

DetECCIÓN DE LA PROFUNDIDAD ANESTÉSICA EN SEÑALES REGISTRADAS POR EL CANAL ELECTROENCEFALOGRÁFICO F4

Detection of anesthetic depth in signals recorded by electroencephalographic channel F4

Tahimy González Rubio,^I Enrique Juan Marañón Reyes,^{II} Yissel Rodríguez Aldana,^{II} Arquímedes Montoya Pedrón^{III}

^I Departamento de Ingeniería Biomédica. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

^{II} Centro de Estudios de Neurociencias, Procesamiento de Imágenes y Señales. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

^{III} Hospital General Docente "Juan Bruno Zayas Alfonso". Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Introducción: durante una intervención quirúrgica es necesario que el paciente, bajo los efectos de la anestesia general permanezca inconsciente e insensible al dolor, sin embargo, se reportan casos de despertar intraoperatorio. Debido a la incidencia de este fenómeno y los efectos adversos a los que conlleva, el Centro de Estudios de Neurociencias, Procesamiento de Imágenes y Señales, de la Universidad de Oriente, Cuba, desarrolla un prototipo de monitor de anestesia que permita la detección de los cambios de estados anestésicos, a partir del reconocimiento automático de Niveles de Profundidad Anestésica en señales electroencefalográficas.

Objetivo: detectar de manera automática estados de sedación anestésica a partir de señales electroencefalográficas como sistema de apoyo al monitoreo intraoperatorio.

Métodos: se realizó el registro de las señales electroencefalográficas de 27 pacientes sometidos a cirugía general abdominal, seleccionándose para el estudio el canal F4. La detección de los niveles de profundidad anestésica se efectuó usándose métodos computacionales de Inteligencia Artificial.

Resultados: se redujo la escala de profundidad anestésica a tres niveles, obteniéndose una efectividad en el reconocimiento de: 90,24 % en el nivel ligero, 90,06 % en el moderado y 96,12 % en el nivel profundo.

Conclusiones: se proponen tres niveles de profundidad anestésica, detectados con más del 90 % de exactitud en las señales electroencefalográficas, lo cual posibilitará

mejorar la práctica diaria del anestesiólogo a partir del monitor que desarrolla el ya mencionado Centro de Estudios. Los resultados evidencian que la derivación F4 es representativa del comportamiento de los fármacos anestésicos en la actividad cerebral.

Palabras clave: niveles de profundidad anestésica; señal electroencefalográfica; reconocimiento automático.

ABSTRACT

Introduction: During surgery a patient under general anesthesia must remain unconscious and insensitive to pain. However, cases have been reported of intraoperative awareness. Due to the incidence of this phenomenon and the adverse effects it causes, the Center for Neuroscience and Image and Signal Processing Studies of the University of Oriente, Cuba, is developing a prototype for an anesthesia monitor allowing detection of changes in anesthetic status based on automated recognition of Anesthetic Depth Levels in electroencephalographic signals.

Objective: Automatically detect anesthetic sedation states in electroencephalographic signals as a support system for intraoperative monitoring.

Methods: Recording was conducted of electroencephalographic signals from 27 patients undergoing general abdominal surgery. The channel selected for the study was F4. Detection of anesthetic depth levels was performed using Artificial Intelligence computer methods.

Results: The anesthetic depth scale was reduced to three levels. Recognition effectiveness was 90.24 % for the light level, 90.06 % for the moderate level, and 12 % for the deep level.

Conclusions: Three anesthetic depth levels are proposed, which were detected with above 90 % accuracy in electroencephalographic signals. The daily work of anesthesiologists will be improved with the use of the monitor being developed at the above mentioned study center. Results show that F4 derivation is representative of the effect of anesthetics upon brain activity.

Key words: anesthetic depth levels; electroencephalographic signal; automatic recognition.

INTRODUCCIÓN

La anestesia general, produce estado de inconsciencia, amnesia, analgesia y relajación muscular debido a la administración de fármacos hipnóticos y otros por vía intravenosa, inhalatoria, o ambas a la vez, a fin de garantizar que el paciente se encuentre en las mejores condiciones fisiológicas posibles, antes, durante y después de una intervención quirúrgica.¹ Sin embargo, se reportan casos donde aparece el despertar y/o recuerdo intraoperatorio como consecuencia de la administración insuficiente de los fármacos anestésicos.

En la actualidad, la rutina de monitoreo de la anestesia general es un tema importante desde la invención de técnicas modernas de anestesia. Para distinguir el

estado consciente del inconsciente, se han estudiado varias observaciones clínicas y parámetros electrofisiológicos. Cambios del latido del corazón, la presión sanguínea, la frecuencia de respiración, lagrimeo y sudoración, así como estímulos motores han sido los parámetros básicos de los Anestesiólogos en su práctica diaria, pero estos signos son inconsistentes e inespecíficos,² debido a que durante la cirugía la evaluación clínica del paciente depende de las reacciones que el mismo presente y de la experiencia del especialista. Esta situación se hace más compleja por la variación que existe entre los parámetros fisiológicos, que llega a ser extrema en pacientes de alto riesgo, es decir, que presentan hipertensión arterial, arritmias cardíacas, traumas múltiples o que se someten cirugías cardíacas.² Luego este proceso incluye cierto grado de subjetividad, lo que implica que el paciente pudiese cambiar de niveles de profundidad anestésica (NPA) y los cambios fisiológicos ser imperceptibles al especialista.

La incidencia del despertar intraoperatorio ha sido reportada alrededor del 0,2 al 3 %, pero puede sobrepasar el 43 % en pacientes de alto riesgo.^{3,4} Este por ciento unido a la ocurrencia del despertar intraoperatorio en pacientes sanos, y los efectos negativos que provoca como disfunciones psicossomáticas, justifican que deban buscarse alternativas válidas que lo minimicen a toda costa. En este sentido, resulta imprescindible acudir al análisis de las principales fuentes de información fisiológica que brinda el paciente, destacándose las señales de Electroencefalograma (EEG), las cuales contienen información que permite identificar diferentes estados de conciencia en condiciones de sueño (o hipnóticos), así como el efecto de drogas anestésicas.⁵

El EEG no es más que el registro de la actividad eléctrica cerebral mediante electrodos colocados en el cuero cabelludo, donde cada electrodo simboliza una determinada derivación o canal electroencefalográfico que permite registrar diferentes frecuencias de 0 a 50 Hz, representadas en cuatro ondas que caracterizan a estas señales: las ondas beta peculiares en pacientes con estados de actividad mental intensa, las ondas alfa presentes en períodos de relajación con los ojos cerrados, y las ondas theta y delta representativas del sueño ligero y profundo respectivamente.⁶ Existen numerosos trabajos que demuestran que algunos parámetros derivados de estas señales, sirven para predecir la aparición de ciertas respuestas bajo ciertas condiciones. Estos parámetros se calculan a partir de un espectro de potencia conocido como Electroencefalografía Cuantitativa (QEEG: *Quantitative EEG*), constituyen un sistema de monitorización no invasivo y son sensibles a los efectos de los anestésicos.^{5,7}

En este sentido, el Centro de Estudios de Neurociencias, Procesamiento de Imágenes y Señales (CENPIS), ubicado en la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba, Cuba, diseñó un proyecto cuyo objetivo principal se enmarca en el desarrollo de un monitor de anestesia que use una cantidad mínima de canales electroencefalográficos, para facilitar el proceder quirúrgico y permita, mediante la cuantificación de la profundidad anestésica a partir de las señales del EEG, realizar el reconocimiento automático de estados de sedación, en aras de mejorar la sensibilidad en el monitoreo intraoperatorio.

Para llevar a feliz término el propósito anterior, se utilizaron las señales electroencefalográficas generadas por la derivación F4, caracterizadas por nueve parámetros del QEEG, y el algoritmo Máquinas de Soporte Vectorial como técnica de Inteligencia Artificial para realizar el reconocimiento automático de la profundidad anestésica.

MÉTODOS

A continuación se abordan temas referentes a la selección de los pacientes que participaron en el estudio, así como el protocolo establecido para el registro de las señales. Se argumenta la selección del canal electroencefalográfico usado en la investigación, y se explican las técnicas de Inteligencia Artificial empleadas para efectuar la detección de los NPA en las señales del EEG.

Protocolo de adquisición y registro de las señales

En la investigación se utilizaron con consentimiento informado escrito bajo el principio de voluntariedad del paciente y/o sus familiares, los registros electroencefalográficos de 27 pacientes, hombres y mujeres en un rango de edad entre 18 y 72 años, sometidos a cirugía general abdominal de tipo video endoscópica, en la Unidad Quirúrgica del Hospital General "Juan Bruno Zayas Alfonso" de Santiago de Cuba, Cuba. Del estudio se excluyeron a pacientes con antecedentes de epilepsia, enfermedades cerebro-vasculares y otras afecciones neurológicas.

El registro electroencefalográfico se realizó con el equipo Medicid Fénix y un montaje de 19 electrodos según el Sistema Internacional 10-20. Las señales fueron filtradas con un ancho de banda entre 0,5 y 50 Hz con una frecuencia de muestreo de 200Hz (200 muestras/segundo). Se garantizó que el registro no interfiriera con la inducción anestésica y el proceder quirúrgico.

El anestesiólogo midió los NPA estimándose las variables clínicas, parámetros hemodinámicos y cardiovasculares que se monitorean durante la cirugía, e informaba los niveles de profundidad al técnico de registro, quien establecía las marcas correspondientes en el registro de las señales del EEG. En las cirugías se aplicaron diferentes esquemas de inducción anestésica utilizándose los siguientes medicamentos: Isoflurane, Óxido Nitroso, Midazolán, Fentanil, Fenotavil, Propofol, Halotane, Diprivan, Pentanol, Atracurio, Nalozol, Vecurorio, Halotane y Beraminia. Los anestésicos se aplicaron vía endovenosa e inhalatoria y en todos los casos se asociaron relajantes musculares: Succinil Colina o Atracurio.

Selección del canal electroencefalográfico

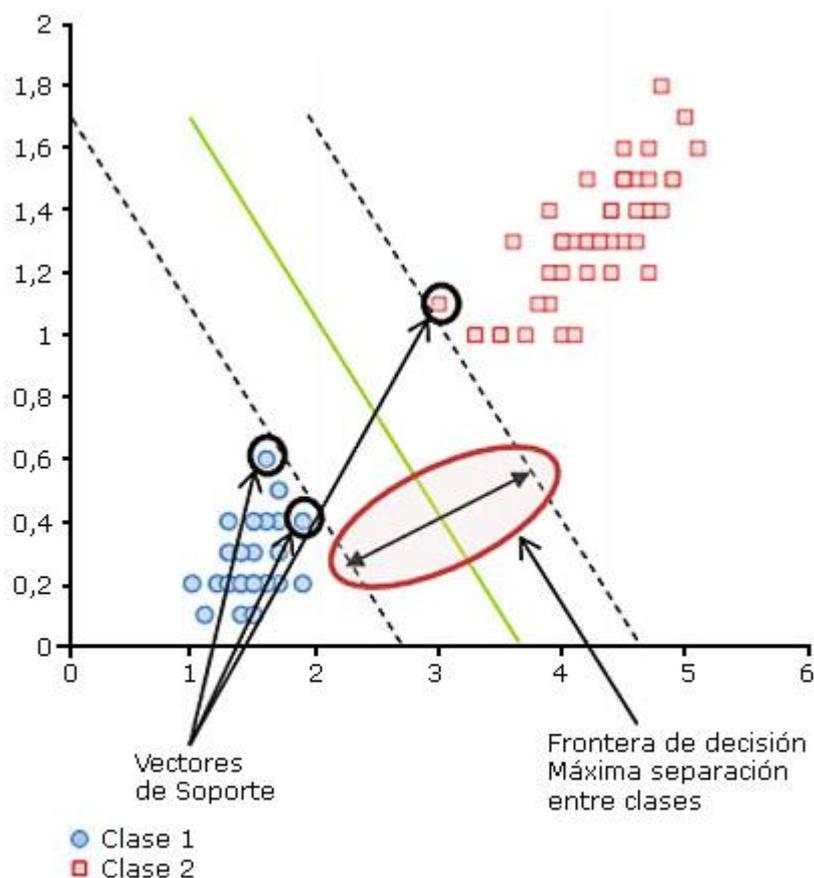
Se ha demostrado que determinadas posiciones en la región frontal de la corteza cerebral entre ellas la derivación F4, brindan importantes beneficios si se desea lograr un equilibrio entre la sensibilidad de la señal a los cambios de profundidad anestésica y la resistencia a los artefactos, de manera particular los producidos por movimientos faciales y oculares. Se ha comprobado además que las señales generadas por esta derivación, presentan una mayor sensibilidad a la influencia de agentes anestésicos, durante el proceso de inducción y en los cambios bruscos de profundidad.^{5,8}

Teniéndose en cuenta lo antes expuesto, sólo se utilizó el canal F4, que en previa revisión a los registros electroencefalográficos de la muestra de estudio por el neurofisiólogo *DrC. Arquímedes Montoya Pedrón*, Especialista de Segundo Grado en Neurofisiología, Jefe del Servicio de Neurofisiología Clínica del Hospital "Juan Bruno Zayas Alfonso", se corroboró que estas señales eran menos propensas a la interferencia de otros equipos de monitoreo cardiovascular, electrocoagulación, ventiladores, así como los cambios de posición corporal que implica la propia técnica quirúrgica.

Detección de los NPA en las señales electroencefalográficas

La detección, reconocimiento automático o clasificación de los NPA en las señales electroencefalográficas, se realiza a partir de la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial. Constituye una disciplina de la Ciencia de la Computación, y aunque no existe aún ninguna definición única y rigurosa para el término, todos los conceptos coinciden en que consiste en el desarrollo e implementación de métodos y algoritmos que permitan comportarse a las computadoras de modo inteligente.⁹ En este sentido destaca el Aprendizaje de Máquina (*Machine Learning*), el cual se basa en el desarrollo de algoritmos que permitan a las computadoras generalizar (aprender) comportamientos a partir de las propiedades de un set de datos de ejemplo, lo cual permitirá predecir comportamientos futuros a partir de lo ocurrido en el pasado.

La técnica de Inteligencia Artificial usada en la investigación para efectuar la clasificación de los NPA fueron las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM: *Support Vector Machine*), algoritmos que aprenden la frontera de decisión de dos clases distintas (en términos de Inteligencia Artificial, clase significa conjunto de datos con cierto parecido entre ellos, es decir, cada NPA representa una clase), a partir de la descripción dada por unos datos conocidos como vectores de soporte: puntos que se encuentran en el margen de decisión. Como resultado, las SVM proponen un Hiperplano Óptimo que brinde, desde el punto de vista estadístico, la mayor separación entre dos clases, así dada una nueva información el algoritmo será capaz de reconocer a qué clase pertenece (Fig. 1). Las SVM minimizan el conflicto de clasificaciones erróneas en el proceso de validación del algoritmo, maximizando el hiperplano de separación.¹⁰



Fuente: elaboración propia.

Fig. 1. Clasificación con SVM.

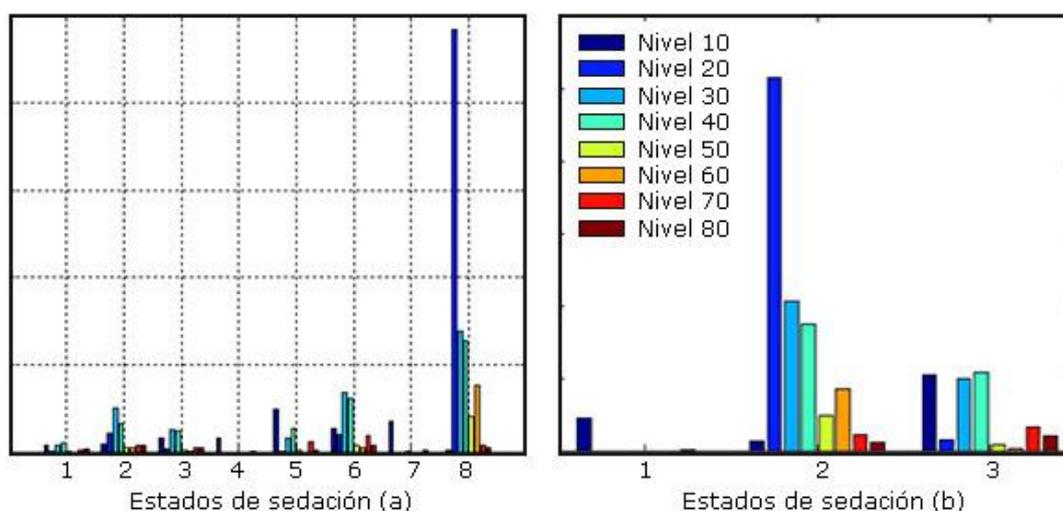
RESULTADOS

En las señales electroencefalográficas usadas, se marcaron ocho NPA según la escala de profundidad que se define en la [tabla 1](#). En la inducción anestésica, la combinación de fármacos y las dosis suministradas dependen de: el tipo de intervención quirúrgica, el estado físico del paciente o si este padece alguna enfermedad; en consecuencia, todos los pacientes no reaccionan igual a los fármacos anestésicos, por lo que los síntomas y signos clínicos a partir de los cuales el anesthesiólogo mide la profundidad anestésica, pueden variar y en ocasiones ser imperceptibles. En estas situaciones resulta de gran importancia la experticia del especialista, pues este factor pudiese impedir que el anesthesiólogo estime un nivel de profundidad erróneo.

A partir del inconveniente anterior se realizó, usándose técnicas no supervisadas de Inteligencia Artificial, un análisis al marcaje de los niveles de anestesia realizada durante las cirugías, para estudiar la similitud que existía entre los NPA. La [figura 2](#) muestra los resultados del análisis en un gráfico de barras, donde el eje horizontal representa los estados de sedación en la escala de profundidad anestésica presentada en la [tabla 1](#), y se establece una escala de colores para cada NPA. En la [figura 2\(a\)](#), el parecido que existe entre los NPA marcados en las señales electroencefalográficas de la muestra de estudio en cada estado de sedación.

Tabla 1. Escala de profundidad anestésica usada en el estudio

NPA	Estados de sedación
80	Sedación ligera, con respuesta a comandos verbales
70	Sedación con movimientos, después de estímulos de dolor ligeros
60	Sedación con movimientos, después de estímulos de dolor intensos
50	Estado hipnótico ligero
40	Estado hipnótico moderado
30	Estado hipnótico profundo
20	Estado hipnótico profundo
10	Estado hipnótico muy profundo



Fuente: elaboración propia.

Fig. 2. Análisis de similitud entre los NPA.

En aras de solucionar el problema anterior se modificó la escala ya mencionada, agrupándose los estados de sedación según su significación clínica en sedación profunda, moderada y ligera. Al aplicar una vez más los métodos computacionales correspondientes se obtuvo un patrón de comportamiento entre los NPA, el cual se muestra en la [figura 2b](#). Note cómo el nivel de profundidad que representa el estado hipnótico muy profundo es representativo en el primer estado, los niveles de profundidad que identifican la sedación moderada (NPA 20 al 60) prevalecen en el estado 2 de la gráfica, y los niveles de profundidad 70 y 80 presentan la mayor cantidad de muestras en el tercer estado (sedación ligera). Es menester destacar que estos niveles son los que menos muestras tienen debido a que el tiempo de registro de este estado antes de inducir la anestesia general es muy corto.

A partir del comportamiento antes descrito, los experimentos de clasificación de NPA en las señales electroencefalográficas usándose las SVM, se realizaron definiéndose los siguientes niveles de profundidad:

- Nivel ligero formado por los NPA 80 y 70.
- Nivel moderado constituido por los NPA 60 al 20.
- Nivel profundo representativo del estado hipnótico muy profundo.

Se debe precisar que esta propuesta fue puesta a consideración, sujeta a discusión y aprobada por el grupo de especialistas (médicos y científicos) colaboradores del proyecto en el cual se enmarca la investigación. Los niveles fueron detectados en las señales generadas por la derivación F4 con una Efectividad o Exactitud (Accuracy) de 90,24 % en el nivel ligero, 90,06 % en el nivel moderado y 96,39 % en el nivel profundo.

La [tabla 2](#) muestra los resultados obtenidos en la evaluación de los resultados de la clasificación de los tres niveles propuestos, para monitorear la profundidad anestésica del paciente durante el proceder quirúrgico. Para ello se utilizaron las métricas de rendimiento: error, sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo (PPV: Positive Predictive Value) y valor predictivo negativo (NPV: Negative Predictive Value).

Tabla 2. Evaluación de la detección de NPA en las señales del canal electroencefalográfico F4

Métricas	Nivel Profundo	Nivel Moderado	Nivel Ligero
Sensibilidad	90 %	98,69 %	68,13 %
Especificidad	97,09 %	63,33 %	93,98 %
Error	3,61 %	9,94 %	9,76 %
PPV	77,34 %	89,3 %	65,66 %
NPV	98,88 %	93,96 %	94,58 %

DISCUSIÓN

Los tres niveles definidos en el estudio fueron reconocidos de manera automática en las señales generadas por la derivación F4 con una exactitud de más del 90 %, lo cual demostró que la señal registrada por este canal electroencefalográfico es representativa del comportamiento de fármacos anestésicos en la actividad cerebral,

y por ende puede servir para monitorear diferentes estados de profundidad anestésica cualquier sea el esquema de inducción que se utilice, lo cual constituye un aporte relevante si se tiene en cuenta que los monitores de profundidad anestésica que existen en la actualidad, utilizan de tres a cuatro canales electroencefalográficos. Además, el empleo de un solo canal y su localización en la corteza cerebral permitirán disminuir el registro de artefactos, favoreciéndose así al procesamiento de la señal y la obtención de un mayor volumen de información de interés para el proceso de clasificación.

La efectividad alcanzada en la detección de los NPA permitirá realizar un monitoreo intraoperatorio bastante acertado y casi a tiempo real, si se tiene en cuenta que las señales son analizadas en segmentos de 256 muestras, lo cual representa 1,28 seg aproximadamente, esto proveerá al anesthesiólogo, de una herramienta apropiada de apoyo a la toma de decisiones durante el monitoreo, a fin de optimizar la supervisión intraoperatoria, el suministro de fármacos anestésicos y relajantes musculares en las dosis precisas, realizar una mejor evaluación continua del estado del paciente así como de sus funciones vitales. Todo lo anterior redundará en una futura mejora a la práctica clínica del anesthesiólogo, posibilitándose monitorear mejor al paciente y por ende prevenir la posibilidad de que ocurra el despertar intraoperatorio.

CONFLICTO DE INTERESES

Se informa que en la redacción e investigación que respalda a este artículo original, participaron de manera activa todos los autores, quienes leyeron y aprobaron el manuscrito final.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kumar P, Koshy T. Monitoring Devices for Measuring the Depth of Anaesthesia - An Overview. *Indian Journal of Anaesthesia*. 2007;51(5):365-81.
2. Senhadji L. Monitoring approaches in general anesthesia: A survey. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. 2002;30(1-3):85-97.
3. Arens JF, Cole DJ, Domino KB, Drummond JC, Cor JK, Miller RD, et al. Practice Advisory for Intraoperative Awareness and Brain Function Monitoring. Report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Intraoperative Awareness, *Anesthesiology*. 2006;104(4):847-64.
4. Baltodano A. Awareness o despertar intraoperatorio generalidades acerca de este fenómeno. *Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica*. 2012;69(600):15-9.
5. Montoya A, Marañón E, Rodríguez Y, Álvarez C, Salgado A. Evaluación de la eficacia de los parámetros del Electroencefalograma Cuantitativo en la medición del nivel de profundidad anestésico. *Revista Cubana MEDISAN*. 2014;18(3):301-17.
6. Niedermeyer E, Lopez Da Silva F. *Electroencephalography, basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott: Williams & Wilkins. Sexta edición; 2011. p. 1296. ISBN: 0-7807-8942-7.

7. Morimoto Y, Hagihira S, Koizumi Y, Ishida K, Matsumoto M, Sakabe T, et al. The Relationship between Bispectral Index and Electroencephalographic Parameters during Isoflurane Anesthesia. Osaka: Japan Anesthesia and Analgesia; 2004. p. 98.
8. Tan ZB. Evaluation of EEG $[\beta]^2/[\theta]$ -ratio and channel locations in measuring anesthesia depth. Journal of Biomedical Science and Engineering; 2010.
9. Russell SJ, Norvig P. Inteligencia Artificial. Un enfoque moderno. Segunda Edición. Madrid: Pearson Educación. S.A.; 2004. p. 1240. ISBN: 84-205-4003-X.
10. Webb AR, Copsey KD. Statistical Pattern Recognition. Tercera Edición. John Wiley & Sons, Ltd; 2011. p. 668. ISBN: 978-0-470-68227-2.

Recibido: 1ro. de marzo de 2015.
Aprobado: 2 de abril de 2015.

Tahimy González Rubio. Departamento de Ingeniería Biomédica. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.
Correo electrónico: tgonzalez@uo.edu.cu