

Design and Implementation of a Low-Cost Prototype System for Continuous Monitoring of Electric Fields Generated by Mobile Base Stations in The 850 MHz and 1900 MHz Frequency Bands

M. A. Quispe, M. Chuchón, R. Adriano and J. Samaniego

Abstract— This paper describes the development of a scalable, autonomous and inexpensive monitoring system of electric fields generated by mobile phone base stations in the 850 MHz and 1900 MHz frequency bands, in Peru. The developed system is scalable because it consists of a ZigBee wireless network with electric field strength sensor and repeater nodes in a mesh topology with a dynamic routing mechanism. Sensor and repeater nodes are autonomous because they get their power from a small photovoltaic system. All electronic circuits were developed using low-cost technology. To manage the system elements and to store the information captured by the sensors, a web platform was developed. Tests in laboratory and field were performed to assess the accuracy of the sensor node. For this, a calibrated isotropic Narda SRM 3000 electric field meter was used. The results were very satisfactory for 1900 MHz frequency band but not for 850 MHz; some recommendations are given to improve the accuracy in the latter case. The performance of the sensor node's photovoltaic system was also assessed through the monitoring of the continuity of the system operation over time. It was verified that the sensor node was kept operating continuously without failures during a three-month test.

Keywords— electric field strength, mesh network, ZigBee, RMS power detector, conversion factor, photovoltaic system.

I. INTRODUCCIÓN

EL AUMENTO de infraestructura de telecomunicaciones correspondiente al servicio de telefonía móvil genera preocupación y malestar en algunos sectores de la población quienes perciben que las emisiones de las estaciones base son una fuente potencial de riesgo para su salud. Por ello, en los últimos años se han presentado muchas confrontaciones entre grupos de vecinos, municipalidades y operadores de telefonía móvil, ocasionando en algunos casos la remoción de estaciones base. Ello causa un retraso en el despliegue de las redes de telefonía móvil, limitando la calidad de servicio que se les brinda a los usuarios. Así, de acuerdo al vice ministerio de comunicaciones del Perú, hay un déficit de alrededor de 14000 estaciones base a nivel nacional, las que deberían ser instaladas antes del año 2016 debido a que las 8000 existentes

actualmente a nivel nacional, no resultan ser suficientes para satisfacer las demandas de un número cada vez mayor de usuarios, los que requieren a su vez de una mayor capacidad de red para el uso de sus aplicaciones. Esta escasez de estaciones base determina a su vez que los niveles de radiación que generan los teléfonos móviles no sean relativamente bajos debido a que ellos emiten mayor potencia cuanto más lejos se encuentren de estaciones de telefonía móvil. Esta situación es especialmente crítica debido a que hace algunos años la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificó a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia como agentes posiblemente cancerígenos [1]. En ese sentido, es necesario que se promuevan iniciativas que permitan reducir los obstáculos que limitan la instalación de nueva infraestructura de telefonía móvil, cuando ésta es realizada en una forma ordenada, racional y supervisada.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en su recomendación K.83: “Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético” provee de instrucciones para realizar mediciones continuas para la supervisión de campos electromagnéticos en áreas públicas, de manera que sea posible brindar información abundante, clara y confiable a la población en general [2] acerca de los niveles de radiación a los que se exponen. El monitoreo continuo permite obtener información actualizada de las emisiones de los campos eléctricos generadas por las estaciones base, información que presentada al público en un formato sencillo y comprensible, le permite estar informado permanentemente de las intensidades de las radiaciones, contribuyendo positivamente a reducir su percepción de riesgo [3].

Los sistemas de monitoreo continuo existentes actualmente en el mercado son relativamente caros (los hay desde \$5000 hasta \$50,000), de manera que su despliegue masivo es casi imposible, especialmente en países en vías de desarrollo. En el presente artículo se describe el diseño e implementación de un nuevo sistema de monitoreo continuo de los campos electromagnéticos, caracterizado por su bajo costo. El desarrollo de las etapas de este sistema resultó ser económico debido a que hoy existen plataformas de hardware y software que permiten la implementación de circuitos basados en microcontroladores de una manera rápida, con resultados fiables y robustos. Asimismo, existen circuitos integrados que implementan funciones complejas en un espacio pequeño, a un costo muy bajo. Por otro lado, hay un incremento en el despliegue de redes inalámbricas de sensores, los que son

M. A. Quispe, Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-UNI), mquispe@inictel-uni.edu.pe

M. Chuchón, Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-UNI), mchuchon@inictel-uni.edu.pe

R. Adriano, Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-UNI), radriano@inictel-uni.edu.pe

J. Samaniego, Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL-UNI), jsamaniego@inictel-uni.edu.pe

alimentados por sistemas fotovoltaicos de pequeñas dimensiones, y también hay disponibles en el mercado una amplia variedad de microcomputadoras económicas que hacen posible su integración en nuevos sistemas electrónicos. Un ejemplo de cómo esto es posible se presenta en [4], en donde se describe el desarrollo de un sistema de bajo costo para el monitoreo no selectivo de los campos eléctricos generados por servicios de comunicaciones en Grecia.

Se estima que el despliegue masivo de sistemas de monitoreo continuo permitirá que las personas obtengan información objetiva, actualizada y permanente de los campos eléctricos en su entorno, con la que comprobarán lo reducido de las intensidades, dando como resultado la disminución de su percepción de riesgo y en consecuencia de su oposición a la instalación de nueva infraestructura de telefonía móvil como 4G y LTE.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO CONTINUO

El sistema de monitoreo consiste de tres elementos básicos: nodos de dos tipos interconectados a través de una topología mallada, un Gateway ZigBee/IP asociado a un módulo ZigBee y un servidor que alberga páginas web asociadas a una base de datos que almacena la información obtenida por los sensores. Dichos elementos son mostrados en la Fig. 1. Algunos de los nodos tienen un sensor de intensidad de campo eléctrico, mientras que otros son utilizados como repetidores de la información que capturan los nodos sensores. Esta información es enviada al Gateway a través de múltiples saltos. Ello es posible debido a que todos los nodos ZigBee utilizados tienen la capacidad de encaminamiento en su firmware.

Todos los nodos, son activados periódicamente y de forma sincronizada (por defecto, cada 30 minutos) para realizar el proceso de medición y transmisión del valor medido al Gateway; para esto, todos los nodos tienen un reloj en tiempo real (Real Time Clock – RTC). Después de que se completa la medición y la transmisión del valor obtenido, todos los nodos, entran en un estado de bajo consumo hasta la siguiente activación. Asimismo, todos los nodos, obtienen su energía de sistemas fotovoltaicos de pequeñas dimensiones, siendo autónomos. Aunque, los nodos están provistos para adquirir energía de la red eléctrica convencional. Estas etapas son descritas a continuación.

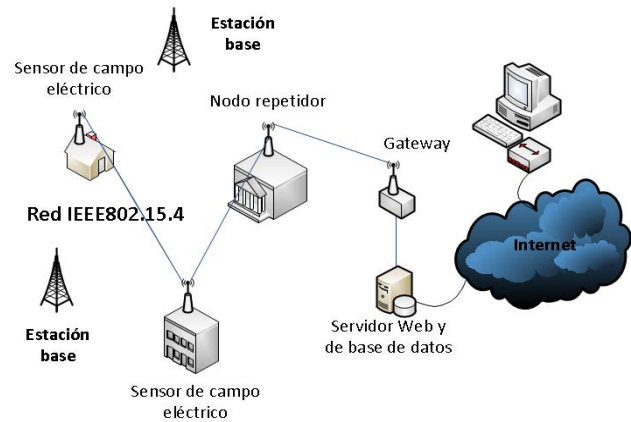


Figura 1. Diagrama de sistema de monitoreo continuo implementado.

A. Nodos sensores

En la Fig. 2 se muestra el diagrama de bloques del nodo sensor desarrollado. Este tiene tres canales de RF independientes, cada uno compuesto de una antena, un filtro pasa banda removible SAW y un detector de potencia RF RMS (Root Mean Square). Las tres antenas son dipolos pentabanda (en bandas comprendidas entre 806 MHz y 2700 MHz) y están conectadas a los filtros pasa banda. Las bandas de operación de las antenas corresponden a aquellas utilizadas por las estaciones base de telefonía móvil actualmente en operación en el Perú.

Cada canal es asociado con una banda de frecuencia específica. Por ejemplo, el canal de 850 MHz tiene un filtro pasa banda con una frecuencia central de 881.5 MHz y un ancho de banda de 25 MHz. El canal de 1900 MHz tiene un filtro pasa banda con una frecuencia central de 1960 MHz y un ancho de banda de 60 MHz. El tercer canal no es utilizado actualmente. La salida de cada filtro es conectado a cada detector de potencia RMS. Los detectores RF utilizados tienen un amplio rango dinámico, un gran ancho de banda y un empaque relativamente fácil de ser montado en un circuito impreso. El chip AD8362 [5] de Analog Devices reúne dichas características ya que realiza una conversión de señales RF a CD (corriente directa) en el rango de 50 Hz a 3.8 GHz, tiene un rango dinámico de entrada de potencia superior a los 65 dB y los valores medidos son independientes de la modulación y de la forma de onda de las señales evaluadas. Además, tiene una relación lineal entre el voltaje de salida y el nivel de potencia de entrada, en decibelios (variable alrededor de 50 mV/dB). Por otro lado, requiere de una fuente de poder de 4.5V a 5.5V y consume solamente 24 mA.

Las señales de CD provenientes de los detectores RF son digitalizadas y procesadas por un microcontrolador ATmega328P. Después de ello, los valores resultantes son enviados al módulo de comunicación ZigBee del nodo sensor, el que envía estos valores a través de la red inalámbrica mallada al nodo Gateway. Todos los nodos, excepto el Gateway, tienen un módulo fotovoltaico apropiadamente dimensionado para proveer energía a todos los elementos del nodo sensor. En la Fig. 3 se muestra la respuesta característica del detector de potencia AD8362 cuando señales sinusoidales de 100 MHz, 900 MHz, 1900 MHz, 2200 MHz y 2700 MHz fueron inyectadas en su terminal de entrada en el modo de operación diferencial. Diferencias menores a 0.3 dB son observadas entre las líneas rectas mostradas de tal manera que,

a efectos prácticos, puede ser considerado que la respuesta del detector de potencia AD8362 es independiente de la frecuencia.

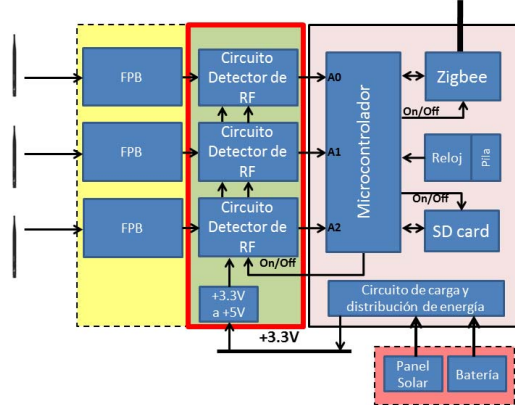


Figura 2. Diagrama de bloques de nodo sensor de campo eléctrico desarrollado.

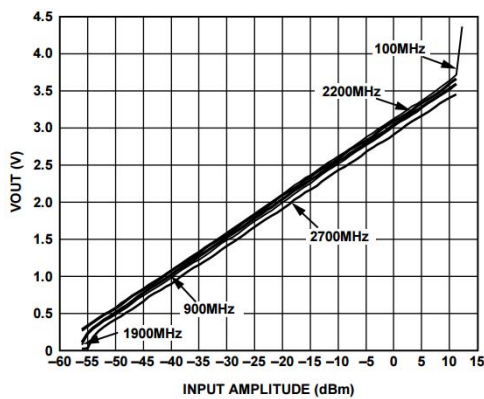


Figura 3. Curva de respuesta de detector de potencia RMS AD8362.

En la Fig. 3 se observa que el mínimo valor de potencia que puede ser medido con el detector es de aproximadamente -56 dBm. Este valor es muy similar a la sensibilidad de muchos sistemas de monitoreo continuo existentes en el mercado hoy en día. La pendiente de la línea recta mostrada, m , es de 50 mV/dB, mientras que su ecuación viene dada por (1). A través de dicha expresión es posible calcular la potencia existente (en dB) a la entrada del detector de potencia, P_{in} , a partir del valor medido en su salida.

$$P_{in}(dBm) = (V_{out}(mV) - V_y(mV)) / m(mV/dB) \quad (1)$$

En la expresión anterior, V_{out} es el voltaje de salida del detector de potencia y V_y es el valor del voltaje de salida obtenido cuando la línea recta mostrada en la Fig. 3 es proyectada hasta su intersección con el eje vertical.

El microcontrolador del nodo sensor digitaliza la señal a la salida del detector de potencia y luego aplica (1) para obtener el valor de potencia correspondiente, el cual es enviado al nodo Gateway a través de la red mallada. El uso de detectores de potencia permite medir potencia, sin embargo, los límites máximos permisibles de radiación no ionizante son expresados en valores de intensidad de campo eléctrico, en V/m. Es entonces necesario convertir el valor de potencia obtenido a un valor de intensidad de campo eléctrico correspondiente. Ello es posible debido a que ambas variables están relacionadas por

una constante. En la sección III se describe el método utilizado para hallar el valor de esta constante. Para implementar el nodo sensor se emplea un módulo Seeeduino Stalker que cuenta con un RTC que permite a todos los nodos de la red (excepto el Gateway) ser activados simultáneamente. Los módulos Seeeduino fueron seleccionados debido a que cuentan también con un socket para módulos ZigBee y un controlador de carga de batería al que se le puede conectar paneles solares pequeños.

B. Nodos repetidores

Los nodos repetidores están formados por un módulo Seeeduino Stalker, un módulo ZigBee, una antena de 2.4 GHz y una pila CR2032. Ellos usan el mismo firmware que los nodos sensores. Debido a que no tienen detectores de potencia RF, solamente envían los valores de su voltaje de batería y temperatura al nodo Gateway.

C. Gateway

El Gateway es el dispositivo que recibe los valores medidos por los nodos sensores, los identifica, procesa la información y finalmente la envía a una base de datos. De esta manera viene a ser la interface que permite la comunicación entre la red ZigBee y la red IP. Para implementar el Gateway, se utilizó una microcomputadora Raspberry PI (RPI) en la que en uno de sus puertos USB se conectó un módulo ZigBee. Este arreglo fue implementado para evitar el uso de una computadora normal, disminuyendo con ello costos de implementación y consumo de energía. Un hub USB fue utilizado para entregar potencia al RPI debido a que éste requiere de una fuente de energía bien estabilizada.

D. Consumo de potencia de nodos sensores y repetidores

Durante su operación, el nodo sensor activa a su detector de potencia por 6 minutos, capturando y procesando las muestras recibidas cada 6 segundos, luego de ello se apaga al detector y se activa al módulo ZigBee por 90 ± 10 segundos. Durante dicho tiempo, el nodo apoya en el establecimiento de la red mallada y envía las mediciones al Gateway. Luego, el nodo ZigBee es deshabilitado, ingresando en un modo de bajo consumo durante un tiempo especificado por el usuario. Esta operación es repetida periódicamente.

Cuando el módulo Seeeduino Stalker y los detectores se encuentran activos (6 minutos), consumen aproximadamente 100 mA. Cuando el módulo Seeeduino Stalker y el módulo ZigBee están activos (90 ± 10 segundos), consumen aproximadamente 50.83 mA y cuando el módulo Seeeduino Stalker y el módulo Zigbee están activos y el módulo ZigBee realiza una transmisión, consumen aproximadamente 166.66 mA. Varios picos de muy corta duración fueron observados cuando el módulo ZigBee intercambiaba paquetes con sus vecinos. Cada uno de los picos duró aproximadamente 2ms. Cuando el nodo sensor se encuentra en un estado de bajo consumo, la corriente que se le suministra es menor a 1 mA. Esto se muestra en la Fig. 4. Con esta información, el consumo de potencia fue calculado en 0.0862W (cuando el período de activación considerado fue de 30 minutos).

De igual forma se realizó el cálculo del consumo de

potencia del nodo repetidor. La variación de corriente es mostrada en la Fig. 5. Con esta información y considerando un período de activación de 30 minutos, se calculó que el consumo de potencia del nodo repetidor es de 0.0141W.

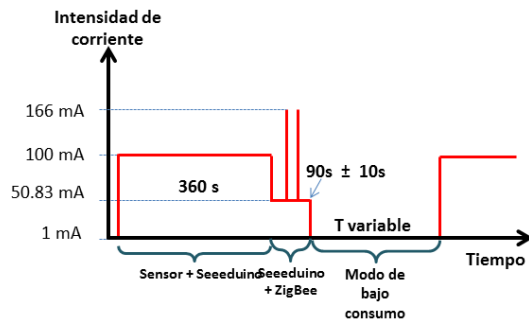


Figura 4. Variación de la corriente eléctrica a través del nodo sensor durante su operación.

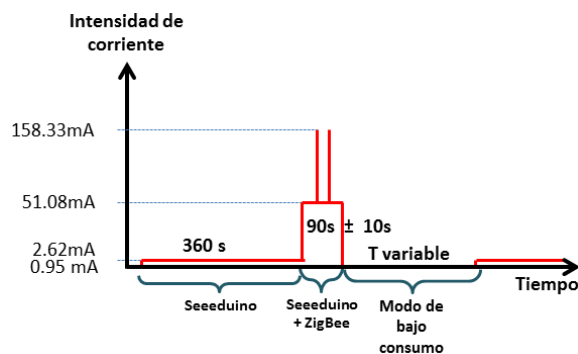


Figura 5. Variación de la corriente eléctrica a través del nodo repetidor durante su operación.

Así, con esta información, se determinó que el nodo sensor requiere de un panel solar monocristalino de 3W y una batería de 3 Ah de capacidad mientras que el nodo repetidor sólo necesita un panel solar monocristalino de 0.5W y de 1 Ah de capacidad de batería.

E. Servidor

Un servidor Web y una base de datos fueron implementados para realizar el almacenamiento y la publicación de la información obtenida por la red de sensores y para gestionar a los elementos del sistema de monitoreo. Así, a través de páginas web un usuario puede observar, sobre un mapa, los últimos valores capturados por cada nodo (sensor y repetidor) y puede verificar los valores históricos de intensidad de campo eléctrico, voltaje de batería y temperatura del nodo. El sitio es accesible a través del enlace <http://atar.inictel-uni.edu.pe/monitoreoRNI/sitiomonitoreado/>

III. FACTOR DE CONVERSIÓN DE VALORES DE POTENCIA A INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO

El detector de potencia RF es utilizado para medir niveles de potencia, sin embargo los valores de los límites máximos permisibles (de acuerdo a terminología del ICNIRP) son expresados en intensidad de campo eléctrico por lo que es necesario convertir la potencia medida por el nodo sensor a un valor de campo eléctrico correspondiente. Estos parámetros se

relacionan por una constante (denominada en este trabajo factor de conversión – FC) cuyo valor depende de los elementos que existen entre la onda electromagnética en el espacio y la entrada del detector de potencia (antena, filtro pasabanda, conector, balún, etc.). Este valor fue hallado de forma experimental comparando la potencia medida por el nodo sensor (en dBm) con la intensidad de campo eléctrico medida con un medidor de campo eléctrico calibrado, con sonda isotrópica Narda SRM3000 (en dBuV/m). La diferencia entre estos valores (en dB/m, [6]) es el factor de conversión. El detalle del procedimiento es descrito a continuación.

El nodo sensor fue programado para enviar cada 6 segundos la potencia medida en cada uno de sus canales (850 MHz y 1900 MHz) a una computadora con una interface ZigBee conectada a ella. En la computadora, un programa se encargó de capturar dicha información para almacenarla en un archivo CSV. En paralelo se utilizó el medidor Narda SRM3000, como equipo patrón para obtener mediciones exactas. Dicho equipo fue configurado para realizar mediciones isotrópicas con el modo de detección promedio (AVG) activo. La ventana de promediado tenía una duración de 6 minutos. El nodo sensor y el medidor fueron colocados uno al lado del otro, a 2 metros de un módulo USRP N210, el que fue utilizado como generador de RF. Luego se generó una señal sinusoidal de baja potencia a la frecuencia de 881.5 MHz. La potencia de salida del USRP fue modificada de forma escalonada desde un valor máximo a uno mínimo mientras se realizaron las pruebas. Cada vez que un nivel de potencia era establecido, por seis minutos aproximadamente, se capturaron muestras del valor de potencia. Así, para cada valor de potencia se capturaron 57 muestras. El nivel de potencia fue establecido en 22 valores diferentes, por lo que se obtuvieron finalmente 1254 muestras de potencia correspondientes a las bandas de 850 y 1900 MHz de forma simultánea. Dichos valores son presentados en la Fig. 6. Las 57 muestras asociadas con cada nivel de potencia establecida en el generador fueron promediadas para obtener un único valor que pueda ser comparado a las mediciones obtenidas con el medidor isotrópico. En la Fig. 7 se observa una respuesta lineal del sensor ante cambios en la potencia de transmisión en la banda de 850 MHz. Ello también ocurre en la banda de 1900 MHz de tal manera que se deduce que hay interferencia entre los dos canales. La diferencia entre los valores medidos en los dos canales fue de aproximadamente 20 dB mientras la señal de 881.5 MHz era detectada en el canal de 1900 MHz. Después de ello la diferencia fue reducida, no porque la interferencia sea mayor sino por la sensibilidad del detector de potencia. Así se determinó un factor de desacoplamiento de 20 dB entre los canales. La comparación de los 22 valores medidos con el nodo y aquellos obtenidos con el medidor calibrado en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz, cuando una señal sinusoidal de 881.5 MHz era transmitida es mostrada en la Fig. 7. Se observa una relación directa entre ellas. El valor promedio de la diferencia entre las curvas mostradas es de 154.2560 dB/m.

Un procedimiento similar fue utilizado para la evaluación del canal de 1900 MHz. En la Fig. 8 se muestra la variación de la potencia medida por el nodo sensor en los canales de 850

MHz y 1900 MHz cuando una señal sinusoidal de 1960 MHz fue transmitida.

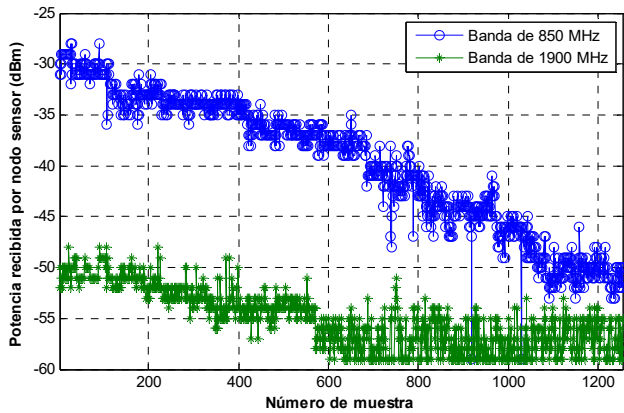


Figura 6. Potencia medida por el nodo sensor durante las pruebas en los canales de 850 MHz y 1900 MHz cuando una señal sinusoidal de 881.5 MHz fue transmitida.

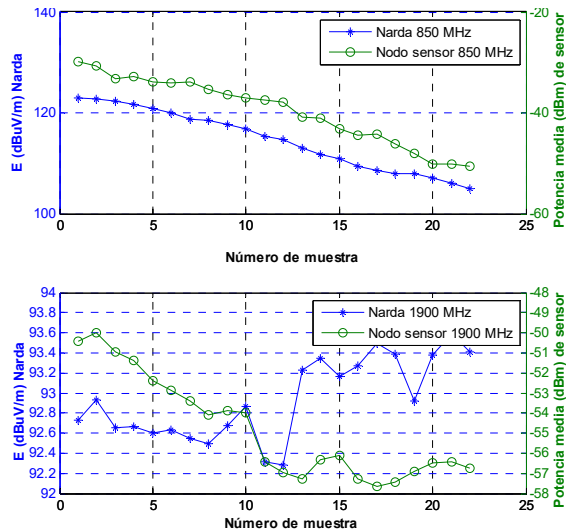


Figura 7. Potencia medida por el nodo sensor e intensidad de campo eléctrico medido con medidor calibrado en las bandas de 850 MHz y 1960 MHz cuando una señal sinusoidal de 881.5 MHz fue transmitida.

Como en el caso anterior, el nodo sensor responde a cambios en el nivel de potencia de transmisión realizado en el módulo USRP. La diferencia entre los valores medidos en los dos canales fue de aproximadamente 23 dB cuando el canal de 850 MHz era capaz de detectar la señal de 1960 MHz. De esta manera se determinó que hay interferencia entre los canales, con un factor de desacoplamiento de 23 dB.

La comparación de los 22 valores medidos con el nodo sensor y los valores correspondientes obtenidos con el medidor calibrado en las bandas de frecuencia de 850 MHz y 1900, MHz cuando un tono de 1960 MHz era transmitido, es mostrada en la Fig. 9. Se observa que hay una relación directa entre ellos, haciendo posible indicar que hay una constante que los relaciona. El valor promedio de la diferencia entre las curvas en la banda de 1900 MHz es de 141.9358 dB/m.

IV. EVALUACIÓN DEL SISTEMA Y RESULTADOS

Se realizaron pruebas para evaluar la precisión del nodo

sensor cuando era utilizado para medir intensidad de campo eléctrico con los valores de FC hallados. El rendimiento del sistema fotovoltaico fue también estudiado. Los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos son presentados a continuación.

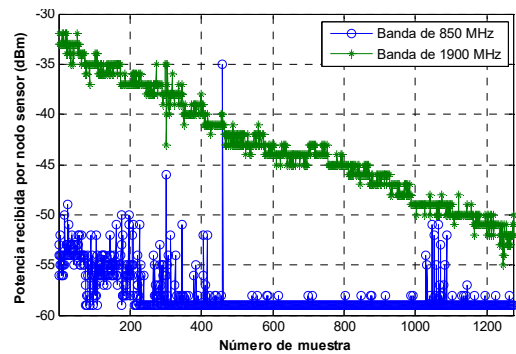


Figura 8. Potencia medida por el nodo sensor durante las pruebas en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz cuando una señal sinusoidal de 1960 MHz fue transmitida.

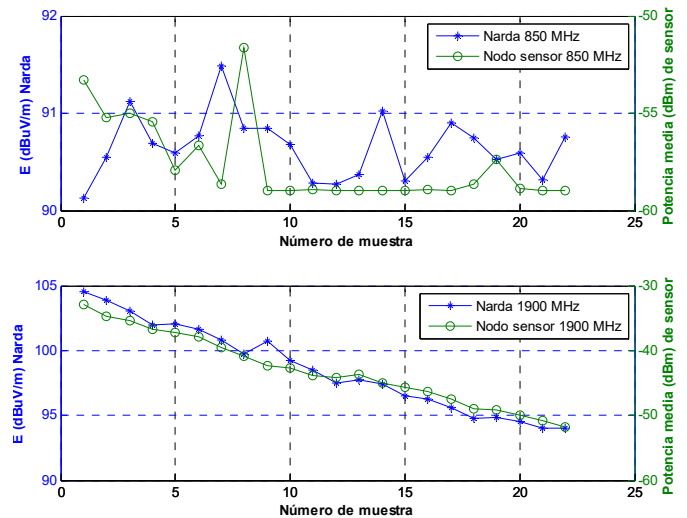


Figura 9. Potencia medida con el nodo sensor e intensidad de campo eléctrico medido con medidor calibrado en las bandas de 850 MHz y 1900 MHz cuando una señal sinusoidal de 1960 MHz fue transmitida.

A. Evaluación de precisión de nodos sensores

Se realizaron mediciones de la radiación emitida por estaciones base de telefonía móvil dentro de un edificio de tres pisos para validar el nodo sensor desarrollado. Así, en cada ubicación, el nivel de potencia medido por el nodo sensor y el valor de intensidad de campo eléctrico medido con el medidor calibrado Narda SRM3000, con una sonda isotrópica, fueron registrados simultáneamente. En ambos casos se consideró una ventana de promediado de 6 minutos.

Las mediciones realizadas para las bandas de 850 MHz y 1900 MHz fueron llevadas a cabo en distintos tiempos. En el caso de la banda de 850 MHz la evaluación fue realizada en 13 puntos. En cada uno de ellos se tomaron 50 muestras de potencia durante casi 6 minutos. Dichas muestras fueron luego promediadas para obtener un único valor representativo.

Utilizando los valores de factores de conversión hallados para la banda de 850 MHz, los valores correspondientes de intensidad de campo eléctrico fueron calculados. En la Fig. 10

se muestra la comparación de las mediciones obtenidas con el medidor calibrado y con el nodo sensor. El error absoluto es presentado en la parte superior de la Fig. 11. En la parte inferior de la misma figura se muestra el error relativo obtenido de la división entre el error absoluto y el considerado ‘valor verdadero’ (el obtenido con el medidor calibrado), expresado como un porcentaje. En la Fig. 11 se muestra un error relativo máximo de 335%. Esto se presentó cuando el valor obtenido por el equipo calibrado fue de 102.96 dBuV/m y el valor medido con el nodo sensor (utilizando un FC de 154.2560 dB/m) fue de 115.74 dBuV/m.

Se realizó la evaluación en la banda de 1900 MHz de una manera similar. En este caso sólo se consideró 19 ubicaciones. Se tomaron 50 muestras de potencia en cada ubicación durante casi 6 minutos. Luego las muestras fueron promediadas para obtener un único valor representativo por cada punto. Utilizando el factor de inversión hallado para la banda de 1900 MHz, la intensidad de campo eléctrico fue calculada y fue comparada con las mediciones realizadas con el medidor calibrado utilizado simultáneamente.

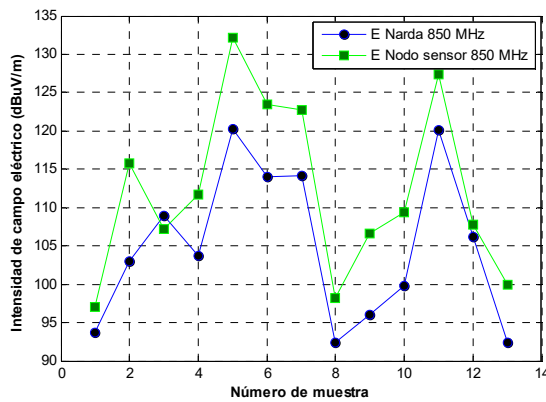


Figura 10. Comparación de la intensidad de campo eléctrico medida con equipo calibrado y con nodo sensor en la banda de 850 MHz.

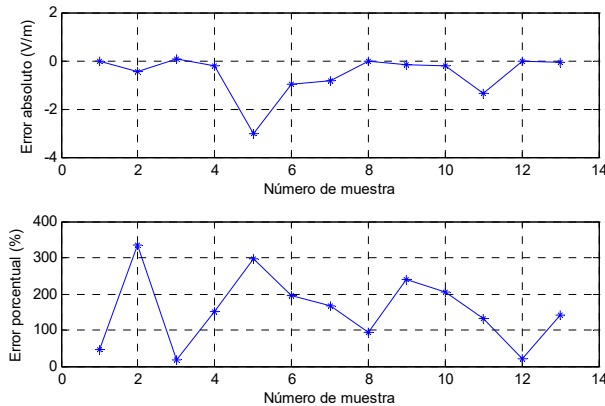


Figura 11. Errores absoluto y relativo en las mediciones de intensidad de campo eléctrico realizado por el nodo sensor en la banda de 850 MHz.

El resultado es mostrado en la Fig. 12. Los errores absolutos y relativos son mostrados en la Fig. 13. Se obtuvo un error máximo de 75%. Esto sucedió cuando el nivel de intensidad de campo eléctrico, medido con el equipo calibrado, fue de 105.38 dBuV/m mientras que el valor calculado utilizando el FC de 141.9358 dB/m era de 92.77 dBuV/m.

Como se muestra en la Fig. 12, la mayoría de los valores medidos con el medidor calibrado en la banda de 850 MHz están por encima de aquellos obtenidos haciendo uso del nodo sensor en el caso de la banda de 1900 MHz. Lo contrario ocurre para la banda de 850 MHz, tal como se muestra en la Fig.10. Con la información obtenida en campo se hallaron dos nuevos valores para el factor de conversión para las bandas de 850 MHz y 1900 MHz. Así, para la banda de 850 MHz se obtuvo un FC de 147.9822 dB/m mientras que para la banda de 1900 MHz se obtuvo un factor de 146.5667 dB/m. Estos valores permiten realizar mediciones más exactas con el nodo sensor de tal manera es recomendable que se utilicen estos factores de conversión en siguientes mediciones de campo

B. Evaluación de rendimiento de sistema fotovoltaico

El nodo sensor se mantuvo en operación durante 12 semanas, enviando los valores medidos de potencia, voltaje y temperatura al Gateway. En la Fig. 14 se muestra la variación en el tiempo del voltaje de la batería del nodo.

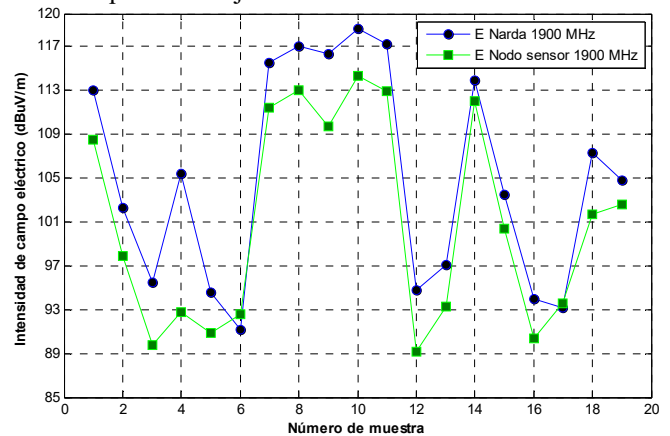


Figura 12. Comparación de la intensidad de campo eléctrico medida con equipo calibrado y con nodo sensor en la banda de 1900 MHz.

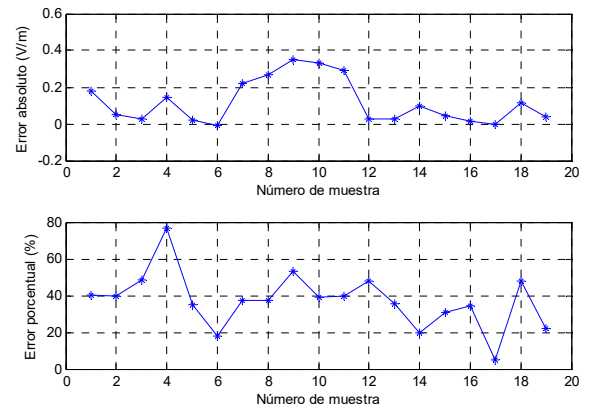


Figura 13. Errores absoluto y relativo en mediciones de campo eléctrico realizados por el nodo sensor en la banda de 1900 MHz.

Los resultados muestran que la continuidad en la operación del sistema del garantizada cuando una tasa mínima de 30 minutos es establecida en el nodo sensor.

C. Pruebas de operación en entornos diferentes

Se colocaron dos nodos sensores en dos puntos diferentes de Lima con el fin de estudiar el comportamiento de los

campos eléctricos en dos escenarios distintos. Uno de los nodos estuvo ubicado cerca de una universidad, Fig. 15, y el otro se ubicó en una zona ubicada en el cono sur de Lima, en la cual no había mucha actividad comercial. En la Fig. 16 se muestran los valores de intensidad de campo eléctrico capturados en la banda de 1900 MHz correspondientes a mediciones en ambos puntos. Se observa que, en ambos casos, hay una variación de los valores de intensidad de campo eléctrico medidos durante las distintas horas del día. Ello se debe a la fluctuación del tráfico generado por los usuarios, especialmente zonas de alto tráfico peatonal.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El nodo sensor puede obtener valores representativos de la intensidad de campo eléctrico generado por estaciones base de telefonía móvil en las bandas de 850 y 1900 MHz. Se afirma ello debido al comportamiento similar de las mediciones realizadas con el equipo Narda SRM3000 y el nodo sensor.

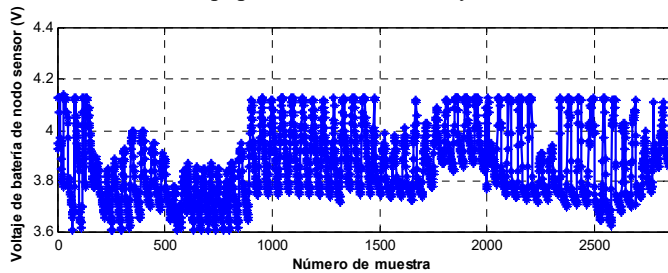


Figura 14. Variación de la temperatura y del voltaje de batería de nodo sensor durante tres meses en una estación de verano en Lima.

El uso del valor del factor de conversión obtenido a través de pruebas en un ambiente de interiores para la banda de 850 MHz generó errores relativamente grandes durante las pruebas de validación. Dichos errores se pueden deber a los diferentes niveles de multitrayecto existente en ambos entornos (ambiente de interiores y campo), la distancia entre el transmisor (USRP o estación base de telefonía móvil) y el receptor y las diferentes antenas utilizadas en los equipos (sensor y medidor SRM3000). Si se utilizaran los valores de factores de conversión hallados en campo sería posible obtener errores relativos menores al 100%. Se recomienda que el procedimiento para hallar FC se realice en campo.

El costo del nodo sensor desarrollado (\$1200) es menor al de otros equipos disponibles en el mercado (con costos medios de \$15000). Ello fue posible debido a que su aplicación está restringida a mediciones de estaciones base de telefonía móvil.



Figura 15. Ubicación de nodo sensor cerca de una universidad.

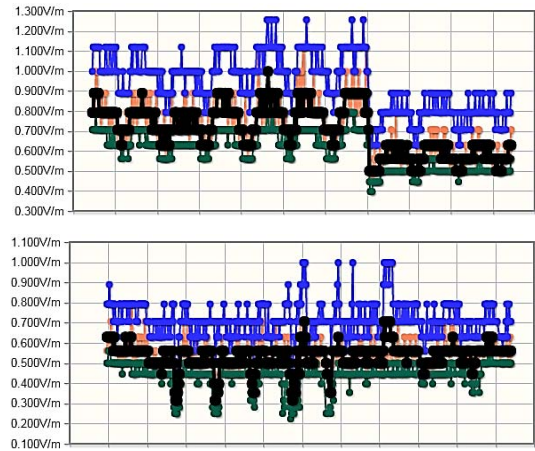


Figura 16. Variación de la intensidad de campo en la banda de 1900 MHz en una zona cercana a una universidad (parte superior) y a una zona sin mucha actividad comercial (parte inferior).

Los niveles de campo eléctrico medidos con el nodo sensor están muy debajo de los límites máximos permisibles en las bandas de 850 MHz (40.6 V/m) y 1900 MHz (60.5 V/m) [7].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las contribuciones de todos los miembros de INICTEL-UNI quienes con su apoyo continuo hicieron posible la conclusión del presente trabajo

REFERENCIAS

- [1] IARC *Classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans*, WHO, 2011.
- [2] REC UIT-T, K.83, *Recomendación ITU-T K.83 – Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético*, 03/2011.
- [3] Carril, H. M., *Emisiones Electromagnéticas no Ionizantes y los Despliegues de Redes Inalámbricas. Solución a una Problemática Latinoamericana*, República Dominicana, 2014.
- [4] Mavromatis, F., Boursianis, A., Samaras, T., Koukourlis, C., & Sahalos, J., "Design of a monitoring system for electromagnetic radiation measurements," XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science, URSI GA, Chicago, Illinois, USA
- [5] Analog Devices, "Hz to 2.7 GHz 60 dB TruPwr™ Detector AD8362," AD8262 datasheet, 2003
- [6] Hewlett Packard, Application Note 150-10.
- [7] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," Health Physics 97(3):257-259; 2009



Marco A. Quispe Choquehuanca recibió su grado de bachiller en ingeniería electrónica por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente está cursando estudios de maestría en la misma casa de estudios. Sus principales intereses de investigación se concentran en propagación de campos electromagnéticos, RNI, SDR, redes de sensores y sistemas embebidos.



Mariano Chuchón Núñez recibió su grado de ingeniero en ingeniería electrónica por la Universidad Nacional del Callao. Ha concluido sus estudios de maestría en la Universidad Nacional de San Marcos. Sus principales intereses de investigación se concentran en propagación de campos electromagnéticos, comunicaciones de redes inalámbricas, antenas, RNI, redes de sensores y redes de datos.



Rolando Adriano Peña recibió su grado de ingeniero físico por la Universidad Nacional de Ingeniería. Cuenta con estudios de maestría en ciencias con mención en energías renovables y eficiencia energética por la Universidad Nacional de Ingeniería. Ha desarrollado investigación en tecnología satelital, energías renovables y campos electromagnéticos. Actualmente se desempeña como investigador en el INICTEL-UNI en el grupo de investigación en RNI.



Javier Samaniego Manrique recibió su grado de ingeniero Electrónico por la Universidad Ricardo Palma, con estudios de Maestría en Ciencias de las Telecomunicaciones en la Universidad Nacional de Ingeniería. Es investigador de INICTEL UNI en áreas de radiocomunicaciones, espectro radioeléctrico y propagación electromagnética.