

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN OXÍMETRO DE PULSO INALÁMBRICO LP-WA PARA EL INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS (IoMT)

DESIGN, IMPLEMENTATION, AND EVALUATION OF A LP-WA WIRELESS PULSE OXIMETER FOR THE INTERNET OF MEDICAL THINGS (IoMT)

Alfredo Ramírez Velasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México
15160591@itoaxaca.edu.mx

Aldo Eleazar Pérez Ramos

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México
aramos@cicese.mx

Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México
agalaviz@cicese.mx

Salvador Villarreal Reyes

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México
svillar@cicese.mx

Víctor Manuel Jiménez Ramos

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México
victor.jimenezr@itoaxaca.edu.mx

Recepción: 29/abril/2020

Aceptación: 28/octubre/2020

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo del prototipo de un oxímetro de pulso inalámbrico de largo alcance y bajo consumo de energía (LP-WA). El prototipo propuesto fue diseñado para adquirir, procesar y transmitir señales fisiológicas y de geolocalización de una persona realizando actividades cotidianas en ambiente de exteriores. Además, se presenta un análisis detallado del consumo de energía del prototipo para calcular su tiempo de vida útil. Por último, se presentan los resultados de una evaluación experimental del rendimiento del prototipo analizando la tasa de entrega de paquetes (PDR) y el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) en diferentes esquemas de transmisión. Estos resultados permitieron validar el bajo

consumo de corriente del dispositivo y el correcto funcionamiento del dispositivo en el proceso de transmisión de paquetes hacia la estación base LP-WA.

Palabras Clave: Dispositivo médico, Internet de las cosas, LoRa, Oxímetro de pulso inalámbrico.

Abstract

In this paper the development of a long range and low power (LP-WA) wireless pulse oximeter prototype is presented. The prototype proposed was designed to acquire, process and transmit physiological and geolocation signals from people in outdoor environments. In addition, a detailed energy consumption analysis of the prototype is given in order to calculate its lifetime. Finally, results of an experimental performance evaluation of the prototype in terms of received strength signal indicator (RSSI) and packet delivery rate (PDR) are presented. These results allowed to validate the low power consumption of the device and its appropriate operation in the packet transmission process to LP-WA base station.

Keywords: *Internet of Things, LoRa, Medical device, wireless pulse oximeter.*

1. Introducción

El Internet de las Cosas (en inglés Internet of Things, IoT) emergió como el nuevo paradigma de comunicación entre objetos físicos cotidianos y sofisticados, dotados de sensores integrados, software y tecnologías para intercambiar información a través de Internet, [Agrawal, S., & Das, M. L., 2011]. Los escenarios de aplicación IoT son muy diversos incluyendo aplicaciones en domótica, industria 4.0, ciudades inteligentes, agricultura, salud, entre otras.

Dentro del área de la salud, el internet de las cosas médicas (Internet of Medical Things, IoMT) ha cobrado relevancia debido al potencial que tiene esta tecnología para ayudar a los proveedores de servicios médicos y hospitalarios en tareas de prevención e identificación de posibles problemas de salud antes de que sean críticos, y en el manejo eficiente y rentable de recursos para atender a pacientes con enfermedades crónicas degenerativas [Boutros-Saikali, N., et al., 2018]. Actualmente, se han propuesto soluciones tecnológicas para monitorizar variables

fisiológicas de personas utilizando dispositivos médicos (baumanómetros, básculas, termómetros, etc.) y dispositivos vestibles (relojes inteligentes, pulseras deportivas, etc.) conectados al Internet por medio de redes inalámbricas heterogéneas, [Casillas, M., et al., 2015]. Este tipo de redes están formadas por sistemas de comunicaciones inalámbricas de corto alcance, p.ej. Bluetooth y ZigBee, conectadas a redes inalámbricas con acceso a Internet como WiFi, WiMax, GPRS y LTE. Es importante mencionar que estas soluciones tecnológicas mantienen un consumo de corriente elevado y una mayor complejidad en los protocolos de comunicación debido a las diferentes infraestructuras de red involucradas. Por tal motivo, el diseño e implementación de dispositivos médicos portátiles que funcionen por periodos de tiempo extendidos, capaces de conectarse a las redes inalámbricas de área amplia y baja potencia (en inglés Low Power Wide Area Network, LP-WAN), es un tema de investigación y desarrollo que se mantiene abierto [Raza, U., et al., 2017]. Considerando lo antes mencionado, en este trabajo presentamos el desarrollo de un prototipo (sistema embebido) de oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA con el que se puede monitorizar señales fisiológicas y de geolocalización de una persona en ambientes de exteriores. El rendimiento de este prototipo fue evaluado en términos de consumo de corriente y algunas métricas como el indicador de intensidad de señal recibida (en inglés Received Signal Strength Indicator, RSSI) y tasa de entrega de paquetes (en inglés Packet Delivery Rate, PDR) obtenidas en caminatas realizadas dentro del campus del CICESE en Ensenada, Baja California, México. Los resultados de estas evaluaciones nos permitieron validar el bajo consumo de corriente del dispositivo y el correcto funcionamiento del dispositivo en la transmisión de los paquetes hacia la estación base.

2. Métodos

El desarrollo y la evaluación del prototipo de oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA reportado en este trabajo se presenta en cinco secciones principales:

- Análisis y selección de tecnología LP-WA para el oxímetro de pulso.
- Diseño del Hardware.
- Diseño del código fuente (firmware).

- Medición del consumo de corriente del prototipo.
- Implementación de una LP-WAN para evaluar el rendimiento del dispositivo médico en un escenario real.

Análisis y selección de tecnología LP-WA para el oxímetro de pulso

Después de analizar los aspectos técnicos y comerciales de las principales tecnologías LP-WA, [Queralta, J. P., et al., 2019], se decidió trabajar con la tecnología *Long Range* (LoRa) debido a lo siguiente: LoRa ofrece comunicaciones de largo alcance y de bajo consumo con varias opciones de configuración a nivel de capa física (PHY), lo que permite desplegar redes LP-WA (LP-WAN) en ambientes de exteriores (urbanos, sub-urbanos, rurales e incluso en sitios remotos); emplea bandas de frecuencia libres de cargos tarifarios; existen herramientas de desarrollo bien documentadas para desarrollar soluciones propietarias relativamente rápido y con un costo moderado.

Diseño de Hardware

El prototipo de oxímetro de pulso LP-WA está formado por un microcontrolador ARM de 32 bits CORTEX-M0+, un transceptor LoRa, un módulo GPS y un sensor de frecuencia cardiaca. En la figura 1 se muestran las tarjetas de desarrollo y los buses de comunicación utilizados para interconectarlas.

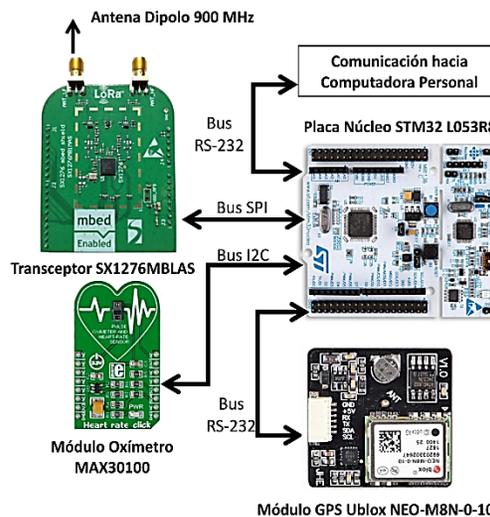


Figura 1 Tarjetas de desarrollo y buses de comunicación del prototipo propuesto.

Diseño de código fuente (Firmware)

El diagrama de flujo del código fuente que dicta el funcionamiento del oxímetro de pulso inalámbrico se presenta en la figura 2a. Dentro de este diagrama se pueden observar bloques de funciones escritas para configurar y obtener información del módulo GPS, el módulo oxímetro y el transceptor LoRa. Por otro lado, en la figura 2b se presenta el diagrama de flujo de la estación base. La estructura del paquete transmitido por el oxímetro de pulso inalámbrico se muestra en la figura 3.

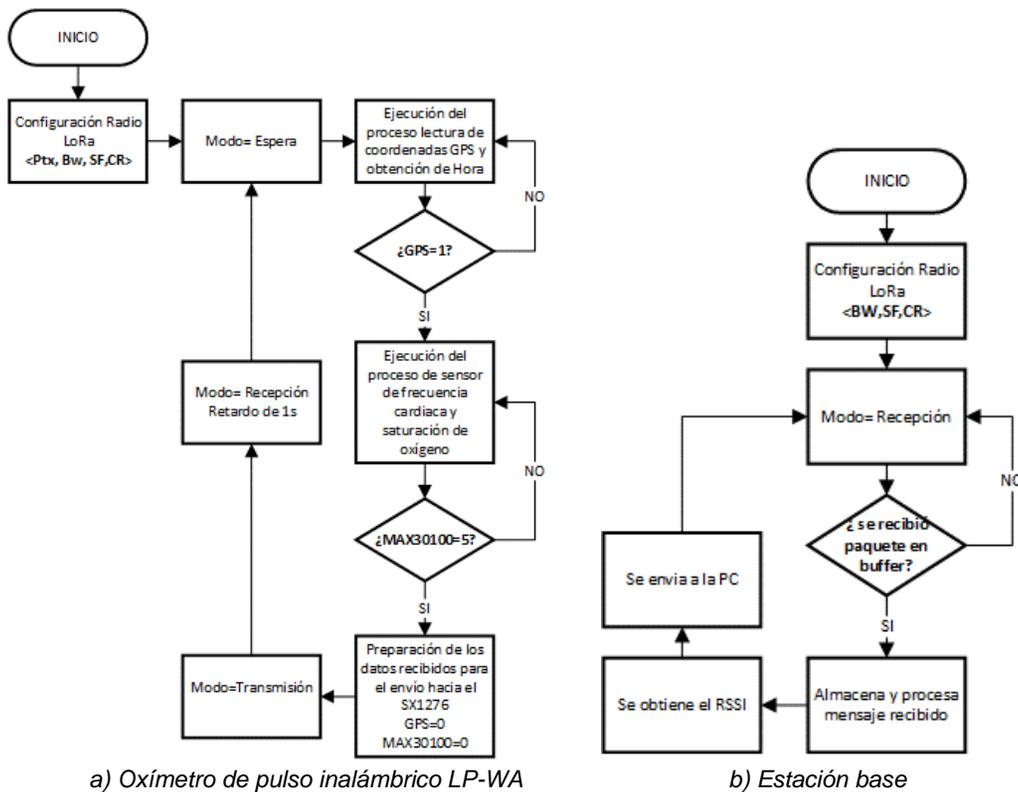


Figura 2 Diagrama de flujo de los programas principales del oxímetro y estación base.

# BYTES ->	[3]	[1]	[7]	[1]	[21]	[1]	[3]	[1]	[2]
FUNCIÓN->	ID de paquete	-	Hora	-	Datos GPS	Señal Fisiológica			
						-	Heart Rate	-	SpO2

Figura 3 Estructura de la carga útil del paquete transmitido.

Medición del consumo de corriente del prototipo

Se realizaron mediciones de consumo de corriente durante el proceso de transmisión de paquete de datos configurando el prototipo con esquemas de capa

física DR0, DR1, DR3 y DR4, indicados en la especificación LoRaWAN para Norte América, [Sornin, N. et al., 2015]. La duración de este proceso de transmisión es la suma de tiempo de cada uno de los 8 estados que lo conforman y que se muestran en la figura 4. Es importante mencionar que el periodo de repetición de este proceso cumple con la restricción del 1 % del ciclo de trabajo para la transmisión de señales LoRa.

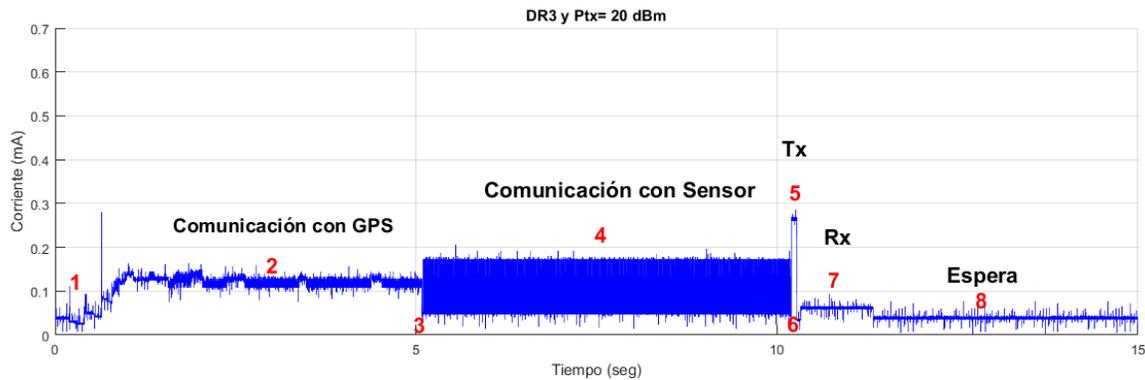


Figura 4 Traza de corriente medida durante la transmisión de un paquete.

La figura 4 muestra, a manera de ejemplo, la traza de corriente medida durante la transmisión de un paquete de datos (Figura 3), en esta medición el prototipo estaba configurado con el esquema de capa física DR3 y con la máxima potencia de transmisión ($P_{Tx} = +20\text{dBm}$). Esta traza se obtuvo, primero, midiendo el voltaje de una resistencia de shunt con un osciloscopio digital, después, se aplicó la ley de ohm, $I=V/R_{shunt}$, para obtener los valores de corriente. Con ayuda de los valores numéricos de esta traza y aplicando la ecuación 1 obtenida de [Casals, L., et al., 2017], se calculó la corriente promedio del proceso de transmisión de paquete sin reconocimiento (en inglés, Non-Acknowledgement, N-ACK), esto es, sin utilizar el mecanismo de reconocimiento de llegada de paquete por parte del receptor.

$$I_{avg_Tx} = \frac{1}{T_{Tx}} \sum_{i=1}^{N_{estado}} T_i \cdot I_i \quad (1)$$

Donde:

I_{avg_Tx} : Corriente promedio del proceso de transmisión de paquete, en mA

T_{Tx} : Tiempo del proceso de transmisión de paquete, en ms

N_{estado} : Número de estados

T_i : Tiempo de duración del estado i , en ms

I_i : Corriente promedio medida del estado i , en mA

Una vez que se calcula la corriente promedio del proceso, I_{avg_Tx} , también es posible obtener el tiempo de vida del dispositivo, T_{vida} , utilizando la ecuación 2 propuesta por [Casals, L., et al., 2017].

$$T_{vida} = \frac{C_{batt}}{I_{avg_Tx}} \quad (2)$$

Donde:

T_{vida} : Tiempo de vida teórico del dispositivo, en h (horas)

C_{batt} : Capacidad del batería, expresado en mA·h

I_{avg_Tx} : Corriente promedio del proceso de transmisión de paquete, en mA.

Es importante señalar que el valor obtenido con la ecuación 2 supone una batería ideal con un comportamiento lineal, mientras que las características de una batería real se degradan con el tiempo. Por lo tanto, el resultado de la ecuación 2 debe tomarse como una cota superior ideal en la vida útil real del dispositivo final.

Implementación de una LP-WAN para evaluar funcionamiento del prototipo

Se implementó la cama de pruebas de una red LP-WA (LP-WAN) formada por el prototipo de oxímetro de pulso inalámbrico (Figura 5a) y una estación base (Figura 5b) instalada en la azotea de la División de Física Aplicada (DFA) del CICESE (EB en la figura 5).



a) Oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA



b) Estación base

Figura 5 Implementación de la cama de pruebas de una red LP-WA.

Esta cama de pruebas permitió evaluar el funcionamiento del prototipo al transmitir paquetes de forma continua durante varias caminatas realizadas dentro del campus del CICESE, siguiendo la ruta mostrada en la figura 6. Es importante mencionar que en la mayor parte de la ruta de prueba se tuvieron enlaces de comunicación sin línea de vista (en inglés Non Line of Sight, N-LOS) hacia la estación base. Esto es debido a la altura de la antena del oxímetro de pulso inalámbrico (Figura 5a), el terreno accidentado y la distribución de los edificios. Esto sin duda redujo notablemente la potencia de la señal generando zonas sin conectividad inalámbrica.

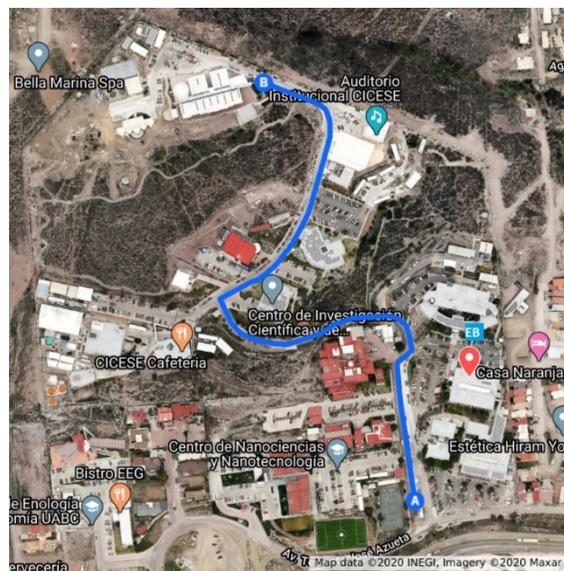


Figura 6 Ruta de prueba dentro del campus CICESE.

Las métricas de rendimiento utilizadas para evaluar el prototipo del oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA son: tasa de entrega de paquetes (PDR) y el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI). Ambas se obtienen de archivos de registro generados en la estación base. La primera métrica se calcula utilizando la ecuación 3, y nos indica la confiabilidad del enlace de comunicaciones, el segundo, nos entrega información acerca del impacto que tiene la infraestructura civil, vegetación, perfil de terreno, etc., sobre las señales LoRa transmitidas con los diferentes esquemas DRs.

$$PDR = \frac{Pkts_{RX}}{Pkts_{TX}} \times 100\% \quad (3)$$

Donde:

$Pkts_{RX}$: Paquetes recibidos en la estación base

$Pkts_{TX}$: Paquetes transmitidos por el oxímetro de pulso inalámbrico

3. Resultados

El consumo de corriente promedio del prototipo durante un proceso de transmisión de paquete (por estado) con esquemas de capa física DR0, DR1, DR3 y DR4 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados de mediciones de corriente realizadas al prototipo.

Tasa Datos	ToA (ms)	P_{Tx} (dBm)	Estados							
			Corriente promedio medida (mA)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
DR0	534.53	14	7.5784	22.2207	9.6255	16.5041	43.8581	7.3203	12.4051	7.7845
		17	7.5110	22.2207	9.3957	16.3226	52.5565	7.1740	12.3554	7.7845
		20	7.7178	22.2207	9.3106	16.3052	52.8497	7.0569	12.3528	7.7845
DR1	287.74	14	7.5447	22.2207	9.4638	16.3371	45.3489	7.1350	12.4034	7.7845
		17	7.5832	22.2207	9.5167	16.3316	52.4962	7.1870	12.3796	7.7845
		20	7.5992	22.2207	9.5319	16.3435	52.8744	7.2520	12.4158	7.7845
DR3	82.18	14	7.5928	22.2207	9.4979	16.3434	45.8563	7.1675	12.4088	7.7845
		17	7.5495	22.2207	9.5489	16.3426	52.6049	7.1488	12.4054	7.7845
		20	7.8269	22.2207	9.3667	16.3250	52.8273	7.0699	12.3549	7.7845
DR4	38.53	14	7.6826	22.2207	9.1234	16.2192	47.2000	6.9268	12.9877	7.7845
		17	7.6697	22.2207	9.2766	16.2343	52.9667	6.9184	13.0204	7.7845
		20	7.6457	22.2207	9.3333	16.2555	53.0887	6.7935	13.0710	7.7845

Adicionalmente, en tabla 1 también se muestra el tiempo en el aire (ToA) del paquete (Estado 5 en figura 4) y la potencia de transmisión (P_{Tx}) del prototipo. Es importante mencionar que para cumplir con la restricción del 1 % de ciclo de trabajo en las transmisiones LoRa, el periodo de repetición del proceso de transmisión de paquete, T_{Tx} , se ajustó a 1 minuto.

En la tabla 2 se muestra la corriente promedio del proceso de transmisión de paquete, I_{avg_Tx} , obtenida con la ecuación 1 y el tiempo de vida del dispositivo calculada con la ecuación 2. Es importante mencionar que para calcular el tiempo de vida del dispositivo se utilizó una batería con capacidad de 2000 mA·h.

Tabla 2 Tiempo de vida del dispositivo.

Tasa Datos	P _{Tx} (dBm)	I _{avg_Tx} (mA)	T _{vida} (horas)
DR0	14	10.4421	191.5325
	17	10.5025	190.4302
	20	10.5037	190.4095
DR1	14	10.2856	194.4473
	17	10.3190	193.8179
	20	10.3228	193.7456
DR3	14	10.1587	196.8752
	17	10.1671	196.7139
	20	10.1663	196.7291
DR4	14	10.1210	197.4147
	17	10.1364	197.3080
	20	10.1391	197.2558

En la figura 7 se presentan los valores de RSSI de los paquetes recibidos en la Estación Base durante las caminatas realizadas. En figura 7 se muestran el inicio de la caminata (Punto A) con la marca de tiempo 00:00 minutos y el final con una línea punteada entre la marca de tiempo 00:11 y 00:13 minutos (Punto B).

En la tabla 3 se proporciona información sobre los paquetes transmitidos por el oxímetro de pulso inalámbrico LP-WA, los paquetes recibidos en la estación base y la tasa de entrega de paquetes (PDR), la cual se obtuvo aplicando la ecuación 3.

Por último, en la figura 8 se presenta un ejemplo de la información recolectada en la estación base. En estas líneas de texto se pueden observar la carga útil del paquete y el valor de RSSI de los primeros 3 paquetes transmitidos por el oxímetro de pulso inalámbrico configurado con DR3.

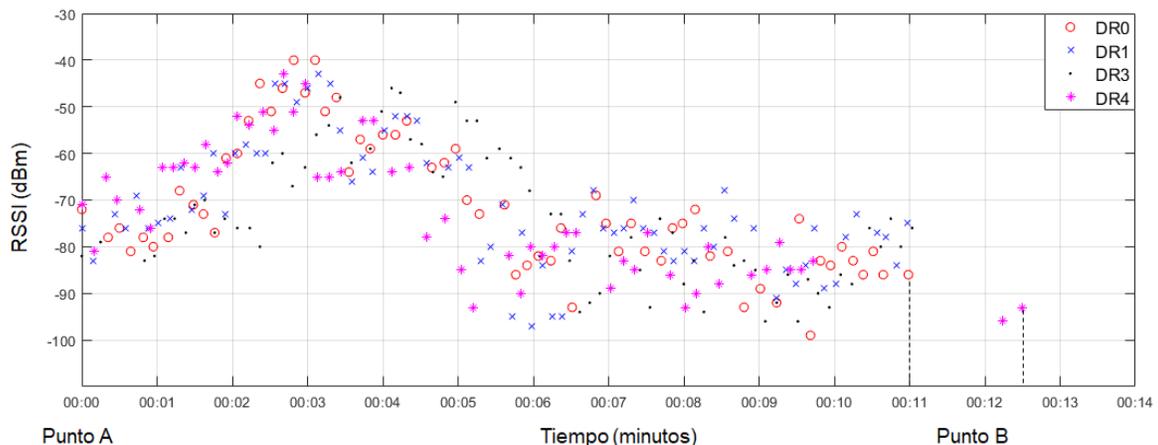


Figura 7 Ruta de prueba dentro del campus CICESE.

Tabla 3 Tasa de entrega de paquetes (PDR).

Tasa Datos	Paquetes transmitidos	Paquetes recibidos	PDR
DR0	70	65	92.85%
DR1	80	76	95.00%
DR3	76	73	96.05%
DR4	80	55	68.75%

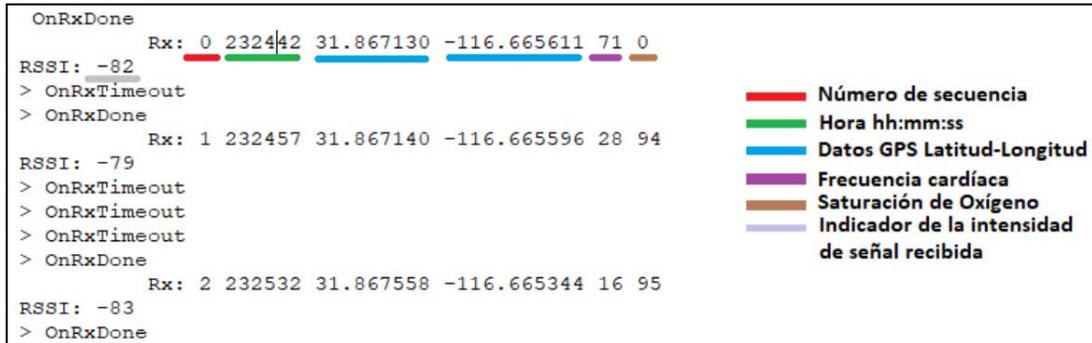


Figura 8 Captura de un archivo de registro (*.log) entregado por la estación base.

4. Discusión

Revisando la figura 7 se observa que los valores de RSSI se incrementan progresivamente desde la marca de tiempo 00:00 hasta 00:03 minutos, alcanzando niveles de RSSI por encima de -50 dBm, después, estos valores de RSSI se decrementan continuamente hasta llegar a niveles por debajo de -90 dBm. Este comportamiento, en términos de gran escala, se debe principalmente por la disminución y aumento de la distancia entre el usuario que porta el oxímetro de pulso y la estación base. Las variaciones rápidas de RSSI, un comportamiento de mediana y pequeña escala, se deben a desvanecimientos de la potencia de señal provocados por edificios, árboles, autos y el terreno accidentado a lo largo de la ruta.

Analizando los resultados de la tabla 2, se puede observar que el prototipo conectado a una batería con capacidad de 2000 mA·h puede funcionar (teóricamente) hasta 197.26 horas (aproximadamente 8 días con 5 horas y 15 minutos) con un esquema de transmisión DR4 y con una P_{Tx} de +20 dBm. No obstante, los resultados de la PDR concentrados en la tabla 3 muestran que el

prototipo con DR4 proporcionó la PDR más baja (68.75 %). Es importante mencionar que la mayor pérdida de paquetes se presentó casi al final de trayecto (ver figura 7), cerca de una estructura metálica de gran tamaño (Auditorio Institucional CICESE) lo cual provocó la condición N-LOS más severa.

Por otro lado, se obtuvo una PDR de 96 % con el esquema de transmisión DR3, este fue el mejor nivel de PDR alcanzado en las pruebas realizadas. No obstante, el tiempo de vida del dispositivo es 32 minutos menor al obtenido con DR4, esto es, 196.73 horas (aproximadamente 8 días con 4 horas y 43 minutos). Por tal motivo, es importante evaluar el prototipo en el escenario real, para seleccionar aquella configuración que brinde la mayor robustez en la entrega de paquetes y el mayor tiempo de vida del dispositivo.

La figura 8 nos permitió comprobar el correcto funcionamiento del prototipo en lo que respecta a la transmisión de paquetes con información de señales fisiológicas y de geolocalización. Sin embargo, al analizar los archivos de registro, se observaron algunos valores fuera de rango de la frecuencia cardiaca y la saturación de oxígeno en la sangre. Por lo que se requiere mayor trabajo en esta área para reducir el ruido provocado por el movimiento de la persona.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó el desarrollo de un prototipo (sistema embebido) de oxímetro de pulso inalámbrico LoRa con el que se puede monitorizar señales fisiológicas y de geolocalización de una persona que se encuentra realizando actividades cotidianas en ambientes de exteriores. El rendimiento de este prototipo fue evaluado en términos de consumo de corriente y algunas métricas como intensidad de señal recibida (RSSI) y tasa de entrega de paquetes (PDR) obtenidas durante caminatas realizadas dentro del campus del CICESE en Ensenada, Baja California, México. Los resultados de estas evaluaciones nos permitieron validar el bajo consumo de corriente del prototipo y su correcto funcionamiento en la transmisión y entrega de paquetes hacia una estación base LoRa en escenarios sin línea de vista (N-LOS) con terreno irregular.

6. Referencias

- [1] Agrawal, S., & Das, M. L. (2011, December). Internet of Things—A paradigm shift of future Internet applications. In 2011 Nirma University International Conference on Engineering (pp. 1-7). IEEE.
- [2] Boutros-Saikali, N., Saikali, K., & Naoum, R. A. (2018, April). An IoMT platform to simplify the development of healthcare monitoring applications. In 2018 Third International Conference on Electrical and Biomedical Engineering, Clean Energy and Green Computing (EBECEGC) (pp. 6-11). IEEE.
- [3] Casillas, M., Villarreal-Reyes, S., González, A. L., Martínez, E., & Perez-Ramos, A. (2015). Design guidelines for wireless sensor network architectures in mHealth mobile patient monitoring scenarios. In *Mobile Health* (pp. 401-428). Springer, Cham.
- [4] Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873.
- [5] Queralta, J. P., Gia, T. N., Zou, Z., Tenhunen, H., & Westerlund, T. (2019). Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155, 343-350.
- [6] Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Gomez, C. (2017). Modeling the energy performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17(10), 2364.
- [7] Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2015). Lorawan specification. LoRa alliance.