

Interfaz cerebro computador modular basada en la interpretación del electroencefalograma (EEG) mediante RNA para el control de dispositivos electrónicos

Angel Villegas, Edgar Lugo, José R. Pacheco, Huxia Villegas
Centro de Procesamiento de Imágenes, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela
Email: {avillegas,ealugo,jpacheco}@uc.edu.ve

Resumen

Este artículo describe el diseño e implementación un prototipo de interfaz cerebro computador (ICC) modular con operación fuera de línea utilizado para simular la manipulación de un mando a distancia controlado únicamente por medio de la actividad cerebral. El sistema se basa en el análisis espectral de la actividad cerebral registrada durante la realización de tareas mentales sencillas. Se desarrollaron siete módulos independientes los cuales se implementaron en forma de controles ActiveX. Cada control ActiveX realiza una etapa de procesamiento y cuando se combinan permiten establecer la interfaz entre el cerebro y la máquina. La clasificación de los patrones asociados a las tareas mentales fue realizada por una red neuronal del tipo perceptrón multicapa. El sistema implementado permite simular la operación de dispositivos electrodomésticos de uso común como receptores de radio o televisión por medio de la actividad cerebral.

Palabras clave: Interfaz cerebro computador, clasificación de tareas mentales, ICC modular.

Modular brain computer interface based on EEG's interpretation by means of artificial neural networks for controlling electronics devices

Abstract

This paper describes the design and implementation of a prototype off line modular brain computer interface (BCI) used to simulate the operation of a remote control operated only by means of brain activity. The system is based on the spectral analysis of brain activity during simple mental tasks performing. Seven independent modules were developed and implemented in the form of ActiveX controls. Every ActiveX control makes one processing stage required and when they are combined allows building the interface between the brain and the machine. The classification of the mental tasks associated patterns was done by a multilayer perceptron artificial neural network. The system implemented, can simulate the remote control of standard device like a TV or Radio by the brain.

Keywords: Brain computer interface, mental task classification, modular BCI.

1. INTRODUCCIÓN

Una interfaz cerebro computador (ICC) es un dispositivo que se encarga de analizar señales provenientes de la actividad consciente de un individuo para traducirlas en acciones[1]; dicho de otra manera, este es un tipo especial de comunicación que le permite al usuario interactuar con un dispositivo computarizado utilizando únicamente su propia actividad cerebral. En cierta forma, una interfaz cerebral es parecida a cualquier medio de interfaz físico entre el hombre y la má-

quina, como un teclado, ratón o sistema de reconocimiento de voz; sólo que opera por canales de comunicación diferentes. El principal uso de esta tecnología es brindar asistencia a personas que han perdido sus capacidades motoras para facilitar su interacción con el entorno [1]. En este caso, el fin último no es simplemente lograr la interacción con el computador, sino utilizar a la máquina para permitir al usuario interactuar con el mundo que le rodea, mejorando así su calidad de vida.

2. INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADOR (ICC)

La concepción inicial de utilizar un sistema computacional para extraer información del cerebro de un individuo fue propuesta por Vidal en los años 70s, en el marco del proyecto “The Brain-Computer Interface” [2]. En ese momento, Vidal le dio nombre a un área de investigación que casi 20 años después presenta una actividad impresionante, en la que están involucrados decenas de grupos de investigación y laboratorios de todo el mundo como la Universidad de Oxford (Inglaterra), Wadsworth Center (Estados Unidos), Universidad de Graz (Austria), Universidad de Berlín (Alemania), Universidad de Tuebingen (Alemania), por citar algunos. En los trabajos de Wolpaw [1, 3] y Lehtonen [4] se cita y describe la actividad de algunos de los grupos de investigación más destacados en el área. Sin embargo, esta tecnología se encuentra aún en su infancia [5] quedando abiertos muchos campos para la investigación y desarrollo [3].

La idea fundamental que subyace en la interfaz cerebro computador se basa en que algunas características de las señales obtenidas del electroencefalograma (EEG) son un reflejo de la actividad mental consciente del individuo y por lo tanto pueden ser utilizadas para interactuar con el computador. Esta existencia de actividad eléctrica en la corteza cerebral de los humanos es conocida desde principios del siglo XX cuando Hans Berger efectuó las primeras mediciones que reportaban actividad rítmica en el cerebro humano y utilizó la palabra electroencefalograma (EEG) para designar el registro de ésta [6]. En aquel momento, sus observaciones lo llevaron a concluir que esta actividad eléctrica no era completamente aleatoria, sino que exhibía cierta periodicidad, y que además cambiaba tanto en su amplitud como en frecuencia dependiendo del estado de relajación o alerta del sujeto. Posteriormente se descubriría que existen regiones del espectro de frecuencias de las señales de EEG cuya presencia está íntimamente relacionada con el funcionamiento del sistema motriz y más aún ha sido demostrado que es posible lograr obtener un cierto grado de control sobre algunos ritmos y características específicas del electroencefalograma y que el usuario puede con el pasar del tiempo manejar estas variaciones de forma voluntaria. Esta habilidad se preserva incluso en individuos que poseen trastornos neuromusculares graves, por lo cual puede usarse como un mecanismo de comunicación alterno a los usados normalmente.

3. ELEMENTOS DE UNA INTERFAZ CEREBRO COMPUTADOR

Wolpaw [7] define que, en un sentido muy general, una ICC tiene una entrada, una(s) salida(s) y un algoritmo de traducción que las vincula. Este algoritmo involucra análisis en el dominio del tiempo, de la frecuencia o de ambos. La entrada es una señal característica o grupo de ellas, que guarda relación con algún fenómeno, proceso o actividad neurofisiológica del individuo junto con la metodología requerida para su extracción. Cada ICC utiliza un algoritmo particular para traducir su entrada en señales de control, este puede incluir ecuaciones lineales o no lineales, redes neuronales artificiales u otros métodos, pudiendo ser adaptativo o no. La salida de una interfaz cerebro-computador puede ser el movimiento de un cursor en una pantalla, la selección de letras o iconos u otro tipo de dispositivos de control. Esta salida provee de retroalimentación que el usuario y la ICC pueden usar tanto para adaptarse como para optimizar la comunicación.

Esta definición de los componentes de la ICC mostrada en la Figura 1, es adecuada para presentar una visión general de estos sistemas.

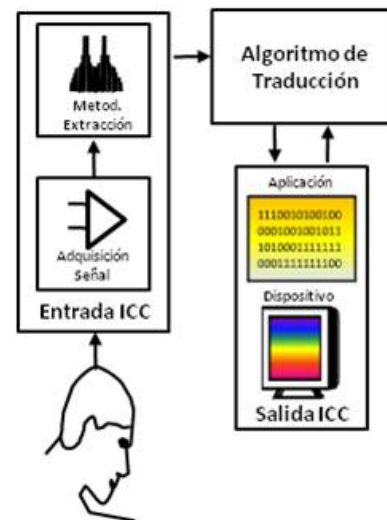


Figura 1. Esquema General de una Interfaz Cerebro- Computador.

El mismo autor señala en [2] que una ICC posee otras características distintivas, estas incluyen: el mecanismo de encendido/apagado del sistema, tiempo de respuesta, velocidad y exactitud (y su combinación en el parámetro de velocidad de transferencia de información), metodología de entrenamiento del usuario, tipo

de usuario, aplicaciones adecuadas para el sistema y las restricciones impuestas sobre los canales sensoriales concurrentes con la operación de la interfaz.

Algunos de estos elementos fueron tomados en cuenta por Mason y Birch [8] para el desarrollo de un marco general para el diseño de interfaces cerebrales. De esta manera, propusieron un modelo funcional detallado de los sistemas de interfaz cerebro-computador el cual define nueve elementos constituyentes de una ICC: usuario, electrodos, amplificador, extractor de rasgo, traductor de rasgo, interfaz de control, controlador de dispositivo, dispositivo controlado y ambiente de operación, como se muestra en la Figura 2.

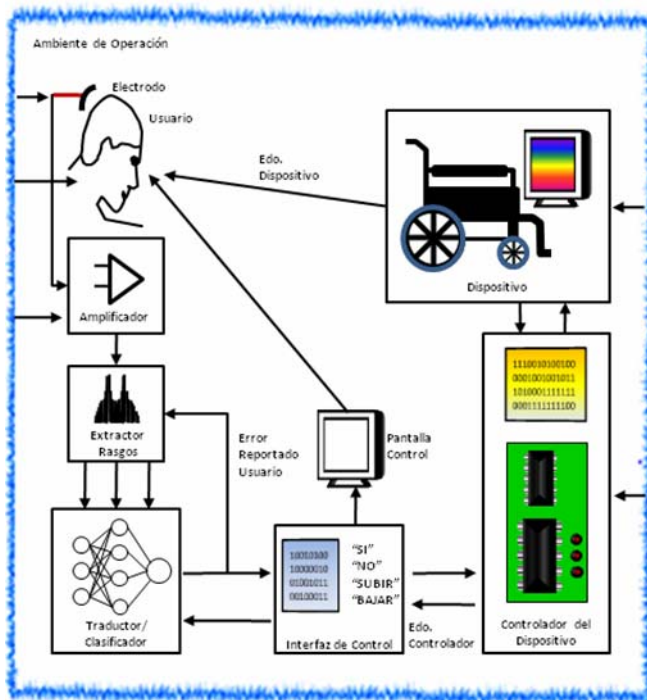


Figura 2. Modelo de referencia para el diseño de interfaces cerebrales propuesto en [8]

El modelo viene acompañado de una definición clara de la función de cada elemento, que facilita su utilización [8]:

- **Usuario:** Persona que controla el dispositivo en el sistema de interfaz cerebro-computador. Es el encargado de modificar el estado de su cerebro para generar las señales de control que operan al sistema.
- **Electrodos:** Representan el medio o elemento de medición (sea electrofisiológico o no) que permite

traducir la actividad cerebral del usuario en señales eléctricas.

- **Amplificador:** Se encarga de magnificar y filtrar la señal obtenida por los electrodos en la banda de interés para su posterior análisis.
- **Extractor de rasgo:** Se encarga de transformar la señal ya amplificada y extraer una característica o rasgo que corresponda al mecanismo neurológico empleado por el usuario para controlar la ICC.
- **Traductor de rasgo:** Genera señales lógicas de control a partir del rasgo extraído en la etapa anterior, es decir, abarca los mecanismos de clasificación presentes en la ICC encargados de discriminar el estado mental del usuario (que quiere este hacer).
- **Interfaz de control:** Traduce las señales lógicas de control en señales semánticas de control apropiadas para el dispositivo de control particular usado en la aplicación. En esta etapa, se puede incluir un dispositivo de visualización que brinde retroalimentación al usuario. Además, de acuerdo al tipo de ICC, puede incluir un elemento de estimulación.
- **Controlador de dispositivo:** Convierte las señales de control lógicas en señales físicas utilizadas por el dispositivo controlado. Se encarga de todas las condiciones inherentes a la operación del dispositivo controlado, inicialización, reinicio, etc.
- **Dispositivo controlado:** Es el elemento final del lazo y se encarga de efectuar la labor para la que fue concebida la ICC. Representa la aplicación final controlada por el usuario y pueden incluir: computadores, sintetizadores de voz, prótesis, televisores, luces de ambiente, teclados, apuntadores, entre otros.
- **Ambiente de operación:** Se refiere al entorno físico donde la ICC será utilizada, este juega un factor importante pues parámetros como la temperatura, ruido, presencia de personas u objetos y el estado general del usuario (motivación, fatiga, agotamiento) pueden afectar marcadamente el rendimiento de todo el sistema.

Con respecto al modelo, es importante destacar que los enlaces entre los componentes funcionales fueron elegidos para estar relacionados con áreas de investigación bien definidas (reconocimiento de patrones, interacción hombre-máquina, bioelectrónica) y han sido adaptados a la tecnología usada actualmente en el área de interfaces cerebro-computador para facilitar la comparación entre estos sistemas.

El modelo de Mason y Birch [8], ha orientado el diseño de nuevas ICC que buscan mantener un modelo similar que permita efectuar cualquier implementación particular de este tipo de sistemas, esto conduce a diseños más flexibles como el BCI2000 reportado por Schalk et,al [9]. El sistema implementado en esta investigación se ajusta a las definiciones propuestas en [8].

4. METODOLOGÍA

4.1. Consideraciones Generales del Diseño

Al revisar los modelos funcionales utilizados para diseñar y describir a diferentes sistemas de interfaz cerebro computador [2,4,8] , se observó que:

- Las ICC deben ser sistemas modulares.
- Es deseable permitir la operación fuera de línea aún cuando se implemente un sistema para trabajar en tiempo real.
- Debe buscarse la independencia del lenguaje de programación utilizado para codificar los módulos.
- Las aplicaciones deben estar separadas del algoritmo de traducción para permitir mayor flexibilidad.
- Las interfaces cerebrales basadas en el procesamiento de señales registradas mediante métodos no invasivos presentan mayor campo de aplicación que aquellas que requieren de un procedimiento quirúrgico invasivo para el usuario.
- La técnica de mayor uso actual para el registro de actividad cerebral en sistemas ICC es el electroencefalograma.
- Dentro de los paradigmas utilizados actualmente, el “reconocimiento de tareas mentales” resulta ser muy prometedor, toda vez que brinda al usuario la libertad de interactuar con el sistema computacional mediante la estrategia mental que le resulte más conveniente y el proceso de adaptación recae mayormente sobre el computador y no en el usuario.

Estas consideraciones fueron utilizadas como bases de diseño para el sistema presentado en este trabajo.

4.2. Descripción de la Base de datos

La interfaz cerebral se diseñó para trabajar fuera de línea, es decir, que opera con datos previamente almacenados en el disco duro de un computador. La base de datos utilizada en esta investigación, obtenida

en el marco del evento “BCI Competition III” [10], fue suministrada por el Instituto de Investigación IDIAP (Suiza).

Los datos corresponden a tres sujetos sanos y fueron grabados durante cuatro sesiones sin ningún tipo de retroalimentación para los sujetos. A los voluntarios se les pidió que mientras estaban sentados en una silla realizaran en su mente las siguientes tres tareas:

- Imaginación de movimientos repetitivos de la mano izquierda (clase 2).
- Imaginación de movimientos repetitivos de la mano derecha (clase 3).
- Generación de palabras comenzadas en una letra aleatoria (clase 7).

Las sesiones de cada sujeto fueron efectuadas en un mismo día, teniendo una duración de unos cuatro minutos cada una y con un descanso de entre 5 y 10 minutos entre sesiones. El sujeto realiza cada tarea durante unos 15 segundos y luego cambia de tarea de forma aleatoria a solicitud de un operador externo. Para cada usuario se dispuso de tres archivos para entrenamiento y uno para evaluación.

Para el registro del EEG se utilizó un equipo de marca Biosemi con 32 canales de entrada y electrodos dispuestos según el sistema 10-20. La frecuencia de muestreo usada fue 512 Hz. No se aplicó ningún algoritmo de eliminación de artefactos o filtrado sobre los datos adquiridos.

5. RESULTADOS

El sistema diseñado fue concebido en siete módulos interconectados, implementados por medio de controles ActiveX que fueron desarrollados en el lenguaje Visual Basic 6.0 y todos son visibles en tiempo de ejecución.

Módulo No.1: “Adquisición de datos”

Se encarga de tomar los datos, los cuales, están almacenados en disco rígido en formato ASCII sin encabezado. Conceptualmente el control presenta la estructura mostrada en la Figura 3. El cuadro inferior lista los métodos disponibles para el objeto “BCI_Adq”, las flechas señalan las variables de entrada/salida manipuladas por el componente de software.

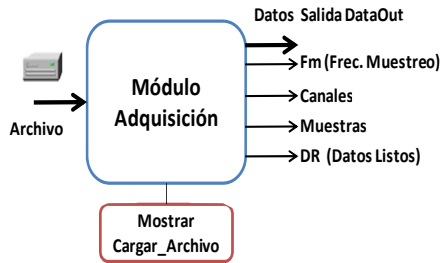


Figura 3. Módulo No.1 “Adquisición” (BCI_Adq).

Módulo No.2: “Filtrado”

Su función es aplicar el pre-procesamiento básico correspondiente al filtrado (pasa banda) y inventariado de los datos digitalizados. El módulo implementado permite:

- El uso de diferentes tipos de filtros, eligiéndose: Butterworth, Chebyshev y Elíptico..
- Realizar ajustes de la banda de paso, banda de corte, atenuación y rizado, asociados al filtrado de las señales.
- Incluir la posibilidad de aplicar un inventariado a los datos filtrados antes de entregarlos a la etapa de extracción. Se permite el uso de diferentes ventanas: rectangular, Hamming, Hanning, triangular, entre otras. Esta ventana se aplicará una vez finalizado el filtrado en todos los canales de información.
- Generar una salida que indique la finalización del filtrado.

Conceptualmente el módulo presenta la estructura mostrada en la Figura 4. El cuadro superior, representa los datos que son definidos por medio de la interfaz visual del módulo. La Figura 5 muestra la interfaz presentada al usuario para el ajuste de la configuración del pre-procesamiento de los datos.

Módulo No.3: “Extractor de Rasgos”.

Para seleccionar los rasgos que iban a ser extraídos de la señal electroencefalográfica con el fin de discriminar la realización de las tareas, se consideraron los resultados obtenidos en un estudio previo, en el cual se verificó que era posible obtener una representación de las tareas mentales seleccionadas (imaginación motora y generación de palabras) a partir del análisis de ciertas componentes del espectro,

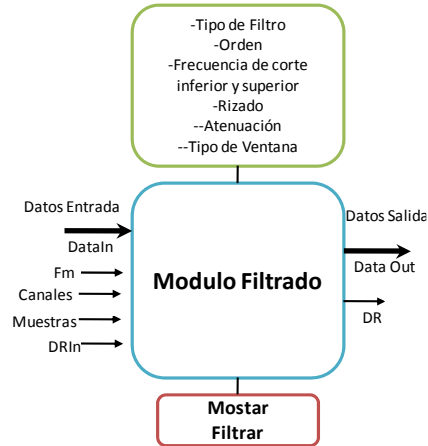


Figura 4. Módulo No. 2 “Filtrado” (BCI_Filter).

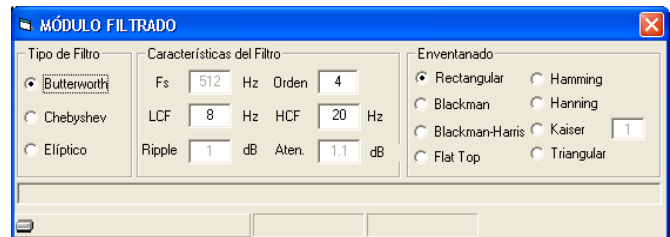


Figura 5. Interfaz presentada al usuario para configurar el filtrado de las señales de entrada.

especialmente aquellas comprendidas entre las bandas de 10Hz y 12Hz [11]. De esta manera, el vector de rasgos que utiliza el sistema está compuesto de una serie de valores que representan la información espectral (solamente amplitud) correspondiente a un determinado intervalo elegido por el usuario/operador. La cantidad de elementos que componen el vector de rasgos (*E*) no es rígida sino que puede adaptarse según la expresión:

$$E = (F_{max} - F_{min} + 1) * C \tag{1}$$

Donde *Fmax* y *Fmin* son los valores de frecuencia máximo y mínimo que el usuario/operador desee incluir y *C* es la cantidad de canales de datos seleccionados por el usuario para integrar el vector.

Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos con la base de datos disponible, la estimación del espectro de potencia se realiza 16 veces por segundo utilizando una ventana de un segundo. De esta manera, el número de segmentos de datos (*trials*) generados puede obtenerse como:

$$Segmentos = \frac{N - F_m}{F_m / Fps} \tag{2}$$

Donde:

N : Cantidad total de muestras a ser procesadas.

F_m : Frecuencia de muestreo del EEG en Hz

F_{ps} : Frecuencia de estimación del espectro (en Hz).

La estimación del espectro de potencia se hace mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT) a un segmento de datos de un segundo y posteriormente se estimará el espectro de amplitud como lo indica la ecuación (3):

$$PSD(x) = \frac{FFT(x) - \overline{FFT(x)}}{N^2} \quad (3)$$

En esta ecuación, x representa el vector que contiene la señal, N es el número de muestras y $PSD(x)$ es la densidad de potencia espectral de la señal x .

Este módulo ofrece a las demás etapas del sistema dos formas de salida. Una de ellas es por medio de la propiedad "DataOut" y la otra por medio de un archivo de datos de salida. Al generarse este archivo, la aplicación que hace la clasificación y las demás etapas de la interfaz cerebro computador puede estar localizada en otro programa ejecutable. El uso de "DataOut" es recomendable cuando toda la ICC resida en un mismo programa o cuando el sistema ya ha superado la fase de entrenamiento.

En la Figura 6 y Figura 7 puede verse el diagrama que describe al módulo de extracción y su implementación.

Módulo No.4: "Traductor"

El algoritmo de traducción consiste en un clasificador basado en redes neuronales artificiales, el cual recibirá un archivo con todos los segmentos de datos a clasificar junto con otro archivo que contiene los marcadores de clase o etiquetas que identifican la tarea realizada en cada segmento. El módulo ofrece como funciones:

- Entrenamiento y evaluación de la red.
- Selección y carga de archivos para entrenamiento desde archivo o desde los datos provenientes del módulo extractor.
- Selección y carga de archivos para evaluación de la red neuronal desde archivo o desde los datos provenientes del módulo extractor.
- Generación de salida a velocidad ajustable por el usuario desde 1 seg hasta 62.5 ms

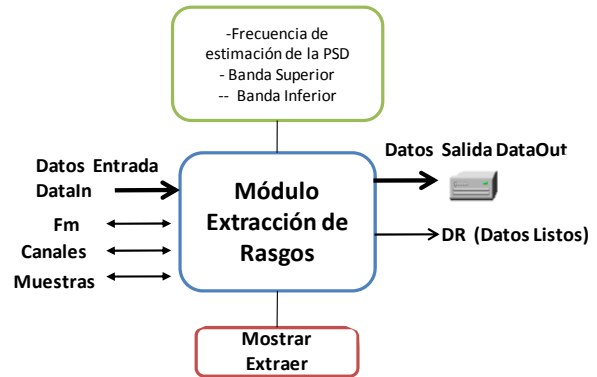


Figura 6. Módulo No.3 "Extractor".



Figura 7. Interfaz de usuario presentada por el módulo extractor de rasgos

- Generación de la matriz de confusión para los archivos con los datos que se introducen para ser clasificados.

La salida de esta etapa es un valor que representa la tarea mental realizada por el sujeto en el segmento de datos analizado.

La implementación actual (ver Figura 8) funciona con un clasificador basado en una red perceptrón multicapa de tres capas. Las capas de entrada, intermedia y de salida están constituidas por 56, 25 y 3 neuronas respectivamente. El número de elementos existentes en las capas de entrada y salida se ajustó según el tamaño del vector de rasgos (entrada) y la cantidad de posibles resultados para la clasificación (salida). Por su parte, la cantidad de neuronas de la capa intermedia fue determinado experimentalmente.

Las neuronas de las capas de entrada e intermedia presentan características similares, utilizando una

función de activación del tipo tangente hiperbólica. Las neuronas de la capa de salida son de tipo lineal. El clasificador se entrenó utilizando el algoritmo de retropropagación del error con coeficiente de *momentum* igual a 0,7. La selección de este tipo de red neuronal se hizo considerando su amplia aceptación y utilización en el campo del reconocimiento de patrones. La cantidad de neuronas por capa de la capa intermedia se ajustó experimentalmente

El control genera una gráfica que permite observar la evolución del entrenamiento (Figura 9). Al finalizar el entrenamiento de la red, esta se puede evaluar y permite generar la matriz de confusión del clasificador de tareas mentales (Figura 10).

La matriz de confusión resume el desempeño de cualquier sistema de clasificación. Para su construcción se requiere de un conjunto de datos de referencia y la respuesta de la red neuronal al tratar de clasificarlos. En base a los resultados, se construye una matriz cuadrada, en la cual cada elemento contiene el porcentaje de ejemplares asignados a la clase señalada por la columna, cuando la clase correcta es la indicada por la fila. De esta manera, la diagonal principal de la matriz indica la tasa de reconocimiento correcto de las tareas mentales. El resto del contenido de las filas indica cómo los ejemplares que no fueron reconocidos de forma exitosa se asignaron a las otras clases posibles.

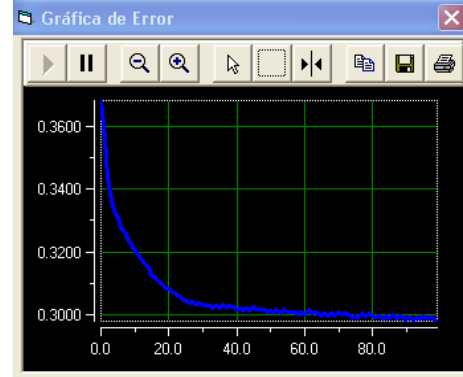


Figura 9. Ejemplo de gráfico de evolución del error durante el entrenamiento

	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Clase 1	81.25	13.81	4.930
Clase 2	5.892	89.46	4.642
Clase 3	6.465	11.96	81.57

Figura 10. Matriz de Confusión generada al clasificar un segmento de datos.

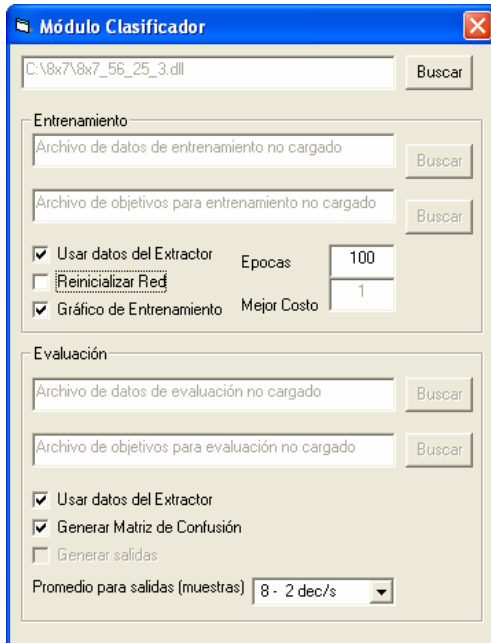


Figura 8. Implementación del módulo de Traducción o Clasificación de patrones.

Módulo No.5: “Interfaz de Control”

Su función es generar los comandos adecuados para poder manipular al controlador. También implementa criterios de rechazo para disminuir el número de decisiones erradas (ver. Figura 11).

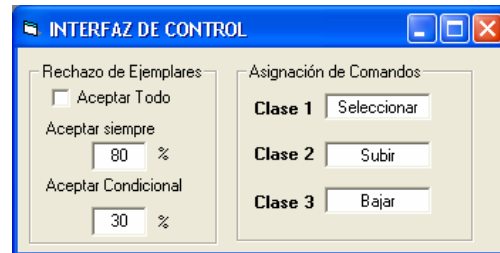


Figura 11. Módulo “Interfaz de Control”.

Módulo No. 6: “Controlador”

La acción realizada por este módulo es convertir la identificación de las tareas mentales en el movimiento de un cursor o un clic de ratón según la tarea

realizada. El módulo Controlador permite efectuar el mapeo entre los comandos y las acciones tomadas por el sistema sobre la aplicación controlada (Figura 12). Este mapeo se hace mediante una simple asignación. En la implementación hecha del sistema, se encuentran disponibles tres acciones: Activar una salida mediante el cambio de la propiedad "Select" y mover el puntero del sistema hacia arriba o hacia abajo. Mediante estas tres acciones es posible simular el control de un dispositivo electrodoméstico desde el computador. Adicionalmente, el valor de la clase seleccionada ("1", "2", "3") es enviado por medio del puerto serial del computador para poder controlar una aplicación externa.



Figura 12. Interfaz de usuario del módulo controlador.

Módulo No.7: "Dispositivo"

El dispositivo controlado por la ICC se compone de dos ventanas, la primera (ver Fig. 13) simula la operación de un mando a distancia para el control de un televisor. Se presentan tres iconos que permiten: Apagar/Encender el equipo, cambiar el canal y Subir/Bajar el volumen. El encendido/apagado del televisor se simula mediante la desactivación de las demás funciones. El cambio de canal y manipulación del volumen se simula mediante dos contadores.

La selección de funciones es contextual y progresiva, de esa manera se pueden utilizar las decisiones tomadas por el clasificador para implementar un total de seis tipos de acciones (encender, apagar, subir volumen, bajar volumen, subir canal, bajar canal).

La ventana "Simulador de Datos" presenta tres grandes botones (ver Figura 14) cada uno de ellos permite insertar un patrón de doscientos cincuenta milisegundos (250 ms), de la clase seleccionada, como datos para la interfaz. Este patrón se toma de los propios datos cargados y procesados en la interfaz que no fueron utilizados en el entrenamiento de la red neuronal.

Los datos se envían de forma continua a la interfaz hasta que se cambian al oprimir a otro botón. Mientras esta ventana está activa, las salidas del controlador están inhabilitadas. Mediante la ventana "Simulador de Datos", se logró simular la operación de un sistema de adquisición de EEG.

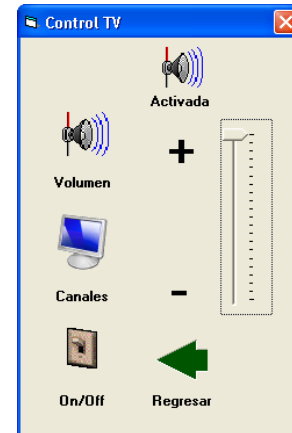


Figura 13. Aplicación que simula el control de un televisor mediante un mando a distancia.



Figura 14. Aplicación para simular el ingreso de datos a la ICC.

6. CONCLUSIONES

Una interfaz cerebro-computador es un sistema constituido por una serie de elementos de hardware y software que registra las señales electrofisiológicas generadas por la actividad del sistema nervioso central y transforma estas señales en los productos intencionales de dicha actividad, es decir, mensajes y ordenes que controlen dispositivos como cursores, mandos a distancia, teclados, sintetizadores de voz, robots móviles, prótesis robóticas, entre otros.

Las interfaces cerebrales son sistemas complejos y para su desarrollo es recomendable la división en módulos independientes, que puedan ser diseñados, probados y modificados sin afectar al sistema completo. Sin embargo, la existencia de módulos independientes puede conllevar a una repetición o recarga (*overhead*) de los datos.

La selección de un enfoque adaptativo para implementar la clasificación permite que el sistema pueda manejar datos de diferentes usuarios, obteniendo resultados satisfactorios en todos los casos.

El sistema implementado, permite utilizar la clasificación de sólo tres tareas mentales para efectuar el control de las funciones básicas de un equipo electrodoméstico estándar. Pese a que este control sólo se efectuó mediante una simulación, los datos de salida del controlador están accesibles vía puerto serial para la posterior implementación del hardware .

7. REFERENCIAS

- [1] Wolpaw, J, et al. (2002) : “Brain–computer interfaces for communication and control”. *Clin neurophysiol* Vol 113:767–791.
- [2] Wolpaw, J, et al (2000): “Brain-Computer Interface Technology: A Review of the First International Meeting”. *IEEE Trans Rehab Eng* Vol. 8, No. 2, pp 164–173.
- [3] Vidal, J. (1973): “Toward direct brain-computer communication”. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, Vol. 2, pp 157-180.
- [4] Lehtonen, J (2002): “EEG-based Brain Computer Interfaces”. Trabajo de grado de maestría, Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland.
- [5] Millán, José del R. (2003): “Adaptive Brain Interfaces”. *Communications of the ACM*, Vol. 46, No. 3, pp 74-80.
- [6] Bronzino, J. D (1995): “Principles of Electroencephalography”. En: J.D. Bronzino ed. *The Biomedical Engineering Handbook*, pp 201-212, CRC Press, Florida.
- [7] Wolpaw, J. y otros (2000). “Brain-computer interface research at the Wadsworth Center”. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol 8., No 2,pp 222–226.
- [8] Mason, G. y Birch, G (2003): “A general framework for brain–computer interface design”. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, Vol.11, No 1, pp 70 -85.
- [9] Schalk, G. y otros. (2004). “BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE transactions on biomedical engineering*, Vol. 51, No 6, pp 1034-1043.
- [10] “BCI Competition III”. Tomado en fecha 25 de Octubre de 2005 de la dirección http://ida.first.fraunhofer.de/projects/bci/competition_iii/index.html.