

## Análisis de métricas de calidad de servicio para la configuración del protocolo CSMA/CA en redes de sensores inalámbricas de área corporal

Analysis of quality of service metrics for CSMA/CA protocol configuration in wireless body area networks

Diana Patricia Tobón Vallejo\*  
Natalia Gaviria Gómez\*\*  
*Universidad de Antioquia (Colombia)*

\* Magíster en Ingeniería, Universidad de Antioquia (Colombia). Profesora ocasional de la Universidad de Antioquia, Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería. [dptvallejo@udea.edu.co](mailto:dptvallejo@udea.edu.co)

\*\* Ph.D de la Universidad de Arizona-Tucson, Directora de Investigación y Posgrados, Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. [nagaviri@udea.edu.co](mailto:nagaviri@udea.edu.co)

**Correspondencia:** Diana Patricia Tobón Vallejo, Universidad de Antioquia, calle 67 No. 53-108, Bloque 19, oficina 428. Teléfono: 574-2198561 Fax: 574-2638282. [dptvallejo@udea.edu.co](mailto:dptvallejo@udea.edu.co)

**Origen subvenciones:** Proyecto Colciencias. Título: Plataforma de soporte al programa de riesgo cardiovascular. Fecha: 2009-2011. Convenio 584 del 2008. UdeA-Colciencias.

Esta investigación fue soportada por el centro de excelencia ARTICA (ALIANZA REGIONAL EN TIC APLICADAS), fundada por Colciencias y el Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones.

## Resumen

Dado que la calidad de servicio es un aspecto fundamental en las diferentes aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas, y en particular en redes de área corporal, este artículo analiza algunas métricas para garantizar la calidad de servicio en una red orientada al monitoreo de pacientes. Mediante la definición de un diseño experimental y el análisis de resultados utilizando el análisis de varianza (ANOVA), se encuentra una configuración de parámetros del protocolo de acceso múltiple de sentido de portadora con evasión de colisión (CSMA/CA), para optimizar la calidad de servicio de una red de área corporal en cuanto a consumo de energía, retardo y pérdida de paquetes. Los parámetros analizados son el tráfico, el macMinBE (BE) y el macSuperFrameOrder (SO). Se implementó el diseño experimental en el simulador OMNeT++ y luego en una plataforma real de red de sensores. De esta forma, se concluyó que las tres variables elegidas influyen en el desempeño de la red, y se encontraron los valores óptimos para los parámetros seleccionados.

**Palabras clave:** WBAN, IEEE 802.15.4, CSMA/CA Slotted, Calidad de Servicio.

## Abstract

The guarantee of Quality of Service (QoS) is a fundamental aspect in the implementation of Wireless Sensor Networks, particularly in Wireless Body Area Networks (WBAN). This paper analyzes several QoS metrics in order to guarantee the performance of a WBAN used to monitor patients. Through the definition of an experimental design and using Analysis of Variance (ANOVA) to analyze the results, we find the configuration of the Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance protocol (CSMA/CA) that optimizes the performance in terms of energy consumption, packet loss and delay. We focused on the following parameters: traffic load, macMinBE (BE) and macSuperFrameOrder (SO). The experimental design was implemented both in a simulation environment (OMNeT++) and in a real hardware platform. The result analysis showed that the performance of the network is affected by the three variables, and allowed us to find the optimal values.

**Keywords:** WBAN, IEEE 802.15.4, CSMA/CA Slotted, Quality of Service.

*Fecha de recepción: 24 de enero de 2012  
Fecha de aceptación: 20 de marzo de 2012*

## 1. INTRODUCCIÓN

El estándar de comunicación IEEE 802.15.4 [1] define las capas de control de acceso al medio (MAC) y física (PHY) en redes inalámbricas de área corporal (WBAN) para bajas tasas de transmisión de datos. Como protocolo de acceso al medio, el estándar usa CSMA/CA, el cual tiene dos modos de operación: *Slotted* (ranurado) y *Unslotted* (no ranurado). Este estándar es la base de la especificación *ZigBee* [2], la cual es aprobada por la Alianza Continua [3] como adecuada para aplicaciones en salud.

Una de las principales aplicaciones de este estándar es el monitoreo de pacientes, en el cual se requiere una red que garantice una asistencia médica efectiva hacia el paciente, lo que genera la necesidad de implementar mecanismos de calidad de servicio (QoS) en la red de comunicaciones. Esta aplicación consiste en que el paciente, quien lleva una vida normal, porte en su cuerpo unos sensores de signos vitales que lo van a estar monitoreando durante todo el tiempo para luego enviar esta información a un dispositivo móvil (figura 1).

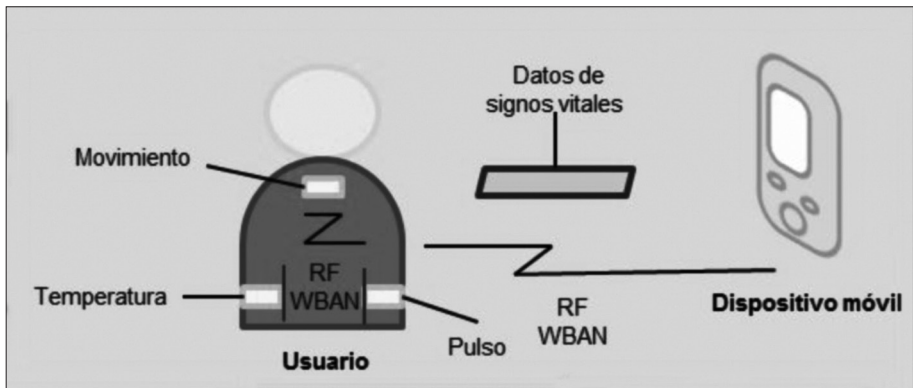


Figura 1. WBAN en una aplicación de monitoreo de pacientes

Existen diferentes metodologías para garantizar métricas de QoS en determinada aplicación empleando el protocolo CSMA/CA *Slotted*. Entre ellas se encuentran: modelos analíticos [4], implementación de capas virtuales [5], esquemas de diferenciación [6], algoritmos y modificación de diferentes

parámetros del protocolo [7]. Estas diferentes metodologías son un aporte para abordar el tema de QoS; el problema es encontrar la metodología adecuada que permita que diferentes métricas de QoS sean implementadas dependiendo de la aplicación. Por lo tanto, para mejorar el desempeño de la WBAN en la aplicación mencionada, se propone analizar el comportamiento de la red ante diferentes valores de algunos de los parámetros del protocolo de acceso al medio CSMA/CA en su modo *Slotted*. El desempeño se mide en términos de las variables respuesta: retardo, pérdida de paquetes y consumo de energía, buscándose una configuración adecuada del protocolo para obtener una buena respuesta para estas variables. Esto se logra mediante la realización de un diseño experimental factorial en un simulador para redes de sensores.

## 2. PROTOCOLO DE ACCESO AL MEDIO CSMA/CA SLOTTED

La figura 2 presenta el algoritmo definido por el protocolo de acceso al medio CSMA/CA, el cual usa como unidad de tiempo el periodo de *backoff* (*aUnitBackoffPeriod*). El inicio del primer periodo de *backoff* de cada dispositivo es alineado con el inicio de la transmisión *beacon* (trama que el nodo central de la red o coordinador envía de forma periódica) y la capa MAC se asegura de que la capa PHY comience sus transmisiones en el límite de un periodo de *backoff*. Se tienen entonces tres variables en cada dispositivo para cada intento de transmisión: NB, CW y BE. NB es el número de veces que se ejecuta el algoritmo CSMA/CA para hacer una transmisión.

Este valor es inicializado en cero antes de un nuevo intento de transmisión. CW es la longitud de la ventana de contención y define el número de periodos de *backoff* en los cuales el canal debe estar inactivo antes de que una transmisión pueda comenzar. Este valor es inicializado en 2 antes de cada intento de transmisión y llevado a 2 cuando el canal se encuentra ocupado. BE es el periodo de *backoff* y define el número de periodos de *backoff* que un dispositivo debe esperar antes de poder acceder al canal.

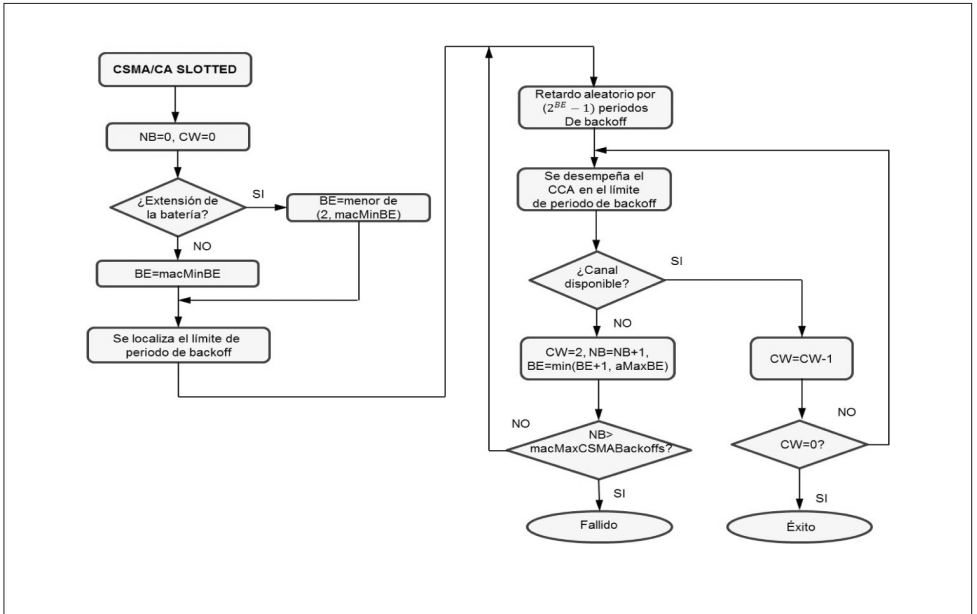


Figura 2. Algoritmo CSMA/CA Slotted.

Este algoritmo usa una estructura conocida como “súper trama” con una longitud definida por el parámetro *macBeaconOrder* (*BO*) (figura 3). Esta estructura está compuesta por una parte activa, definida por el parámetro *macSuperFrameOrder* (*SO*), en la que todos los nodos compiten por acceder al medio y una parte inactiva en la que los nodos están en un modo de bajo consumo.

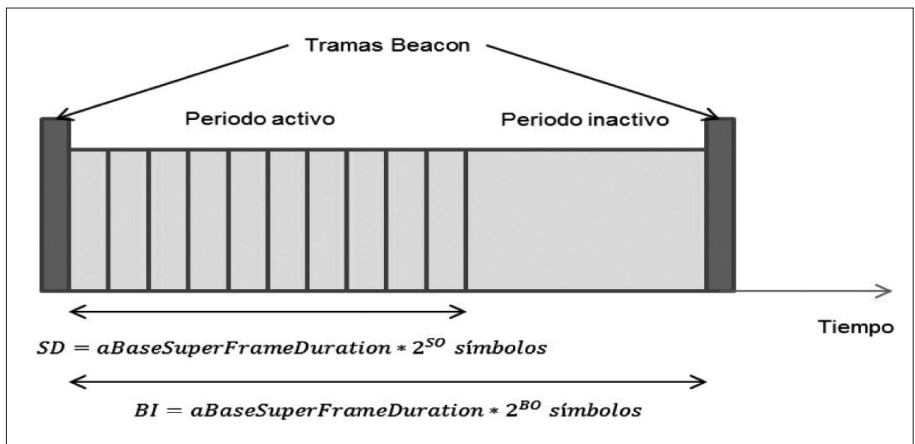
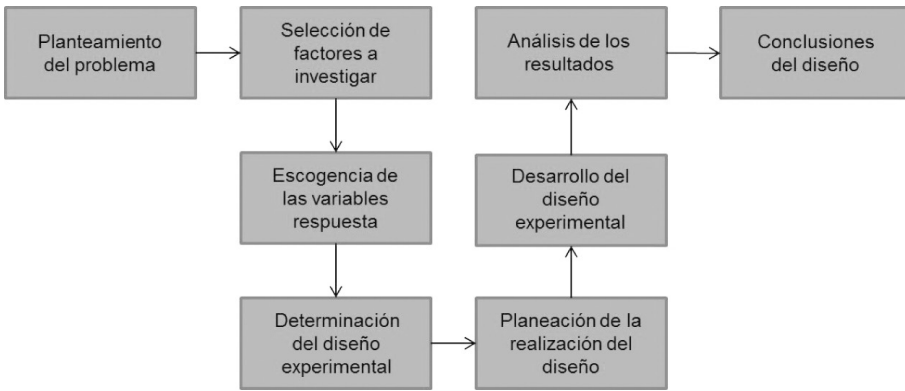


Figura 3. Estructura de la súper trama

### 3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en la investigación se basa en la definición de un diseño experimental que busca encontrar la configuración de algunos de los parámetros del protocolo CSMA/CA que dan como resultado el mejor desempeño respecto a tres variables respuesta: retardo, pérdida de paquetes y consumo de energía. Este diseño experimental se implementa tanto en el simulador *OMNeT++* como en una plataforma real, para posteriormente hacer un análisis de los resultados utilizando el ANOVA. La metodología utilizada se ilustra en la figura 4.

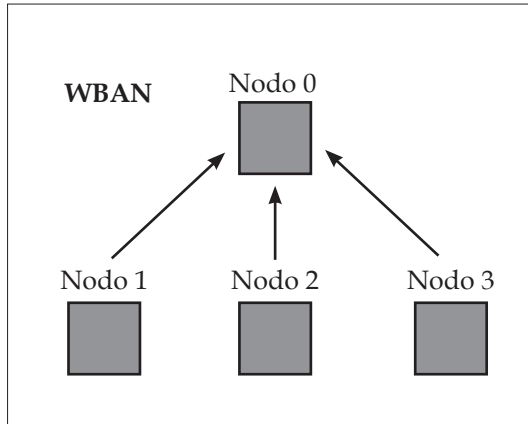


**Figura 4.** Etapas del proceso para realizar un diseño experimental

Antes de realizar el diseño experimental, se definen los componentes necesarios a la hora de realizar el experimento: unidad experimental, factores, niveles, variables respuesta y análisis de los resultados [8].

#### Unidad experimental

En nuestro caso, es la WBAN formada por 4 nodos separados 1 metro, donde cada nodo se comunica con el nodo central de la red (nodo 0), formando así una topología estrella como ilustra la figura 5. No se considera movilidad, dado que la distancia relativa entre los nodos se mantiene constante.



**Figura 5.** Unidad experimental

## Factores

Se tienen tres factores: tráfico, exponente de *backoff* (*BE*) y orden de la súper trama (*SO*). El experimento busca determinar si los factores influyen sobre la variable respuesta y con qué valor de ellos se desempeña mejor el protocolo. Estos parámetros se consideran relevantes debido a: *BE* es el parámetro que determina cuánto tiempo aleatorio tiene que esperar el nodo para sensar si el canal está disponible o no; *SO* es el parámetro que fija cuánto tiempo está activo el nodo (con el radio encendido), tiempo en el cual los nodos compiten por acceder al medio y el tráfico es un parámetro que afecta el retardo, el consumo de energía y la pérdida de paquetes en la WBAN. Se considera entonces que estos parámetros pueden afectar el desempeño de la red, lo cual se verifica con el diseño experimental factorial.

## Niveles

Para este diseño se tienen tres factores con tres niveles. El primer factor es el tráfico en la red con los niveles: alto, medio y bajo, los cuales corresponden a un tiempo entre paquetes de 400ms, 1s y 5s, respectivamente. La escogencia de estos valores se hizo con base en la tasa de tráfico del sensor de pulsioximetría, el cual envía datos cada 1s, seleccionándose así, este valor al igual que uno por encima y otro por debajo de él. El segundo factor corresponde al exponente de *backoff* (*macMinBE*), el cual es un parámetro

que influye directamente en el tiempo que el nodo tiene que esperar para poder sentir si el canal está disponible o no; los valores que toma este parámetro, para este diseño, son: 3, 5 y 7. Estos valores se tomaron con base en el resultado del trabajo de Rohm et al. [9], en donde se encontró que un valor óptimo para este parámetro es 5. El tercer factor corresponde a *macSuperFrameOrder* (SO), el cual determina el tiempo en que los nodos permanecen activos y compiten por acceder al medio; los valores de sus niveles son: 3, 4 y 5 que corresponden a un período activo de 0,12288s, 0,24576s y 0,49152s respectivamente. El valor del *BeaconOrder* (BO) se dejó fijo en 6, lo que corresponde a un tiempo entre *beacons* de 0,98304s, limitando los valores del *macSuperFrameOrder* a máximo 5 (figura 3).

### Tratamientos

Son la combinación de los niveles de todos los factores como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
Tratamientos para el diseño experimental factorial

Tráfico	BE	SO	Tratamientos
		SO1	ABE1SO1
	BE1	SO2	ABE1SO2
		SO3	ABE1SO3
		SO1	ABE2SO1
Alto	BE2	SO2	ABE2SO2
		SO3	ABE2SO3
		SO1	ABE3SO1
	BE3	SO2	ABE3SO2
		SO3	ABE3SO3
		SO1	MBE1SO1
	BE1	SO2	MBE1SO2
		SO3	MBE1SO3
		SO1	MBE2SO1
Medio	BE2	SO2	MBE2SO2
		SO3	MBE2SO3
		SO1	MBE3SO1

Continúa...



Tráfico	BE	SO	Tratamientos
	BE3	SO2	MBE3SO2
		SO3	MBE3SO3
		SO1	BBE1SO1
	BE1	SO2	BBE1SO2
		SO3	BBE1SO3
		SO1	BBE2SO1
Bajo	BE2	SO2	BBE2SO2
		SO3	BBE2SO3
		SO1	BBE3SO1
	BE3	SO2	BBE3SO2
		SO3	BBE3SO3

### Variables respuesta

Las variables respuesta de interés son las relacionadas con la calidad de servicio: retardo, pérdida de paquetes y consumo de energía. Se eligieron estas variables, dada su relevancia en la aplicación en particular, monitoreo de signos vitales en pacientes, puesto que es de vital importancia garantizar que no se pierda información, que el sistema sea eficiente en energía y que la información llegue de manera oportuna para poder asistir al paciente.

- *Retardo*: es una métrica que da información sobre el tiempo promedio que se demora un paquete en la red para llegar a su destino. Una vez terminada la simulación, el retardo se calcula como la sumatoria de todos los retardos de cada paquete sobre el número total de paquetes entregados.

$$\overline{\text{Retardo}} = \frac{\sum_{i=0}^k R_i}{\text{Total paquetes}} \quad (1)$$

donde  $R_i$  es el retardo que percibe el paquete  $i$  para llegar a su destino (coordinador).

- *Pérdida de paquetes*: esta métrica da cuenta de qué tan probable es que un paquete se pierda en la red y se calcula como:

$$P_{ppkts} = \frac{PktsT_x - PktsR_x}{PktsT_x} \quad (2)$$

donde  $Pppkts$  es la probabilidad de pérdida de paquetes,  $Pkts_{Tx}$  es la cantidad de paquetes transmitidos, y  $Pkts_{Rx}$  es la cantidad de paquetes recibidos.

- *Consumo de energía promedio por paquete de datos recibido*: esta métrica representa el consumo promedio necesario en la red para que se complete una transacción de paquetes y se calcula como,

$$E = \frac{\sum_{i=0}^k E_i}{Pkts_{RxCOORD}} \quad (3)$$

donde  $k$  es el número total de nodos en la red,  $E_i$  es la energía total consumida por el nodo  $i$  y  $Pkts_{RxCOORD}$  es el número de paquetes recibidos por el nodo coordinador.

### Análisis a desarrollar (ANOVA)

La comparación de los tratamientos se realiza a través de un ANOVA usando un diseño factorial de tres factores con tres niveles. El diseño factorial se emplea porque se supone que los factores influyen en las variables respuesta del sistema, lo cual se valida en cada uno de los casos.

El modelo estadístico para tres factores es [8]:

$$Y_{ijkl} = \mu_{ijk} + e_{ijkl} \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, c \quad l = 1, 2, \dots, r$$

donde  $y_{ijkl}$  es el valor de la variable respuesta (retardo, pérdida de paquetes y consumo de energía) y  $e_{ijkl}$  es la perturbación de la  $i$ -ésima replicación del nivel  $i$  del factor tráfico,  $j$  del factor BE y  $k$  del factor SO.

La media de celdas  $\mu_{ijk}$  expresada como una función del factorial de los efectos principales y las interacciones es:

$$\mu_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \quad (5)$$

donde  $\mu$  es la media general sin aplicarse tratamiento,  $\alpha_i$  es el efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor tráfico,  $\beta_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor BE,  $\gamma_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo nivel del factor SO,  $(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto de la interacción de los niveles del factor tráfico y el factor BE,  $(\alpha\gamma)_{ik}$  es el efecto de la interacción de los niveles del factor tráfico y el factor SO,  $(\beta\gamma)_{jk}$  es el efecto de la interacción de los niveles del factor BE y el factor SO y  $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  es el efecto de la interacción de todos los niveles de todos los factores.

El resultado del análisis permite determinar si hay diferencias significativas entre las medias con el fin de mirar los efectos que tienen los tratamientos sobre la variable respuesta. Con el resultado del ANOVA se hacen estimaciones y pruebas de hipótesis. Si se concluye que hay diferencias, entonces mediante métodos complementarios se estima cuáles son las medias diferentes. Mediante el diseño factorial se puede evaluar el efecto individual y conjunto de dos o más factores sobre una variable respuesta.

Existe una hipótesis nula por cada factor y por cada posible combinación de factores en el ANOVA factorial. La hipótesis nula de un factor afirma que las medias de los niveles del factor son iguales, mientras que la hipótesis nula de un efecto de interacción afirma que tal efecto es nulo. Por lo tanto, para cada efecto existe una hipótesis y para cada hipótesis un nivel de significancia que determinará si dicha hipótesis es rechazada o aceptada. La hipótesis nula se rechaza si *P-value* (significación) es menor a 0.05. Para realizar el ANOVA, es necesario que se cumplan tres condiciones: independencia de las observaciones, distribución normal del error y homogeneidad de varianzas.

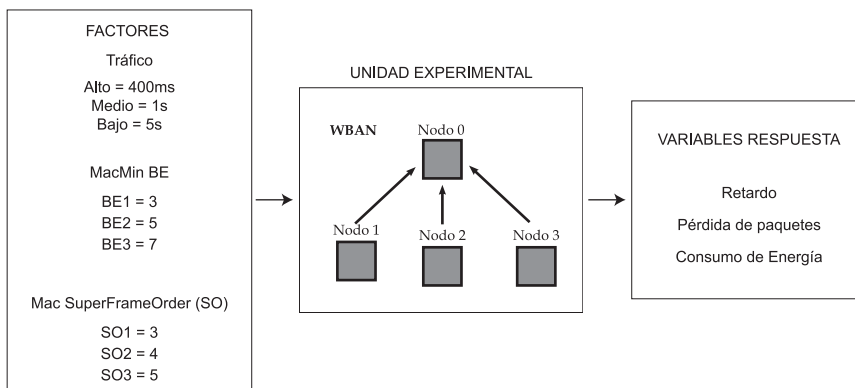
- *Independencia de las observaciones*: este supuesto se cumple si las simulaciones de los tratamientos y sus repeticiones se realizan en un orden aleatorio.
- *Distribución normal del error*: este supuesto se cumple si el comportamiento de los datos sigue una distribución normal. Para validar esto, se emplea la prueba de Shapiro-Wilk usando el paquete estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) [10].
- *Homogeneidad de varianzas*: se recurre a una prueba que consiste en graficar los residuales contra los valores estimados de las medias de tratamien-

to, con el fin de obtener una evaluación visual sencilla de la suposición de varianzas iguales en los grupos de tratamiento [8].

## Simulación

El diseño experimental se realiza en el simulador para redes de sensores OMNeT++ [11], el cual es un simulador de eventos discretos basado en C++.

En la Figura 6 se muestran los componentes usados en el diseño.



**Figura 6.** Elementos del diseño experimental factorial

Es necesario realizar repeticiones en el desarrollo del diseño experimental para aumentar la confiabilidad de las mediciones y así poder determinar si la variabilidad de los datos se debe al error aleatorio o a los factores.

Para que el diseño sea balanceado se escoge el mismo número de réplicas, 4 para este caso, debido a que los resultados de simulación para cada repetición no presentaban una gran variabilidad. Para garantizar que el resultado de cada repetición sea diferente, se emplea en el simulador OMNeT++ una semilla generadora de números aleatorios.

Los tratamientos deben realizarse en un orden aleatorio para garantizar independencia en los errores. Para esto se empleó el sitio web, números aleatorios y números al azar [12], que permitió generar 108 números alea-

torios (tabla 2). El tiempo de simulación empleado para cada tratamiento fue de 24 horas.

**Tabla 2**  
Orden de ejecución de las simulaciones

Tráfico	BE	SO	Tratamientos	Orden de replicación			
		SO1	ABE1SO1	73	65	81	69
	BE1	SO2	ABE1SO2	23	80	40	72
		SO3	ABE1SO3	43	3	78	20
		SO1	ABE2SO1	105	17	4	96
Alto	BE2	SO2	ABE2SO2	59	101	30	88
		SO3	ABE2SO3	25	37	84	29
		SO1	ABE3SO1	94	83	5	104
	BE3	SO2	ABE3SO2	52	18	24	98
		SO3	ABE3SO3	64	82	71	86
		SO1	MBE1SO1	61	89	54	19
	BE1	SO2	MBE1SO2	26	87	31	6
		SO3	MBE1SO3	47	32	51	106
		SO1	MBE2SO1	79	9	21	33
Medio	BE2	SO2	MBE2SO2	63	60	50	57
		SO3	MBE2SO3	95	70	45	76
		SO1	MBE3SO1	10	92	13	2
	BE3	SO2	MBE3SO2	11	48	108	42
		SO3	MBE3SO3	91	34	14	35
		SO1	BBE1SO1	15	85	1	75
	BE1	SO2	BBE1SO2	44	68	36	55
		SO3	BBE1SO3	28	102	53	38
		SO1	BBE2SO1	41	99	77	100
Bajo	BE2	SO2	BBE2SO2	62	39	8	66
		SO3	BBE2SO3	22	56	103	7
		SO1	BBE3SO1	90	74	107	12
	BE3	SO2	BBE3SO2	97	46	27	16
		SO3	BBE3SO3	58	67	49	93

#### 4. RESULTADOS

Los resultados encontrados para la variable respuesta retardo se muestran a continuación.

Antes de realizar el ANOVA se verifica que los datos resultantes de las simulaciones cumplan los tres supuestos:

- *Independencia de las observaciones*: este supuesto se cumple puesto que las simulaciones de los tratamientos y sus repeticiones se realizaron en un orden aleatorio para todas las variables respuesta.
- *Distribución normal del error*: el resultado arrojado por el test de Shapiro-Wilk en el SPSS se muestra en la tabla 3.

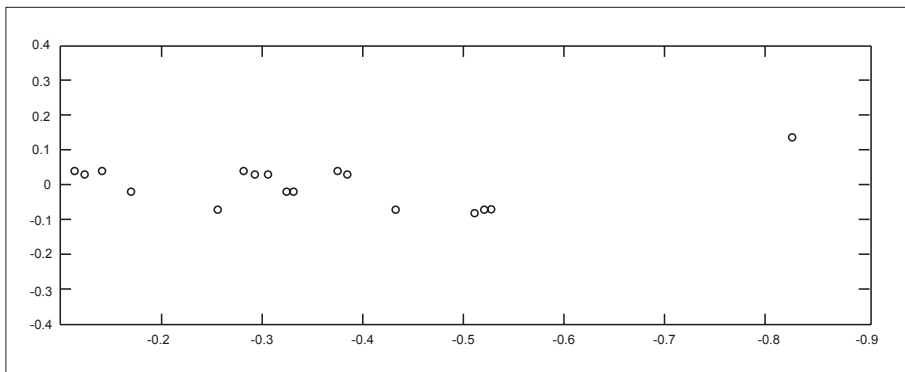
**Tabla 3**  
Resultado del test de Shapiro-Wilk para el retardo promedio

Shapiro-Wilk	
	Sig.
ABE1SO1	0,888
ABE1SO2	0,65
ABE1SO3	0,77
ABE2SO1	0,887
ABE2SO2	0,306
ABE2SO3	0,754
ABE3SO1	0,419
ABE3SO2	0,596
ABE3SO3	0,187
MBE1SO1	0,325
MBE1SO2	0,527
MBE1SO3	0,277
MBE2SO1	0,368
MBE2SO2	0,413
MBE2SO3	0,781
MBE3SO1	0,322

Shapiro-Wilk	
	Sig.
MBE3SO2	0,943
MBE3SO3	0,239
BBE1SO1	0,706
BBE1SO2	0,406
BBE1SO3	0,141
BBE2SO1	0,48
BBE2SO2	0,931
BBE2SO3	0,128
BBE3SO1	0,745
BBE3SO2	0,289
BBE3SO3	0,172

Del resultado anterior, se observa que no se rechaza la hipótesis nula, es decir que se acepta que cada uno de los tratamientos aplicados a la unidad experimental cumple una distribución normal, ya que el valor Sig es mayor a 0.05 para todos los tratamientos. Sig es conocido como el *P-value* y es el menor valor de significancia con el que se puede rechazar la hipótesis nula.

- *Homogeneidad de varianzas*: el resultado de la prueba gráfica se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Prueba gráfica de homogeneidad para el retardo promedio

En la gráfica anterior se observa una distribución casi simétrica alrededor del eje cero y no se tiene una forma de embudo. Por lo tanto, se puede concluir que estos datos cumplen con el supuesto de homogeneidad de varianzas.

Una vez verificados los supuestos, se procede a realizar el ANOVA. En este caso se tienen los siguientes efectos sobre la variable respuesta retardo promedio: efecto del factor tráfico, efecto del factor BE, efecto del factor SO, efecto de la interacción tráfico-BE, efecto de la interacción tráfico-SO, efecto de la interacción BE-SO y efecto de la interacción tráfico-BE-SO. En la Tabla 4 se muestran los resultados arrojados por el paquete estadístico SPSS.

**Tabla 4**  
Resultado del anova para el retardo promedio en el spss

Pruebas de los efectos inter-sujetos					
Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	2,969(a)	26	0,114	355046,1	0
Intersección	11,457	1	11,457	35623672	0
Tráfico	0,12	2	0,06	187273	0
BE	0,173	2	0,086	268877,8	0
SO	1,928	2	0,964	2996606	0
Tráfico * BE	0,146	4	0,037	113794,2	0
Tráfico * SO	0,182	4	0,046	141843	0
BE * SO	0,148	4	0,037	114739,5	0
Tráfico * BE * SO	0,272	8	0,034	105522,4	0
Error	2,61E-05	81	3,22E-07		
Total	14,426	108			
Total corregida	2,969	107			

a R cuadrado = 1,000 (R cuadrado corregida = 1,000)

El resultado anterior se analiza para cada efecto de la siguiente manera:

- Para el factor tráfico, la hipótesis nula indica que los promedios poblacionales para cada tipo de tráfico (alto=400 ms, medio=1 s y bajo=5s) son iguales, así:

$$H_0 \rightarrow \overline{\text{Alto}} = \overline{\text{Medio}} = \overline{\text{Bajo}} \quad (6)$$

Esto significa que el tráfico no influye en el retardo de la WBAN. Según el resultado del ANOVA, el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que el tráfico sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

Para el factor BE, la hipótesis nula indica que los promedios poblacionales para cada valor de BE (BE1=3, BE2=5 y BE3=7) son iguales, así:

$$H_0 \rightarrow \overline{\text{BE1}} = \overline{\text{BE2}} = \overline{\text{BE3}} \quad (7)$$



Esto significa que el parámetro BE no influye en el retardo de la WBAN. Según el resultado del ANOVA en el SPSS, el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que el parámetro BE sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

- Para el factor SO, la hipótesis nula indica que los promedios poblacionales para cada valor de SO (SO1=3, SO2=4 y SO3=5) son iguales, así:

$$H_0 \rightarrow \overline{SO1} = \overline{SO2} = \overline{SO3} \quad (8)$$

Esto significa que el parámetro SO no influye en el retardo de la WBAN. Según el resultado del ANOVA en el SPSS, el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que el parámetro SO sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

- Para la interacción de los factores tráfico-BE, la hipótesis nula afirma que el efecto de interacción entre los dos factores sobre el retardo es cero, así:

$$H_0 \rightarrow (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad (9)$$

En el ANOVA se observa que el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la interacción de los factores tráfico-BE sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

- Para la interacción de los factores tráfico-SO, la hipótesis nula afirma que el efecto de interacción entre los dos factores sobre el retardo es cero, así:

$$H_0 \rightarrow (\alpha\gamma)_{ik} = 0 \quad (10)$$

En el ANOVA se observa que el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la interacción de los factores tráfico-SO sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

- Para la interacción de los factores BE-SO, la hipótesis nula afirma que el efecto de interacción entre los dos factores sobre el retardo es cero, así:

$$H_0 \rightarrow (\beta\gamma)_{jk} = 0 \quad (11)$$

En el ANOVA se observa que el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la interacción de los factores BE-SO sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

- Por último se tiene la interacción de los factores tráfico-BE-SO. La hipótesis nula afirma que el efecto de interacción entre los tres factores sobre el retardo es cero, así:

$$H_0 \rightarrow (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0 \quad (12)$$

En el ANOVA se observa que el valor de la significancia es menor que 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la interacción de los factores tráfico-BE-SO sí afecta el retardo de la WBAN en modo *Slotted*.

Para una mejor interpretación de los resultados del ANOVA se analizan los gráficos de perfil, los cuales permiten comparar las medias marginales del modelo y así evidenciar si las medias marginales estimadas de un factor aumentan o disminuyen a través de sus niveles (figuras 8, 9 y 10).

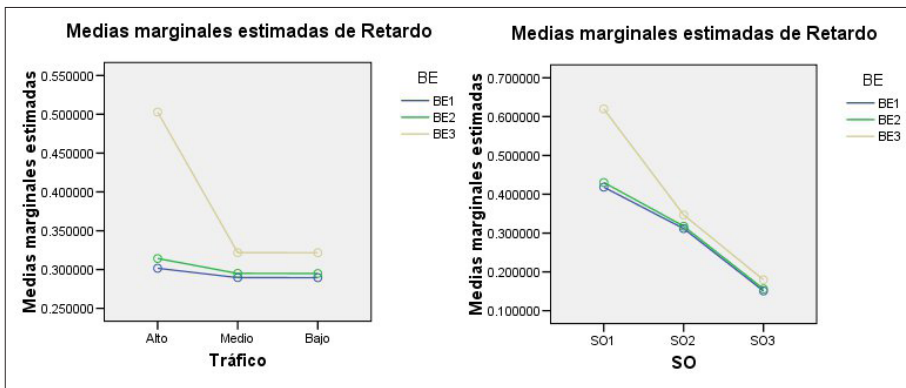


Figura 8. Gráficos de perfiles para el factor BE

Se observa que los niveles BE1 y BE2 para el factor BE proporcionan un mejor desempeño.

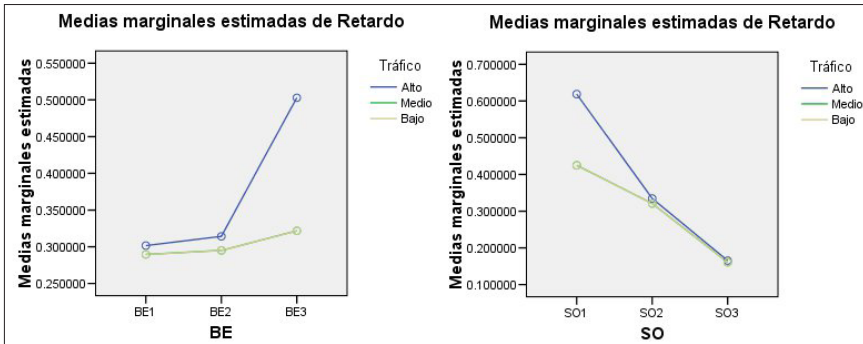


Figura 9. Gráficos de perfiles para el factor tráfico

Los niveles bajo y medio del factor tráfico proporcionan un mejor desempeño.

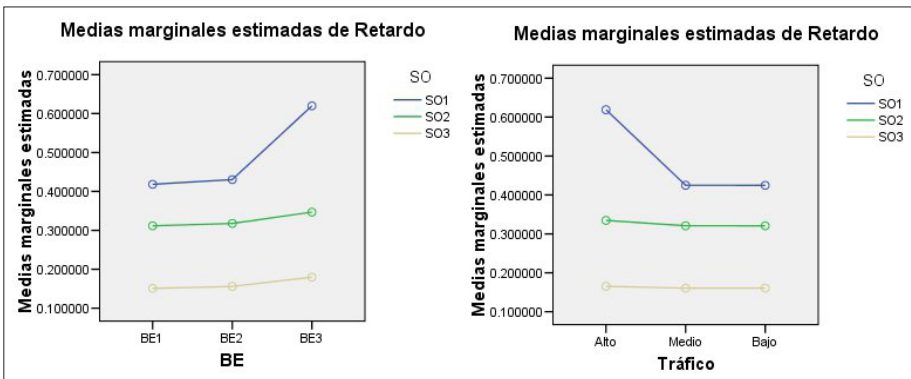


Figura 10. Gráficos de perfiles para el factor SO

El nivel SO3 del factor SO proporciona el mejor desempeño. Los mejores resultados para cada factor se resumen en la tabla 5.

Tabla 5

Niveles con menor retardo promedio para todos los factores

Factor	Nivel
BE	BE1 y BE2
SO	SO3
Tráfico	Bajo y Medio

De manera similar, se hace el análisis para las otras variables respuesta, probabilidad de pérdida de paquetes y consumo de energía, obteniéndose el resultado que se muestra en la tabla 6. Si se quiere implementar una red cuyo retardo promedio, probabilidad de pérdida de paquetes y consumo de energía promedio sean lo menor posible, se recurre a analizar estos resultados con el fin de encontrar la mejor combinación de los niveles de los factores.

**Tabla 6**

Comparación de resultados de los niveles para los tres factores

Retardo		Pérdida de paquetes		Energía	
Factor	Nivel	Factor	Nivel	Factor	Nivel
BE	BE1 y BE2	BE	BE2 y BE3	BE	BE2 y BE3
SO	SO3	SO	SO2 y SO3	SO	SO1
Tráfico	Bajo y Medio	Tráfico	Bajo y Medio	Tráfico	Alto y Medio

De la tabla anterior se encuentra que para el factor BE, el mejor nivel para las tres variables respuesta es BE2. En cuanto al factor tráfico se tiene como mejor nivel común el medio. Por último, el factor SO tiene el nivel SO3 común para el retardo y la pérdida de paquetes, mientras que para la energía no. Por lo tanto, con el fin de obtener un nivel intermedio entre los mejores niveles de SO para el retardo y la energía se selecciona el nivel SO2.

Se tiene entonces que la mejor combinación encontrada para los niveles de los tres factores es el siguiente tratamiento:

$$\text{Tráfico} = \text{Medio} = 1s, \text{BE} = \text{BE2} = 5 \text{ y } \text{SO} = \text{SO2} = 4 \rightarrow \text{MBE2SO2} \quad (13)$$

En la tabla 7 se muestra el resultado promedio de las tres variables respuesta,

**Tabla 7**

Resultados de las variables respuesta en el simulador OMNeT++

Retardo (s)	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Promedio
MBE2SO2	0,313893	0,313933	0,313941	0,313634	0,31385
<b>Pérdida</b>					
MBE2SO2	0	0	0	0	0
<b>Energía (J)</b>					
MBE2SO2	1,814159	1,814232	1,814406	1,813816	1,81415

## 5. IMPLEMENTACIÓN EN PLATAFORMA REAL

Con el fin de hacer efectivos los resultados del diseño experimental simulado, se busca una implementación del estándar IEEE 802.15.4, que permita hacer las modificaciones respectivas a los parámetros del estándar y que pueda ser programada en una plataforma real llamada *SHIMMER* [13]. Se encuentra el *Open-ZB* [14], el cual implementa la capa de enlace del IEEE 802.15.4 y una parte de la capa de red *ZigBee*. La versión descargada fue “IEEE 802.15.4 *nesC/TinyOS Implementation (TinyOS v2.0)*”.

Se procede entonces a programar cuatro nodos *SHIMMER* de tal forma que tres nodos le envíen información a un nodo central de la red o coordinador, con una separación de 1 metro y se realizan pruebas de comunicación durante 1 hora. Los resultados obtenidos para la probabilidad de pérdida de paquetes, retardo y consumo de energía se presentan en las tablas 8 y 9.

**Tabla 8**

Resultados de retardo y pérdida de paquetes en la plataforma *SHIMMER*

<b>Tiempo de prueba</b>	1 hora		
<b>Frecuencia de Transmisión</b>	100 bytes/s		
<b>Separación entre nodos</b>	1 metro		
<b>Nivel de Potencia</b>	15 (-7dBm)		
<b>Nodo</b>	<b>Pérdida paquetes</b>		<b>Retardo (s)</b>
2	0/641	0	0,01279
3	0/639	0	0,01288
4	0/643	0	0,01275

**Tabla 9**

Resultados del tiempo de vida de la batería en la plataforma *SHIMMER*

<b>Frecuencia</b>	1 dato/s
<b>Nivel de Potencia</b>	15 (-7dBm)
<b>Nodo</b>	Tiempo de vida
2	50,83 horas
3	50 horas
4	51,5 horas

Los resultados muestran un retardo promedio de 0,012 s, una probabilidad de pérdida de paquetes de cero y un tiempo de vida de la red de aproximadamente 50 horas.

## CONCLUSIONES

Como el estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 es empleado en muchas aplicaciones, es importante garantizar su correcto desempeño mediante la configuración adecuada de sus parámetros. Es por esto que este artículo propone para una aplicación en particular, monitoreo de signos vitales en pacientes, que se realice un diseño experimental simulado con el fin de determinar cuáles son los valores de los parámetros del protocolo (tráfico, BE y SO) con los que se obtiene un buen funcionamiento en cuanto a las variables respuesta, retardo promedio, pérdida de paquetes y consumo de energía. Se encuentra entonces la mejor configuración (mejor tratamiento) de los parámetros del protocolo, mediante el uso del ANOVA en la realización de un diseño experimental factorial en un simulador para redes de sensores.

El resultado de este diseño muestra que el modo *Slotted* del protocolo CSMA/CA tiene un mejor desempeño para retardo promedio, probabilidad de pérdida de paquetes y consumo de energía, cuando los nodos envían datos cada segundo, con un *macMinBE* de 5 y un *macSuperFrameOrder* de 4. Este resultado se implementó en una plataforma real, en la cual se hicieron pruebas durante una hora, obteniendo un resultado favorable para el retardo y la pérdida de paquetes.

Como trabajo futuro se plantea realizar el diseño experimental teniendo en cuenta la movilidad en los nodos y realizar un modelo del canal del cuerpo humano en el simulador *OMNeT++*, con el fin de que el resultado del simulador sea más cercano al comportamiento real de la red de sensores ubicada en el cuerpo del paciente. También es interesante buscar más mecanismos para incrementar el tiempo de vida de la batería, puesto que aunque se obtuvo un resultado de 50 horas aproximadamente, se podría pensar en maximizar aún más esta duración para comodidad del paciente.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el centro de excelencia ARTICA (ALIANZA REGIONAL EN TIC APLICADAS), fundada por Colciencias y el Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE, IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks- Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, 2006.
- [2] ZigBee Alliance. *Specifications*, (2010, Jan16). [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>
- [3] Continua Health Alliance. *Sobre la Alianza* (2010, Jan 16). [Online]. Available: <http://www.continuaalliance.com/sobre-la-alianza.html>.
- [4] E. D. N. Ndih, et al., "An analytical model for the contention access period of the Slotted IEEE 802.15.4 with service differentiation", *International Conference on Communication*, Dresden, Germany, 2009, pp. 1-6.
- [5] D. Kipnis, et al., "The ANGEL IEEE 802.15.4 enhancement layer: Coupling priority queueing and service differentiation", *Wireless Conference EW 2008 14th European*, Prague, 2008, pp. 1-7.
- [6] F. Shu, "Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 CSMA-CA protocol with QoS differentiation", *Intelligent sensors, sensor networks and information processing. ISSNIP 2008. International Conference*, Sydney, NSW, 2008, pp. 475-480.
- [7] M. Youn, et al., "IEEE 802.15.4 based qos support slotted CSMA/CA MAC for wireless sensor networks", *Sensor Technologies and Applications, SensorComm 2007. International Conference on*, Valencia, Spain, 2007, pp. 113-117.
- [8] R. O. Kuehl, *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, 2th ed. México: Thomson Learning, 2001.
- [9] D. Rohm, et al., "Configuring beaconless IEEE 802.15.4 networks under different traffic loads", in *Advanced Information Networking and Applications. AINA '09. International Conference on*, Bradford, 2009, pp. 921-928.
- [10] H. Pedraza, and L. Dicovalskyi. *Sistema de análisis estadístico con SPSS*. Managua, Nicaragua: INTA, 2006, pp. 14-70.
- [11] OMNeT++. *OMNeT++ 4.2 documentation and tutorials*, (2011, Sep7). [Online]. Available: <http://www.omnetpp.org/>
- [12] Números aleatorios y números al azar. Generador de Números Aleatorios sin repetición, (2011, Sep 7). [Online]. Available: <http://www.alazar.info/generador-de-numeros-aleatorios-sin-repeticion>

- [13] Shimmer. *Shimmer - Wireless sensor platform for wearable applications*, (2010, Sep 20). [Online]. Available: <http://www.shimmer-research.com/>.
- [14] open-ZB. *open-ZB.net - OpenSource Toolset for IEEE 802.15.4 and ZigBee*, (2011, Mar 28). [Online]. Available: <http://www.open-zb.net/>