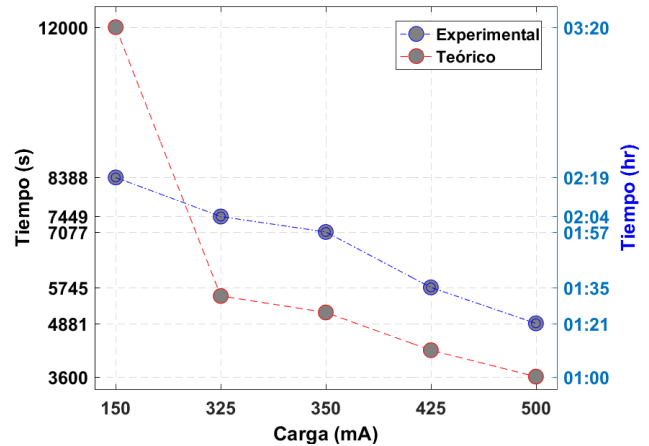


Fig. 4. Grafica de tiempo de vida de la batería de Li-ion contra corriente de carga.

En la Fig 5 se muestra que la cantidad de paquetes recibidos con éxito PRR, se reduce conforme se aleja el transmisor del receptor. También es importante notar que la cantidad de comunicaciones con un  $PRR < 1$  se incrementa conforme se reduce el voltaje en la batería de Li-ion. Los datos de la Fig. 5 se obtuvieron configurando la potencia del transmisor para los cuatro parámetros permitidos, indicados en las especificadores técnicos de la Fig. 1.

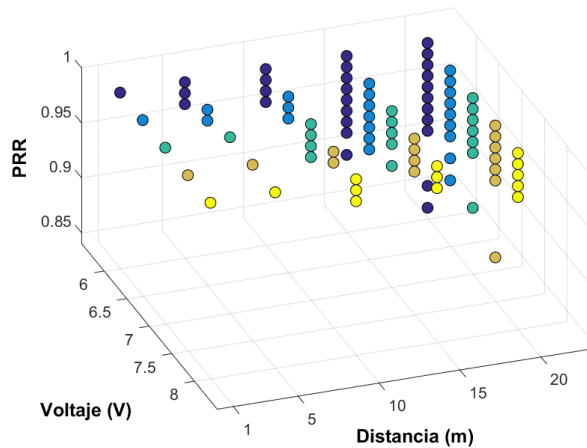


Fig. 5. Grafica de dispersión de voltaje en la batería de Li-ion y distancia del transmisor al receptor contra la tasa de paquetes recibidos con éxito PRR.

### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró para un sistema de comunicación punto a punto, utilizando una batería comercial de Li-ion y el transceptor de bajo costo NRF24L01, que la cantidad de paquetes recibidos con éxito PRR depende tanto de la distancia de separación entre el transmisor y el receptor como del voltaje de alimentación en la batería del transmisor. A su vez, el tiempo de vida útil de la batería para un ciclo de descarga, depende tanto del consumo de corriente como del tiempo de detección de falla por sobre descarga del circuito BMS, que desactiva la salida de la batería antes de descargarse por completo.

Los resultados experimentales muestran que la desconexión de la batería por sobre descarga ocurre cuando al tensión en la batería se reduce por debajo de los 6 volts, y la mayor pérdida en la calidad del enlace inalámbrico con mediciones de  $PRR < 1$  ocurre cuando el voltaje de la batería es de 6 volts y para la distancia de separación máxima registrada, de 20 metros; antes de alcanzar el límite de operación de transceptor determinada a treinta metros.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Unidad Académica Zapopan del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez

por el apoyo parcial para la realización del presente proyecto. También agradecemos al estudiante Paulo Javier Arredondo López de la carrera Ingeniería Electrónica por su contribución en la adquisición de los datos experimentales.

### REFERENCIAS

- [1] E. Mendoza, P. Fuentes, I. Benítez, D. Reina, y J. Núñez, “Red de sensores inalámbricos multisalto para sistemas domóticos de bajo costo y área extendida”, *Rev. iberoam. autom. inform. ind.*, vol. 17(4), pp. 412–423, sep. 2020.
- [2] B. Mazon-Olivo and A. Pan, “Internet of Things: State-of-the-art, Computing Paradigms and Reference Architectures”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20(1), pp. 49–63, May 2021.
- [3] D. Trujillo and E. M. García Torres, “Demand response due to the penetration of electric vehicles in a microgrid through stochastic optimization”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20(4), pp. 651–658, Jul. 2021.
- [4] F. Gómez, L. Yebra, A. Giménez, y J. Torres Moreno, “Modelado de baterías para aplicación en vehículos urbanos eléctricos ligeros”, *Rev. iberoam. autom. inform. ind.*, vol. 16(4), pp. 459–466, sep. 2019.
- [5] nRF24 Series, (Marzo 2008) Nordic Semiconductor, [www.nordicsemi.com](http://www.nordicsemi.com)
- [6] M. U. Ali, A. Zafar, S. H. Nengroo, S. Hussain, M. J. Alvi, and H.-J. Kim, “Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications: A Critical Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation”, *Energies*, vol. 12(3), pp. 446, Jan. 2019.
- [7] R. Zhang et al., “A Study on the Open Circuit Voltage and State of Charge Characterization of High Capacity Lithium-Ion Battery Under Different Temperature,” *Energies*, vol. 11(9), pp. 2408, Sep. 2018.
- [8] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D.-I. Stroe, and R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles,” *Applied Sciences*, vol. 8(5), p. 659, Apr. 2018.
- [9] R. Lajara, J. J. Pérez-Solano and J. Pelegrí-Sebastiá, “Predicting the Batteries' State of Health in Wireless Sensor Networks Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65(11), pp. 8936-8945, Nov. 2018.
- [10] L. Rodrigues, C. Montez, R. Moraes, P. Portugal, and F. Vasques, “A Temperature-Dependent Battery Model for Wireless Sensor Networks” *Sensors*, vol. 17(2), p. 422, Feb. 2017.