



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Selección de tecnología de bajo consumo energético para sistema inalámbrico de supervisión de eventos aplicado en áreas con riesgo de remoción en masa

**Héctor Javier Vega Lozano, Andrés Felipe Guerrero Guerrero,
Pedro Yovan Munca Cadena, Édgar Hernando Criollo Velásquez**

**Universidad de Cundinamarca
Fusagasugá, Colombia**

Resumen

Los desastres naturales han sido un obstáculo para la existencia humana puesto que las personas y la naturaleza sufren daños a veces irreparables a causa de estos repentinos acontecimientos. En Colombia estos fenómenos son comúnmente originados por olas invernales o por temporadas de sol muy largas (fenómeno de la niña y del niño). Un ejemplo de esto, son los movimientos de remoción en masa, que son causados por condiciones ambientales prolongadas o por causas antrópicas, como las lluvias duraderas, construcción de viviendas en zonas inestables, contaminación de cuencas hídricas. Por lo anterior, esta investigación se centra en dar un aporte a la construcción de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) orientado a la supervisión de eventos de remoción en masa aplicado en lugares susceptibles a este tipo de fenómeno natural. El objetivo principal de esta investigación es analizar los microcontroladores y los chips de radiofrecuencia, que se adapten a condiciones climáticas variantes, aporten una amplia cobertura de comunicación y funcionen continuamente. En la elección de las tecnologías que se adaptan a los criterios más relevantes, se tuvo en cuenta el consumo energético (W) en los microcontroladores junto con los chips de radiofrecuencia y la potencia (dBFS) en la transmisión de cada módulo, esto con el fin de ofrecer la posibilidad de que el nodo de comunicación estudiado pueda ser alimentado con una fuente de energía alternativa con duración extendida en el consumo.

Palabras clave: sistema de alerta temprana; redes inalámbricas de sensores; bajo consumo; remoción en masa; LoRa

Abstract

Natural disasters have been an obstacle to human existence since people and nature suffer sometimes irreparable damage due to these sudden events. In Colombia these phenomena are commonly caused by winter waves or by very long sunny seasons (phenomenon of the girl and the boy). An example of this are the mass removal movements, which are caused by prolonged environmental conditions or by anthropic causes, such as long-lasting rains, construction of houses in unstable areas, contamination of water basins. Therefore, this research focuses on providing a contribution to the construction of an Early Warning System (SAT) oriented to the supervision of mass removal events applied in places susceptible to this type of natural phenomenon. The main objective of this research is to analyze microcontrollers and wireless communication modules, which adapt to varying climatic conditions, provide wide communication coverage and work continuously. In choosing the technologies that adapt to the most relevant criteria, the energy consumption (W) in the microcontrollers together with the wireless modules and the power (dBFS) in the transmission of each module were considered, this to offer the possibility that the studied communication node can be fed with an alternative energy source with extended consumption duration.

Keywords: early warning system; wireless sensor networks; low power; mass removal; LoRa

1. Introducción

En los últimos años, los dispositivos inalámbricos energizados por baterías se han vuelto indispensables y actualmente son tendencia tecnológica puesto que cada día se crean más usos y aplicaciones, el mundo evolucionó en la forma de acceder a la información, dirigirla y enviarla. Desde la aparición del internet de las cosas (IoT) la versatilidad de los protocolos, configuraciones y dispositivos ofrecen soluciones sencillas a grandes problemas que pueden mejorar las condiciones de vida de las personas (Becerra, 2020).

Por lo tanto, en un proyecto conjunto entre la Alcaldía Municipal de Fusagasugá, Cundinamarca y la Universidad de Cundinamarca desde el programa de ingeniería electrónica, nace la idea de desarrollar un sistema de alerta temprana para monitorear zonas en riesgo de desastre. El proyecto se desarrolla en la zona del cerro Fusacatán y las quebradas Los curros y La parroquia del municipio de Fusagasugá, lugares de difícil acceso, sin cobertura de red inalámbrica, celular y eléctrica, desde los cuales se han originado diferentes catástrofes en las últimas décadas (IngeoinnovaSAS, 2019). Este proyecto se denomina "Prototipo inalámbrico de supervisión de eventos aplicado en áreas con riesgo de remoción en masa". La inclusión de sistemas de supervisión basados en sensores incrementará la capacidad de reacción de los organismos de prevención para mitigar las consecuencias que traen las lluvias intensas, deslizamientos y las crecientes súbitas, lo anterior contribuye en el bienestar de las personas, la preservación de sus vidas y bienes materiales y las actividades a las que se dedican (Domínguez Calle & Lozano Báez, 2014).

De esta forma, la fase del proyecto de investigación en que se enfocará este artículo se dirige especialmente a buscar y seleccionar tecnologías que permitan suplir las necesidades priorizando cuatro criterios: cobertura radioeléctrica, bajo consumo energético, resistencia a condiciones



variantes de temperatura y humedad, y comunicación en tiempo real. Para cumplir estas condiciones se recolectó información de las fichas técnicas de dispositivos electrónicos, se realizaron pruebas de comunicación usando tres tecnologías diferentes, y diferentes tarjetas de desarrollo (que integran microcontrolador, periféricos e interfaz) monitoreando el consumo energético de cada nodo en tiempo real.

A partir de las pruebas de alcance y consumo energético de las tecnologías estudiadas se seleccionó el microcontrolador y el chip de radiofrecuencia que satisface las condiciones previamente mencionadas. De acuerdo con lo anterior se demostró que las tecnologías de comunicación basadas en modulación chirp de espectro ensanchado presentan las mejores condiciones para la comunicación en estas zonas de riesgo y es ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT en las que se necesiten sensores que no dispongan de conexión permanente a la red eléctrica. Además, permiten la interconexión entre objetos inteligentes, no necesita instalaciones locales complejas y otorga amplia libertad de uso al usuario final y desarrollador.

2. Metodología

La selección de la tecnología a utilizar se llevó a cabo en 5 fases (Hnatek, 2002), como se muestra en la Figura 1.

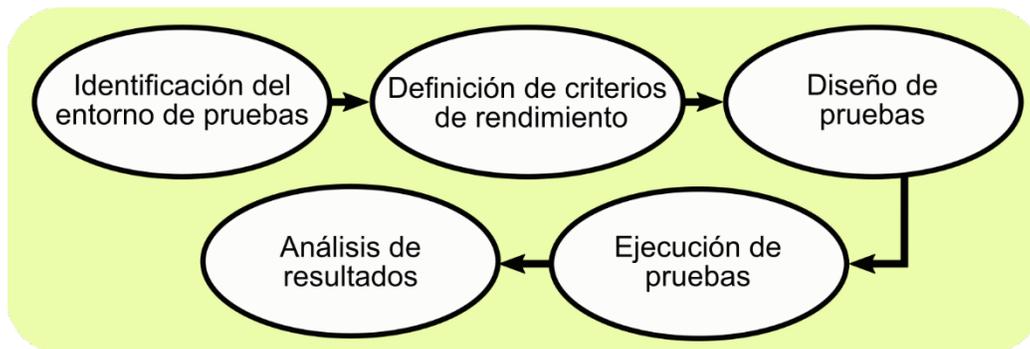


Figura 1. Metodología para selección de tecnología de comunicación y tarjeta de desarrollo

A continuación, se muestran los detalles de cada una de las fases:

2.1. Identificación del entorno de pruebas

La zona donde se ubicarán los nodos inalámbricos es el área circundante de la quebrada La parroquia, parte alta, zona cercana al Cerro Fusacatán en el municipio de Fusagasugá. Esta zona está ubicada a 2 km de la ciudad, lugar donde se ubicará el punto de acceso a datos. El entorno es zona boscosa con árboles que pueden interferir en la línea de vista, la humedad del lugar es del 70%. Basados en las condiciones identificadas se establece un campo de pruebas en la Universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá que posee condiciones climáticas similares a las de la zona de impacto, entre las cuales se incluyen obstáculos a la línea de vista como árboles, edificaciones y desniveles del terreno.

2.2. Definición de criterios de rendimiento

Se tienen como principales criterios para determinar el rendimiento de los componentes de un nodo: el consumo energético y la cobertura radioeléctrica. También se tienen parámetros secundarios como resistencia a la humedad, capacidad mínima de memoria y cantidad de entradas/salidas disponibles en el microcontrolador, este proceso comparativo se limita a garantizar el cumplimiento de los mínimos funcionales.

2.3. Diseño de pruebas

Se desarrollan en el campus de la Universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá, consta de un escenario de 100 m de longitud, en el cual se realizan mediciones por cada 10 m de distancia entre transmisor y el receptor. Se realizan mediciones de potencia de la señal recibida y consumo energético del nodo. Cada nodo está compuesto por una tarjeta de desarrollo y un chip de radiofrecuencia, en este caso, con el fin de analizar todas las alternativas se integran tarjetas de desarrollo con cada chip de radiofrecuencia.

2.4. Ejecución de pruebas

Para la ejecución de pruebas se diseñó la Tabla 1 donde se incluyen los criterios relevantes de cada uno de los dispositivos electrónicos. A partir de esta tabla es posible recolectar la información de campo para su posterior proceso y análisis.

Tabla 1. Criterios para el desarrollo de pruebas

Identificación del chip de radiofrecuencia	
Características de comunicación (datasheet)	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor • Receptor
Características eléctricas (datasheet)	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor • Receptor
Características del escenario de pruebas	
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de escenario • Obstáculos [Si /No] • Hora de prueba • Clima • ... 	
Número de prueba	
Distancia Transmisor - Receptor	
Puntos de referencia (Coordenadas)	Transmisor: Receptor:
Cobertura	Si/No
Potencia [dBFS]	
Modo de operación	
Tiempo de operación	
Consumo	

2.5. Analizar los resultados

Finalmente, los resultados obtenidos se procesan y se organizan por medio de tablas y se grafican con el propósito de establecer la tecnología más apropiada para la aplicación.

3. Resultados

En esta sección se describen los resultados de evaluar el comportamiento radioeléctrico y de consumo energético de los chips de radiofrecuencia seleccionados. Las configuraciones representan las características que se pueden utilizar en los nodos de la red, permitiendo a los investigadores asegurar las condiciones que satisfacen las necesidades del proyecto.

Para el escenario de prueba se identifican tres secciones principales: El transmisor, el receptor y las condiciones del medio. El receptor se mantiene idéntico para todas las pruebas, las configuraciones implementadas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del receptor.

Dispositivo	RTL-SDR dongle
Chip	Realtek RTL2832U
Ancho de banda	500 kHz a 1.8 GHz
Software	#SDR Sharp
Ganancia de RF	0dB
Antena	Monopolo - 50Ω - Ga 12 dBi

Las condiciones del medio se trataron de mantener estables para todas pruebas, sin embargo, al ser un ambiente a cielo abierto, algunas condiciones influyeron en el resultado de las pruebas, entre las principales están:

- Distancia entre el transmisor y receptor: entre 1 y 100m
- Altura de la antena receptora 2 m
- Altimetría del escenario
- Obstáculos estáticos entre el transmisor y receptor: árboles, edificios, autos, etc.
- La hora de ejecución: entre las 09:00 AM y las 03:00 PM en un día soleado.

Para el transmisor se tuvieron en cuenta dos componentes, el microcontrolador base y el chip de radiofrecuencia. Como microcontrolador se utilizaron dos opciones:

- ATmega 328P
- TEXAS MSP430- EXP5529LP

La selección de estos microcontroladores base se hizo teniendo en cuenta la condición de bajo consumo y el rendimiento de las tecnologías, se realizó un estudio comparativo de características de sus fichas técnicas condensadas en la Tabla 3. Un criterio de descarte fue el alto consumo debido a eso se eliminó de la lista la MSP-EXP432P401R (Texas instruments, 2015) y la ESP32 DEVKIT V1 (Espressif Systems, 2021). Con la preselección se tomaron la MSP-EXP430F5529LP (Texas instruments, 2020) y el Arduino pro-mini (Microchip, 2018) para el desarrollo comparativo experimental. Otro criterio importante adicional al consumo fue la capacidad de memoria RAM, frecuencia de operación necesaria, también fueron seleccionados por ser los más económicos y accesibles del mercado.



Tabla 3. Comparación de fichas técnicas de microcontroladores y tarjetas de desarrollo

Fabricante	Texas Instruments	ATMEL	Texas Instruments	Espressif
Modelo	MSP-EXP430F5529LP	Pro-Mini	MSP-EXP432P401R	ESP32 DEVKIT V1
Microcontrolador	MSP 430	ATMEGA 328P	ARM® 32-Bit Cortex®	Dual-core CPU Xtensa LX6
Consumo:	CLOCK 8 MHz y 3.0 V		CLOCK 16 MHz y 3.0 V	
Modo activo	290 μ A FLASH 150 μ A RAM	5.1 mA	2950 μ A FLASH 2010 μ A RAM	80 mA
Modo standby	1.9 μ A a 2.2 V 2.1 μ A a 3.0 V	3.7 mA	600 μ A a 2.2 V 530 μ A a 3.0 V	150 μ A
Modo inactivo	0.18 μ A a 3.0 V	1.52 mA	660 nA	2 μ A
RAM	8 KB	2 KB	64 KB	520 KB
Frecuencia	16 MHz - 25 MHz	8 MHz	48 MHz	240 MHz
Voltaje de operación	1.8 a 3.8 V	3.3 V	1.62 a 3.7 V	3.3 V
Memoria FLASH	128 KB	32 KB	256 KB	4 MB
Rango de temperatura	-40°C a 85°C	-20°C a 80°C	-40°C a 85°C	-40°C a 105°C

El chip de radiofrecuencia utilizado para cada prueba se determinó teniendo en cuenta alguna de las características de su configuración, las cuales se listan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los chips de radiofrecuencia

Chip de radiofrecuencia	LoRa SX1276	HC-12	FS1000A (SUMMITEK Technology Co., 2006)
Frecuencia de operación	915 MHz	433 MHz	433 MHz
Cobertura teórica	> 2000 m	1000 m	> 5000m
Consumo en operación	~ 100mA	< 100 mA	20 ~ 28 mA
Modo bajo consumo	200 nA apagado, 1.9 mA standby	30 nA apagado, 50 nA standby	200 nA apagado, 1.9 mA standby
Potencia de transmisión	+20 dBm (100 mW)	100 mW (20 dBm)	16 dBm (40 mW)

Para los tres casos se utilizó la antena helicoidal que viene por defecto en cada chip, la cual comúnmente se reporta con una ganancia de 2 dBi.

En total se realizaron sesenta (60) pruebas condicionadas principalmente por el transmisor utilizado. Para estudiar la potencia de la señal de radio se tiene en cuenta el chip de radiofrecuencia utilizado y la distancia al receptor, el objetivo principal es medir la potencia de la señal [dBFS] a una distancia determinada [m]. Para estudiar el promedio del consumo energético se tiene en cuenta el chip de radiofrecuencia utilizado y su modo de operación: activo, bajo consumo e inactivo, el objetivo principal es medir la potencia consumida por el chip [W] en los diferentes modos de operación.



En la Figura 2 y Figura 3 se presentan los resultados obtenidos en el estudio de la potencia de la señal de radio, para cada caso se resalta el microcontrolador base, el chip de radiofrecuencia y la distancia entre el receptor y transmisor.

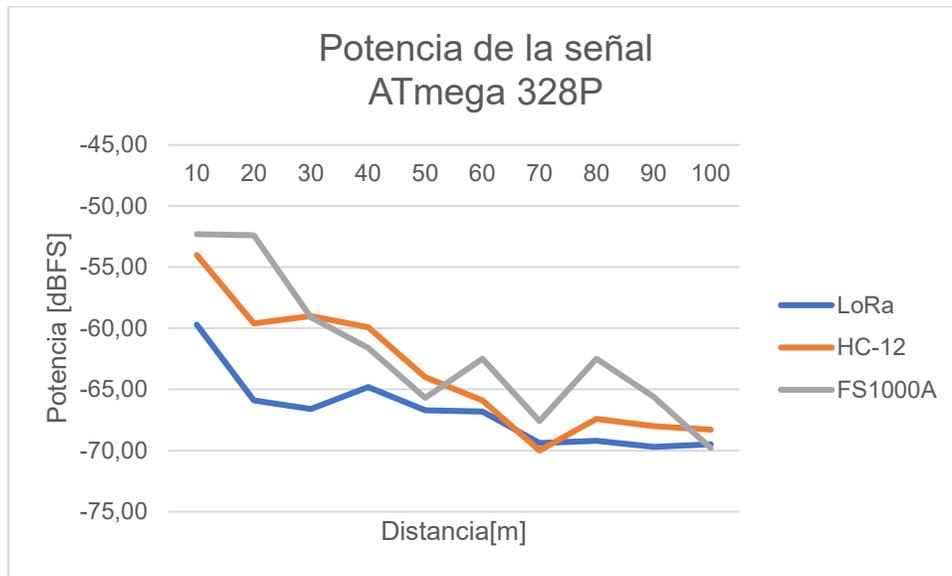


Figura 2. Potencia señal [dBfs] con microcontrolador ATmega 328P.

Se demuestra que en la integración con el microcontrolador ATmega 328P no existe una diferencia considerable en la potencia de la señal de cada uno de los chips de radiofrecuencia utilizados.

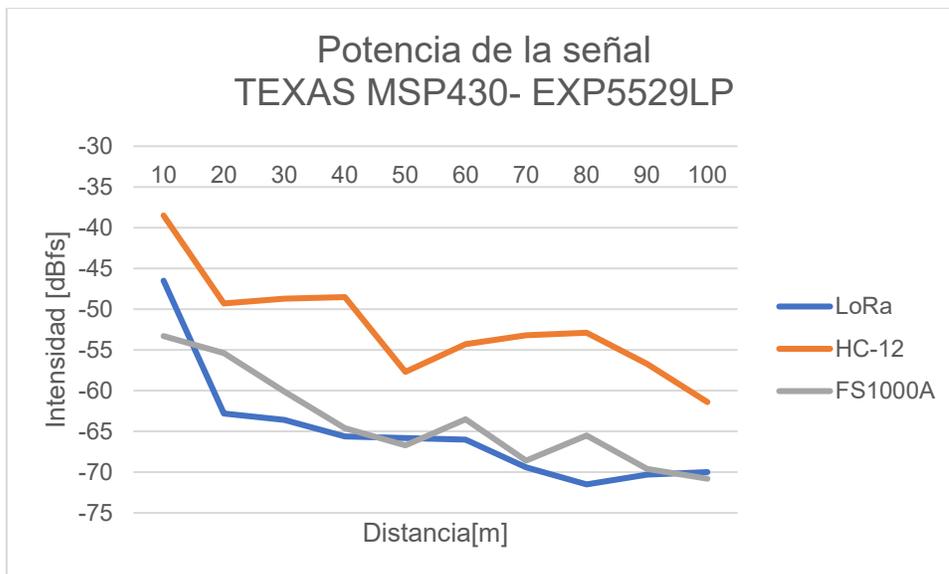


Figura 3. Potencia señal con microcontrolador TEXAS MSP430-EXP5529LP

Se evidencian una mejora significativa en la potencia de la señal de los chips utilizados en la integración con el microcontrolador TEXAS MSP430- EXP5529LP, destacando los resultados obtenidos en el estudio del chip HC-12 (Roze, 2016).



En las pruebas de consumo se utilizan tres modos de operación para cada microcontrolador (activo, bajo consumo e inactivo), mientras el chip de radiofrecuencia permanece conectado:

- Modo activo: consiste en transmitir continuamente durante el periodo de prueba y mantener la CPU y los relojes internos encendidos
- Modo bajo consumo: el nodo de comunicación transmite información por intervalos de tiempo y luego apaga la CPU y los relojes internos.
- Modo inactivo: en este caso la transmisión es nula y la CPU y los relojes internos del microcontrolador permanecen apagados

En la Figura 4 y Figura 5 se presentan los resultados obtenidos en el estudio de la potencia consumida durante un minuto por los chips de radiofrecuencia, para cada caso se resalta el microcontrolador base, el chip de radiofrecuencia y el modo de operación establecido.

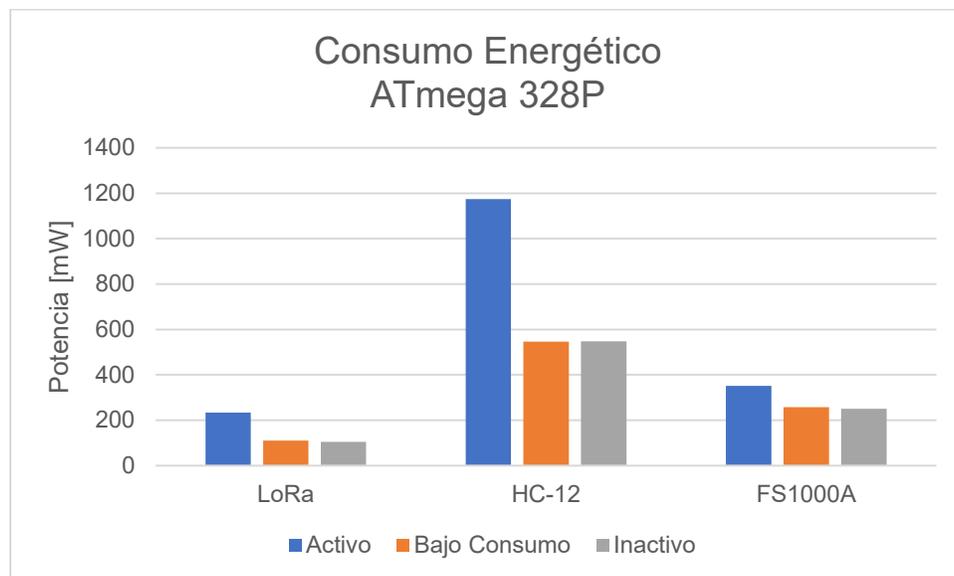


Figura 4. Potencia consumida [mW] con microcontrolador ATmega 328P.

Se puede comprobar que en la integración con el microcontrolador ATmega 328P existe una diferencia considerable en la potencia consumida [mW] para el chip HC-12 en sus diferentes modos de operación. Es importante destacar el consumo moderado del chip LoRa.

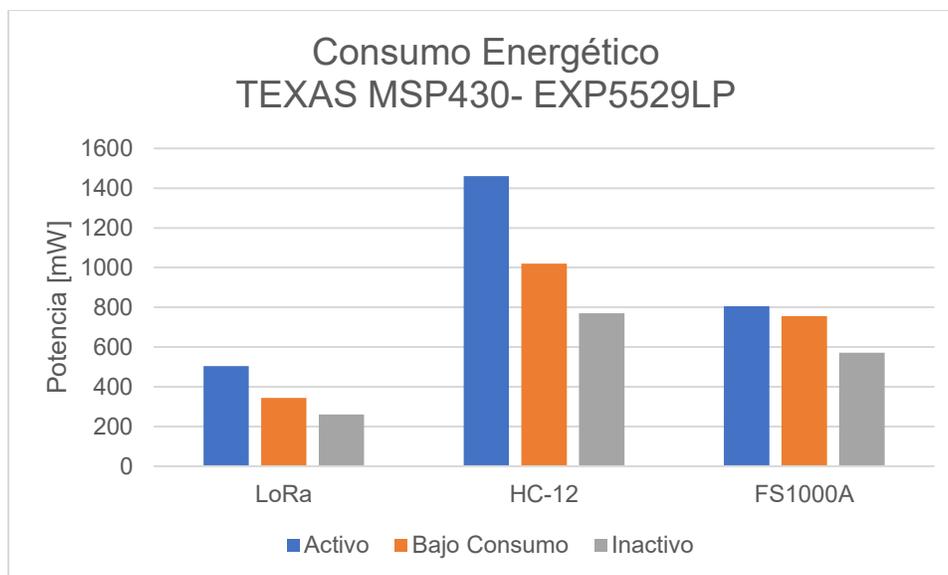


Figura 5. Potencia consumida [mW] con microcontrolador TEXAS MSP430-EXP5529LP

Se evidencia un incremento significativo en el consumo de potencia en la integración con el microcontrolador TEXAS MSP430- EXP5529LP, situación coherente con respecto a los resultados obtenidos en el estudio de la potencia de la señal de radio para este mismo microcontrolador. Es importante destacar el consumo moderado del chip LoRa.

Con base en los resultados obtenidos para la potencia de la señal de radio y el consumo energético se considera que el chip LoRa SX1276 (Semtech, 2016) en la integración con el microcontrolador TEXAS MSP430- EXP5529LP es la opción por considerar para la implementación de los nodos de la red.

4. Conclusiones

A partir de una metodología de selección experimental basada en criterios de consumo energético y cobertura radioeléctrica, se ha determinado una alternativa de solución para la implementación de una red inalámbrica de sensores enfocada en la supervisión de variables incidentes en fenómenos de remoción en masa. Esta alternativa incluye una tarjeta de desarrollo y un chip de radiofrecuencia.

Las medidas experimentales demuestran que la mejor relación consumo/cobertura radioeléctrica se obtiene utilizando la tarjeta de desarrollo MSP-EXP430F5529LP y el chip de radiofrecuencia LoRa SX1276. Se puede evidenciar que la potencia de las señales a una distancia de 100 m es muy baja, esto se debe a que las antenas utilizadas en las pruebas son helicoidales de 2 dBi. Para el montaje en campo se hace necesario la utilización de antenas con una ganancia superior (mínimo 8 dBi).

Si bien no se realiza un análisis profundo respecto a la capacidad de memoria de las dos tarjetas de desarrollo, en la Tabla 3 se puede identificar una ventaja notable del microcontrolador MSP430 respecto al ATMEGA 328P. Lo anterior puede ser determinante en la aplicación cuando sea necesario incluir funcionalidades adicionales en el nodo de supervisión en campo.

5. Referencias

- Becerra, L. Y. (2020). Tecnologías de la información y las Comunicaciones en la era de la cuarta revolución industrial: Tendencias Tecnológicas y desafíos en la educación en Ingeniería. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(28), 76–81. <https://doi.org/10.31908/19098367.2057>
- Domínguez Calle, E., & Lozano Báez, S. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(148), 321. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.132>
- Espressif Systems. (2021). ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems*, 1–65. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Hnatek, E. R. (2002). Practical Reliability Of Electronic Equipment And Products. In M. Dekker (Ed.), *Practical Reliability Of Electronic Equipment And Products* (1st ed.). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203909089>
- IngeoinnovaSAS. (2019). *INFORME ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO Consultoría para el Estudio y Diseño del Sistema de Alerta Temprana Avenidas Torrenciales en Zona Urbana y Rural del Municipio de Fusagasugá NOVIEMBRE DE 2019*. 1–64.
- Microchip. (2018). *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR ® Data Sheet*. 1–662. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328P-DS-DS40002061A.pdf>
- Rozee, R. (2016). HC-12 wireless serial port communication module. *User's Manual Version 2.3 C*, 1–8. <https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf>
- Semtech. (2016). LoRa SX1276. *Semtech Corporation*, 1(SX1276/77/78/79), 1–132.
- SUMMITEK Technology Co., L. (2006). *MANUAL USER*. PAG 6-8.
- Texas instruments. (2015). *MSP432P401R LaunchPad™ Development Kit (MSP - EXP432P401R)*. July, 1–40.
- Texas instruments. (2020). MSP430F552x, MSP430F551x Mixed-Signal Microcontrollers. *Manual de Usuario*, 1, 1–139.

Sobre los autores

- **Héctor Javier Vega Lozano**: Estudiante de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca. hjvega@ucundinamarca.edu.co
- **Pedro Yovan Munca Cadena**: Estudiante de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca. pmunca@ucundinamarca.edu.co
- **Andrés Felipe Guerrero Guerrero**: Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería- Automatización Industrial y Doctor en Ingeniería – Automática de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asistente del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Cundinamarca. afguerrero@ucundinamarca.edu.co
- **Édgar Hernando Criollo Velásquez**: Ingeniero Telemático de la Universidad Católica de Manizales, Magister en Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana.



Profesor del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Cundinamarca. eh-criollo@ucundinamarca.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

