

## MODELADO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UNA RED DE SENSORES

Diego Adrián García Córdova, Ángel Humberto Corral Domínguez, Gilberto Enrico Vázquez Alcaraz,  
Manuel de Jesús García Ortega, Andrés Calvillo Téllez<sup>1</sup>, José Cruz Núñez Pérez<sup>1</sup>

Instituto Tecnológico de Tijuana, ITT  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Calzada del Tecnológico S/N, Fraccionamiento Tomás Aquino  
Tijuana, Baja California, C.P. 22414  
Tel.: (664) 607-8400, ext. 218

<sup>1</sup>Centro de Investigación y desarrollo de Tecnología Digital, CITEDI-IPN  
Av. Instituto Politécnico Nacional 1310 Garita de Otay Tijuana, Baja California, C.P. 22510  
E-mail: ahcorral@yahoo.com, electronica@tectijuana.mx, mdejgaro@yahoo.com,  
gilberto\_alcaraz@yahoo.com, calvillo@citedi.mx, nunez@citedi.mx

### RESUMEN.

Se presenta la caracterización del consumo de energía en una red de sensores inalámbricos fijos, considerando el gasto en energía que generan tres situaciones, cuando transmiten, procesan y están inactivos; garantizando la integridad del dato, permitiendo que el alcance de conectividad inalámbrica entre nodos donde exista línea de vista, libre de obstáculos, estimando el indicador de intensidad de señal, en la frontera del radio de cobertura y que maximice la vida útil del sistema y se prolongue la energía de la batería.

### 1. INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbricos (WSN) estática, se compone de nodos, dispersos sobre un área de cobertura cuya función es adquirir parámetros físicos locales basado en la información obtenida de los alrededores. Cada nodo sensor está equipado con un dispositivo de sensado, un procesador de baja capacidad computacional, un transmisor - receptor inalámbrico y un suministro de energía o fuente de poder finita. Los nodos sensores supervisan algún fenómeno ambiental circundante, procesa los datos obtenidos y los transmite hacia una estación base situada en la periferia de la red de sensores. La estación base se encarga de coleccionar los datos íntegros de los nodos sensores y transmite estos datos a alguna estación de control remoto [1].

Actualmente un tópico que atrae la atención en la comunidad es el de optimizar el consumo de energía para prolongar la vida útil del nodo sensor.



Figura 1. Cobertura de red de sensores con rango de 500m y un nivel de recepción de la señal de -94dbmW.

Considerando que cada nodo de la red debe de colocarse en la área de cobertura donde existe restricción del suministro energético y solo contará con una batería, que garantice la integridad de la comunicación y procesamiento de los parámetros a sensar; la pregunta crucial es: "cómo prolongar en el tiempo la funcionalidad de la red si se tiene que la vida útil de la batería es finita. Por lo tanto, la maximización funcionalidad de la red a través de la minimización de la energía es un reto importante en WSN; los sensores no pueden ser reemplazados fácilmente o recargarse debido a su despliegue [2]. Teniendo en cuenta que el ahorro de energía actúa como uno de los temas más candentes en las redes

de sensores inalámbricos, el objetivo central de éste artículo es obtener el consumo de nodo aplicando la técnica más compatible para el ahorro de energía, considerando que la restricción fundamental se presenta al emplear una red de sensores, el área de cobertura, la conservación de la energía disponible en cada nodo sensor, el tiempo de independencia energética o tiempo de la vida útil del sensor, y garantizar la integridad de los datos desde la adquisición de datos sensados hasta su recepción en el nodo central.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Cobertura del enlace.

Estimando el consumo de energía requerida para transmitir un dato, el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI del inglés, Received Signal Strength Indicator), se puede observar en la figura 2 como la cantidad de energía que estará arribando en el receptor cuando la señal recorra la distancia del rango.

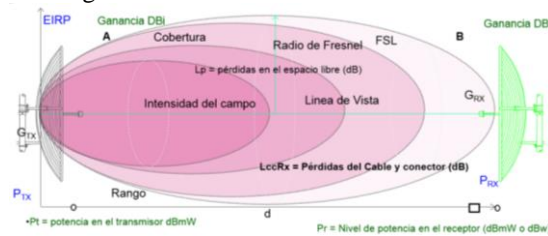


Figura 2. Cobertura del rango de alcance a 500m y un nivel de recepción de la señal de -80dbmW.

Para asegurar que exista la comunicación entre transmisor y receptor xbee como en [3], se llevó a cabo la estimación del presupuesto de radiocomunicación como en [4-6], considerando la frecuencia de operación, la distancia de separación entre transmisor y receptor, las atenuaciones que se presentan en la línea de comunicación y la conexión entre el amplificador de salida y la antena transmisora, con estos parámetros se determinó que potencia estaría a la entrada del receptor y considerando el umbral de recepción o el ruido de piso, finalmente se calculó el margen de desvanecimiento de la señal.

Un factor muy importante que hay que considerar para asegurar la efectividad del enlace es la claridad óptima que presentan este tipo de enlaces al no haber obstrucciones y cuyas reflexiones se consideran de pequeña señal como en [7, 8]. De acuerdo con la teoría de ondas electromagnéticas un frente de onda tiene propiedades de expansión conforme viaja a través del espacio, estas propiedades ocasionan reflexiones y cambios de fase cuando la onda choca con un obstáculo como

en [9]. Esto produce un incremento o disminución en el nivel de señal recibida.

La Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), es la potencia equivalente que radia la antena para alcanzar la misma densidad de potencia en la dirección seleccionada en un punto de recepción. Su valor es la suma algebraica de la potencia transmitida, la ganancia de la antena transmisora y la atenuación en cables y conectores, y se calcula con la siguiente ecuación como en [10]:

$$PIRE_{[dBmW]} = P_T - L_c - L_{LT} + G_T \cdot (1)$$

$P_T$  = Potencia del transmisor [dBmW] = 16.5 dBmW,

$G_T$  = Ganancia de la antena transmisora = 1.5 dB,

$f$  = 2.4 GHz,

$G_R$  = Ganancia de la antena receptora = 1.5 dB,

$L_{LT}$  = Pérdidas por la línea de transmisión = 0.2 dB

$L_c$  = Pérdidas por el conector = 0.2 dB

Con los parámetros anteriores podemos determinar que:

$$PIRE = 16.5 \text{ dBmW} - 0.2 \text{ dB} - 0.2 \text{ dB} + 1.5 \text{ dB},$$

$$PIRE = 17.6 \text{ dBmW}$$

Evaluando la ganancia que tiene el sistema, lo obtenemos al sumar de todas las ganancias que influyen en la señal conforme se propaga en el espacio libre, desde el transmisor hasta el receptor. Esto es:

$$G_s[dB] = P_T + G_T + G_R \cdot (2)$$

$$G_s = 16.5 \text{ dBW} + 1.5 \text{ dBi} + 1.5 \text{ dBi}, G_s = 19.5 \text{ dBW}$$

Las pérdidas por propagación en el espacio libre son las pérdidas que sufre la señal conforme se propaga en línea recta a través del espacio sin ninguna absorción o reflexión de los objetos cercanos. De [3] o [4], la expresión para la pérdida de trayectoria en el espacio libre es:

$$PPEL_{[dB]} = 92.44 \text{ dB} + 20 \log(f)_{GHz} + 20 \log(d)_{Km} \cdot (3)$$

$$PPEL = 92.44 \text{ dB} + 20 \log(2.4) + 20 \log(1.0), PPEL = 100.05 \text{ dB}$$

La potencia de recepción es la cantidad de energía radioeléctrica que está presente en el sitio de recepción, y es la potencia que llega a la antena en el receptor más la ganancia de la antena receptora, es decir:

$$P_R[dBmW] = EIRP - FSL + G_R \cdot (4)$$

$$P_R = 17.6 \text{ dBmW} - 100.05 \text{ dB} + 1.5 \text{ dBi}, P_R = -80.95 \text{ dBmW}$$

La cantidad de energía radioeléctrica que está presente después de la línea de recepción y de la atenuación de los conectores, denominada nivel de recepción de la señal, es el nivel de potencia a la entrada del receptor, es decir:

$$NRS_{[dB]} = P_R - L_{LT} - L_c \quad (5)$$

$$NRS = -80.95dBW - 0.20dB - 0.20dB,$$

$$NRS = -81.35 dBW$$

El valor del margen del sistema permite conocer si el radioenlace es proclive a desvanecerse y fallar la radiocomunicación, o si está garantizada, todo dependerá de la magnitud que presente al estimar el presupuesto, si adquiere un valor menor a cero el receptor solo escuchará ruido, si presenta un valor menor a 6 estará en condiciones de presentar efectos de desvanecimiento si se presentan condiciones meteorológicas de neblina o lluvia severas, o que se encuentre en un ambiente donde existan múltiples usuarios que empleen la misma banda de frecuencias. El margen se obtiene restando el nivel de recepción y la sensibilidad del receptor, es decir:

$$M[dB] = NRS - S \quad (6)$$

S = Sensibilidad del receptor.

$$S = -100 dBmW$$

Por lo tanto:

$$M = -81.35 dBmW - (-100) dBmW, M = 18.65 dB$$

## 2.2. Gasto de energía.

Los elementos necesarios mínimos para la construcción de un nodo en la red de sensores inalámbricos se pueden apreciar en la figura 2. Estos elementos son el microcontrolador el cual incluye la CPU y la memoria, módulo de comunicación de RF y el módulo de sensores.

El consumo de energía en un nodo se puede expresar como la ecuación 1 [11-14].

$$E_{nodo} = E_{Transmisor} + E_{CPU} + E_{sensor} \quad (7)$$

dónde:

$E_{cpu}$ , es la energía consumida por el microcontrolador, dada en joules.

$E_{radio}$ , es la energía consumida por los sistemas de transmisión-recepción de radio frecuencia.

$E_{sensor}$ , Es la energía consumida por los sensores del sistema.

Los tres estados de consumo que se presentan son:

1. Estado activo se presenta el mayor gasto = consumo del sensor+consumo del procesador + consumo del transmisor.
2. Estado de reposo, no se presenta sentido ni transmisión,
3. Estado dormido, no hay actividad, o los valores de sentido están en margen confortable.

## 2.3. Consumo de potencia.

Basándose en el consumo de corriente que cita la hoja de datos del fabricante del sistema Arduino como 25mA. Podemos calcular el consumo de corriente de los sensores de humedad y temperatura.

- Corriente medida = 37.1mA
- Corriente de cpu = 25mA
- Corriente del sensor = 12.1mA

Tomando muestreos para los cinco distintos casos de potencia de transmisión en que el módulo Xbee puede operar, se cuantificó que un paquete de datos tarda 12.5ms en ser transmitido, este evento ocurre dentro de los dos picos de corriente mostrados en la figura 3. Dicho evento ocurre cada segundo que se obtiene una nueva medición de los sensores.

Para calcular el valor de potencia consumida durante esta interacción es necesario promediar el valor de corriente durante este periodo, como muestra la fórmula 2.

$$P_{nodo} = P_{Transmisor} + P_{CPU} + P_{sensor} \quad (8)$$

$$P_{Tx} = (I_{Tx}) \left( \frac{\sum \text{muestras}}{\eta \text{muestras}} \right) (V_{Bateria}) (12.5ms) \quad (9)$$

$$P_{CPU} = (I_{CPU}) (V_{Bateria}) (987.5ms) \quad (10)$$

$$P_{sensor} = (I_{sensor}) (V_{Bateria}) (987.5ms) \quad (11)$$

$$P_{nodo} = P_{Transmisor} + P_{CPU} + P_{sensor} \quad (12)$$

## 3. RESULTADOS.

En el caso de los módulos inalámbricos XBee, la distancia óptima para la conexión entre dos de los nodos es de 300m. En la tabla 1 se muestran los distintos enlaces con el valor del Indicador de intensidad de señal recibid, para una distancia dada, que de acuerdo con esta, no se recomiendan valores menores a -80 dBm por el desvanecimiento de la señal en ese trayecto lo que pone en riesgo la integridad de los datos disminuyendo la confiabilidad en el enlace.

Tabla 1. RSSI y porcentaje de paquetes exitosamente enviados-recibidos utilizando la máxima potencia de los módulos xbee a 63mW

Enlace	Paquetes ok	RSSI
30m	99%	-42 dBm
100m	99%	-64 dBm
300m	99%	-80 dBm
500m	98%	-94 dBm

Tabla 2. Potencia consumida en los distintos niveles de transmisión del módulo Xbee.

Nivel de transmisión	Potencia promedio de transmisión	Potencia consumida por ciclo con espera
P0	7.484998 mW	226.709998 mW
P1	7.494436 mW	226.719436 mW
P2	7.745195 mW	226.970196 mW
P3	8.017694 mW	227.242695 mW
P4	8.564810 mW	227.789810 mW

Para corroborar esta afirmación, se repitió el método de medición utilizando una modalidad de espera programada en el microcontrolador, donde este desconecta al módulo de transmisión Xbee de la red y haciendo que este se apague una vez que los datos sean transmitidos, reconectándolo a la red cuando el ciclo comienza y sea necesario transmitir de nuevo, la tabla 3 presenta estas nuevas mediciones.

Tabla 3: Potencia consumida en los distintos niveles de transmisión del módulo Xbee con algoritmo de espera.

Nivel de transmisión	Potencia promedio de transmisión	Potencia consumida por ciclo
P0	7.484998 mW	534.704810 mW
P1	7.494436 mW	534.157695 mW
P2	7.745195 mW	533.885196 mW
P3	8.017694 mW	533.634436 mW
P4	8.564810 mW	533.624998 mW

Para cuantificar el ahorro energético que refleja este cambio de algoritmo en la captura y comunicación se prepara la tabla 4, donde se analiza el consumo de un nodo en la red en nivel de transmisión máximo lado a lado el sistema normal con el que implementa el ciclo de espera.

Tabla 4: Resultados de consumo de un nodo en la red con y sin programación de espera.

	Potencia 4	Potencia 4 con Espera
C_cpu	25 mA	25 mA
C_sensor	12.1 mA	12.1 mA
C_radio	52.01 mA	0.86 mA
C_Total	89.11 mA	37.96 mA
P_Ciclo	0.53470 W	0.22778 W
P_Hr	32.08228 W/Hr	13.66738 W/Hr

En la figura 3 se muestra el consumo de energía en las distintas etapas de conexión en un nodo de la red de sensores en el nivel de potencia 4 de transmisión del módulo Xbee (Potencia Máxima). Las mediciones de la forma de onda de corriente fueron realizadas con la opción de captura de pantalla en un osciloscopio de 1Gs/s; utilizando una resistencia de  $1\Omega$  en serie con el nodo para el análisis de corriente.

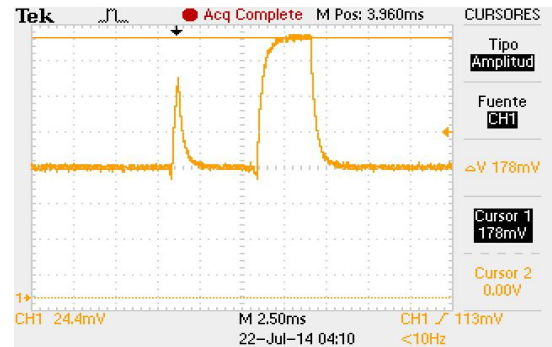


Figura 3. Consumo de corriente del microcontrolador más el transmisor-receptor y sensor a potencia máxima.

El sistema es energizado mediante 4 baterías AA (LR6) alcalinas conectadas en serie, lo cual nos da el voltaje necesario para la operación deseada del sistema y a su vez nos dicta el tiempo máximo en el que la red será capaz de mantener comunicación; este parámetro puede ser calculado gracias a la curva de descarga característica (presentada en la figura 4) de estos modelos de baterías.

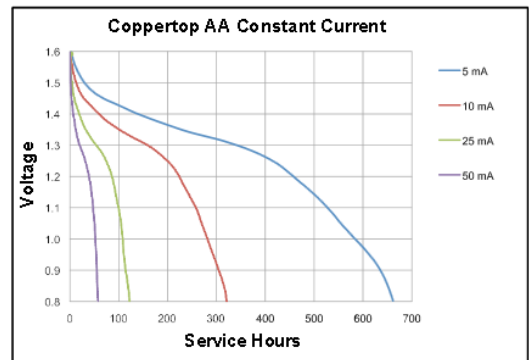


Figura 4. Curva de descarga típica en baterías Duracell AA(LR6) MN1500 alcalinas de dióxido de manganeso

Debido a la conexión de las baterías en serie, el drenado de corriente que estas presentan durante su uso es igual para cada una de ellas, es por esto que se extrapola la forma de la curva de descarga al sistema de 6 Volts, teniendo en claro que en la



permuta de valores, las horas de servicio se mantendrán constantes si estas se comparan contra el consumo de corriente y no el de potencia. Como valores iniciales de prueba, se caracterizó el consumo de uno de los nodos de la red en su estado inherente del sistema de transmisión. Con el tiempo de muestreo del sensor ajustado a una medición por minuto, se captura el evento de conexión entre el nodo y la red, formando la señal de onda descrita en la figura 5.

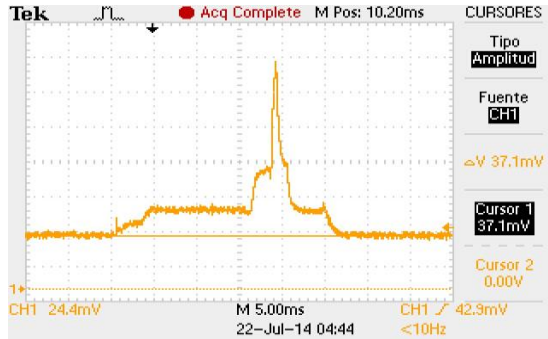


Figura 5: Consumo de corriente del sistema conectándose a la red.

Es notable que aunque la potencia de transmisión varía entre cada nivel como se esperaba, esta no representa un consumo energético predominante sobre el sistema. En la figura 6 se describe el consumo en distintos modos de transmisión, y a su vez se aprecia cómo la varianza de estos es diminuta para el caso de una muestra cada minuto.

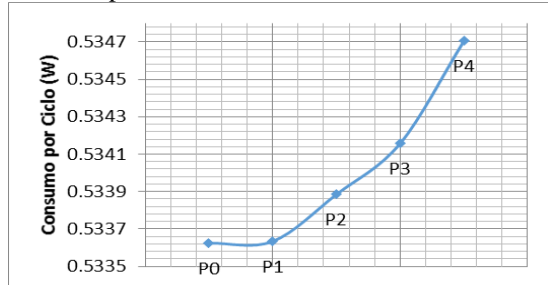


Figura 6. Variación en el consumo de energía, a distintas potencias de transmisión.

Es palpable la drástica reducción en el consumo de potencia de la red al aplicar el sistema de espera en el módulo de transmisión cuanto este no es necesitado, para ejemplificar el ahorro de energía que este cambio representa, se añade la figura 7 en la cual se muestra.

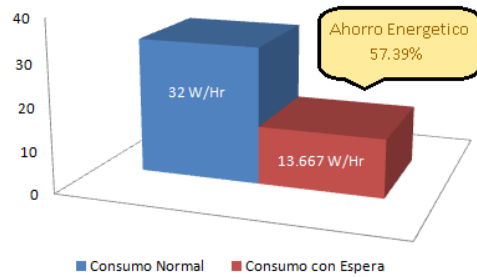


Figura 7. Ahorro Energético Total

#### 4. CONCLUSIONES.

En la Tabla 4 se encuentran descritos los resultados de las mediciones de consumo en los 2 métodos de transmisión probados, esto en el nivel de potencia de transmisión máxima que admite el módulo XBee. Dado que como se demostró en la tabla 3, el incremento de consumo que se genera al transmitir con un nivel de potencia mayor en la antena es despreciable, ya que el tiempo en el que esta energía es consumida es 12.5 mS, que comparado con el ciclo de captura y transmisión de 1 segundo, representa apenas el 1.25 % del tiempo del ciclo.

Por lo que el modelo de red puede operar a su potencia de transmisión máxima sin un consumo excedente, esto en un esfuerzo para que la red opere dentro de los parámetros óptimos de RSSI descritos en la Tabla 1.

De los resultados obtenidos podemos entender que el mayor gasto energético de la red no es la potencia utilizada por la antena, si no el consumo de el modulo mismo, que debido a sus especificaciones, siempre se encuentra en un estado alerta dentro de la red lo cual causa un consumo mayor que la transmisión misma de los datos. Apoyándonos en la descripción de la figura 4 sobre la descarga de las baterías que alimentan el sistema, podemos calcular el tiempo en que el modulo se puede sostener en la red.

Para el caso de operación normal, el consumo es de 89.11 mA, dicho valor no se encuentra tabulado en los valores típicos de descarga, pero podemos inferir mediante la forma de las curvas, que el tiempo de vida al que el microcontrolador de Arduino dejara de operar adecuadamente es de 25 horas, mientras que para el modulo con el algoritmo de espera, su curva de descarga es mucho menos drástica, este pudiendo operar el doble del tiempo con tan solo un consumo de 37.96mA, este quedando mucho más cerca de un tiempo de vida en la red superior a 50 horas, duplicando así, el tiempo en el que el nodo puede operar.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] Z. Rezaei, S. Mobininejad. Energy Saving in Wireless Sensor Networks, International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES) Vol.3, No.1, February 2012.
- [2] Dorottya Vass, Zoltán Vincze, Roland Vida, Attila Vidács. Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks Using Mobile Base Station. IFIP International Federation for Information Processing Volume 196, 2006, pp 173-186
- [3] XBee & XBee-PRO OEM RF Module Antenna Considerations, Application Note XST-AN019a June 2012. [http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a\\_XBeeAntennas.pdf](http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN019a_XBeeAntennas.pdf) consultado el cinco de junio de 2015.
- [4] Freeman, "Radio System Design for Telecommunications", Wiley & Sons, 1987.
- [5] J. D. Parson, "The Mobile Radio Propagation Channel", Wiley & Sons, 1992.
- [6] J. Doble "Introduction to Radio Propagation for Fixed and Mobile, Artech House, 1996.
- [7] H.L. Bertoni, et al., "UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications," Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, pp. 1333-1359, 1994.
- [8] J.B. Andersen, T.S. Rappaport, and S. Yoshida, "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels," IEEE Communications Magazine, pp. 42-49, 1995.
- [9] W.C.Y. Lee, "Mobile Communications Design Fundamentals," Second Edition, Wiley & Sons, 1993.
- [10] CCIR (now ITU-R) Report 567-4, "Propagation data and prediction methods for the terrestrial land mobile service using the frequency range 30 MHz to 3 GHz" International Telecommunication Union, Geneva, 1990.
- [11] CCIR (now ITU-R) Report 567-4, "Propagation data and prediction methods for the terrestrial land mobile service using the frequency range 30 MHz to 3 GHz" International Telecommunication Union, Geneva, 1990.
- [12] A. Gschwender, ZigBee Wireless Sensor and Control Network, Prentice Hall, 2009.
- [13] E. H. Callaway, Wireless Sensor Networks, Segunda ed. USA, Prentice Hall, 2013.
- [14] S. Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Newnes, 2011.