

**Área:** Bioingeniería  
**Eje:** Procesamiento de señales

## **CONTROLANDO UN ROBOT MÓVIL CON LA MENTE**

*Pablo F. Diez – Becario postdoctoral CONICET*

*Gabinete de Tecnología Médica e Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.  
pdiez@gateme.unsj.edu.ar*

### **Resumen**

En el presente trabajo, se presenta el control de un robot móvil a través de una Interfaz Cerebro Computadora (ICC) basada en Potenciales Evocados Visuales de Estado Estacionario (PEVEE) de alta frecuencia. Estos potenciales tienen la ventaja de no producir fatiga visual. Los algoritmos de procesamiento de señales electroencefalográfica y de control implementados son relativamente sencillos comparados con los utilizados en la bibliografía relacionada. Cinco sujetos participaron de los experimentos, todos ellos pudieron conducir el robot hacia el destino final propuesto. La tasa de detección de los potenciales evocados es superior al 81%. Esta es la primera propuesta para que un robot móvil sea comandado por una ICC basada en PEVEE de alta frecuencia. Los resultados obtenidos podrían beneficiar a personas discapacitadas permitiéndoles en un futuro controlar una silla de ruedas robótica.

Palabras claves: Robot Móvil, Interfaz Cerebro Computadora, Potenciales evocados.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Una Interfaz Cerebro Computadora (ICC) es un dispositivo que proporciona a una persona un nuevo canal no muscular de comunicación y control para enviar mensajes o comandos hacia el mundo exterior (Wolpaw, 2002: 767-791). De acuerdo a esto, una ICC debe ser capaz de interpretar las intenciones o comandos del usuario que se reflejan en su actividad cerebral, para ello, se debe monitorear la actividad mental a través de alguna técnica, como por ejemplo el electroencefalograma (EEG).

Cuando una persona mira un estímulo visual que destella a frecuencias mayores a 4 Hz, se registra en el EEG, un fenómeno de resonancia que se observa principalmente en la corteza visual del cerebro (Regan, 1989). A estos potenciales medidos en el EEG se los denomina Potenciales Evocados Visuales de Estado Estacionario (PEVEE). Cuando una persona fija su mirada en un estímulo que destella a una frecuencia determinada, se registra un PEVEE, es decir un incremento de la amplitud a esa frecuencia (Fig. 1); por lo tanto, si se dispone de varios estímulos, cada uno a distinta frecuencia, es posible determinar cual estímulo observa la persona.

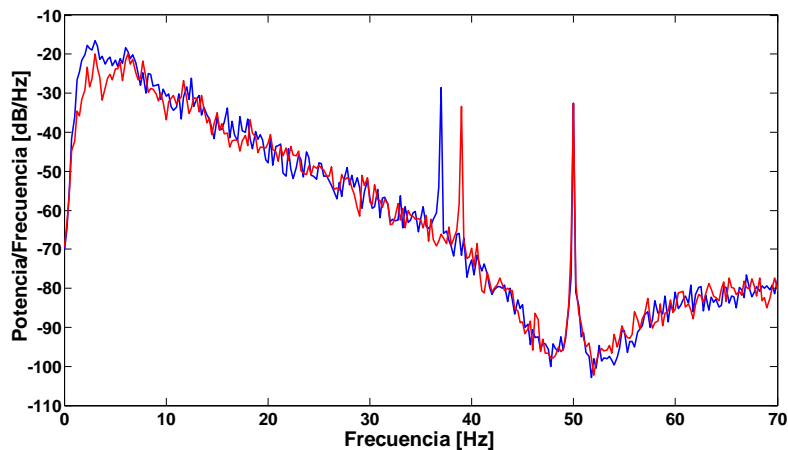


Figura 1: Espectros de dos señales EEG en las que se observa el aumento de amplitud debido a la estimulación en las frecuencias de 37 (azul), y 39 Hz (rojo).

Los PEVEE pueden ser provocados hasta los 90 Hz (Herrmann, 2001: 346–353) y este rango de frecuencias se puede dividir en tres subsistemas (Regan, 1989):

1. Frecuencias bajas (hasta 12 Hz)
2. Frecuencias medias (de 12 a 30 Hz)
3. Frecuencias altas (mayores a 30 Hz)

En general, los PEVEE en el rango de frecuencias bajas tienen amplitudes mayores a los rangos de frecuencias media y alta. Consecuentemente, es más fácil detectar los PEVEE de mayor amplitud. Los PEVEE más débiles, y por lo tanto más difíciles de detectar, son los de alta frecuencia, pero estos tienen la ventaja de producir menos fatiga visual; la cual es causada por el destello del mismo estímulo, haciendo que la ICC basada en PEVEE de alta frecuencia sea un sistema más confortable (Wang et al., 2005:26-28). Además, los rangos de baja y media frecuencia interfieren con el ritmo alfa propio del cerebro, asimismo los estímulos en el rango de media frecuencia pueden causar ataques de epilepsia (Fisher et al., 2005: 1426-1441).

Actualmente, existen varios trabajos en donde se ha mostrado que es posible controlar un dispositivo robótico real o simulado por medio de una ICC. Como por ejemplo, cuando se controló un robot Khepera (de pequeñas dimensiones, 5.7 cm de diámetro) a través de una ICC basada en diversas tareas mentales (escribir una carta, sacar una cuenta, y en imaginación motora de los miembros del cuerpo) (Millán et al., 2006: 1026-1033).

Sin embargo, solo existen unos pocos trabajos en la bibliografía relacionada donde se muestra el control de un dispositivo robótico por medio de una ICC basada en PEVEE. Particularmente, en 2008 se presentó el control de una prótesis robótica con forma de brazo

usando una ICC basada en PEVEE (Muller-Putz y Pfurtscheller, 2008). Sin embargo, la navegación de un dispositivo móvil es más reciente en el área de las ICCs.

Por ejemplo, en el año 2009 se logró navegar una silla de ruedas robótica usando PEVEE comprendidos entre 13 y 16 Hz (Mandel et al., 2009). En (Prueckl y Guger, 2009) se utilizó cuatro luces led parpadeando a 10, 11, 12 y 13 Hz para controlar un robot móvil de pequeñas dimensiones. Mas recientemente, en 2010 se presentó el control de un dispositivo robótico móvil con una ICC basada en PEVEE de 5 a 6.9 Hz utilizando una prueba estadística para determinar la presencia de PEVEE denominada prueba espectral F (spectral F-test) y un clasificador basado en reglas (Torres Müller, 2010: 407-416).

En este trabajo, se presenta el control de un robot móvil Pioneer 3-DX por medio de una ICC, con la novedad que la ICC opera con PEVEE de alta frecuencia, lo cual facilita la acción del operador, al disminuir el esfuerzo visual.

## 2. METODOS

A continuación se presentan las distintas etapas que se desarrollaron para controlar el robot mencionado, un esquema del montaje realizado para los experimentos se presenta en la Fig. 2; donde se observa la interrelación entre las distintas partes constituyentes.

### 2.1. Interfaz Cerebro Computadora

La persona era estimulada con cuatro luces led verdes colocadas en los costados de un monitor de PC, las cuales destellan a 37, 38, 39 y 40 Hz. Estas luces producen PEVEE en la persona, los cuales serán detectados y luego traducidos por la ICC en comandos que son

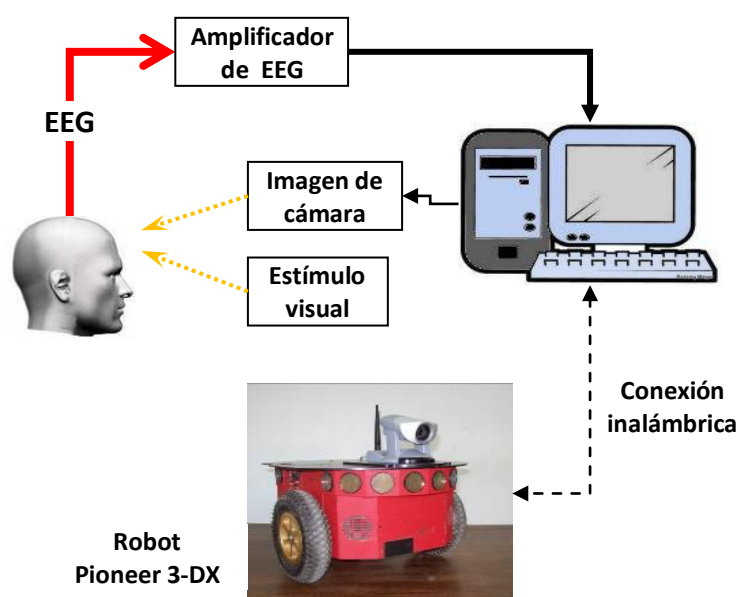


Figura 2: Equipamiento y montaje para realizar los experimentos BCI-robot

enviados al robot. Los comandos son “avanzar”, “detener”, girar a la “izquierda” o “derecha” para las luces de arriba (37Hz), abajo (38Hz), izquierda (40Hz) y derecha (39Hz) del monitor, respectivamente (Fig.3). El usuario observa por donde se desplazaba el robot ya que dispone en la pantalla de la PC de la imagen tomada por la cámara colocada sobre el robot.

Para detectar los PEVEE se utiliza un método desarrollado anteriormente, que es capaz de detectar estos potenciales de alta frecuencia en el EEG continuo (Diez et al., 2011:1-8). Para medir el EEG se utilizó un sistema de amplificación Grass 15LT y un conversor A/D NI-DAQPad6015. La señal fue muestreada a 256 muestras por segundo y el EEG se midió en las posiciones O1, Oz y O2, referenciado a FZ y con masa en A1-A2, según el sistema de posicionamiento 10-20. Además, para cada sujeto, se adquiere previamente un EEG de base durante 60 s, mientras el sujeto mira el centro de la pantalla sin prestar atención a ningún estímulo en particular.

El método de procesamiento del EEG se puede resumir en los siguientes pasos:

1. *Filtrado digital*: filtro pasabanda Butterworth, orden 6, frecuencias de corte en 32 y 45 Hz.
2. *Periodograma*: para estimar el contenido espectral de la señal, se utilizó con ventana rectangular de 1024 puntos.
3. *Potencia normalizada*: Se calcula según la siguiente ecuación:

$$P(f_i) = \sum_{c=1}^3 \frac{\sum_{\Delta f} \hat{S}_c(f_{i \mp 0.25})}{\sum_{\Delta f} \widehat{BL}_c(f_{i \mp 0.25})} / M \quad (1)$$

siendo  $P(f_i)$  la potencia normalizada para la frecuencia  $f_i$  ( $i = 37, 38, 39$  o  $40$  Hz);  $\hat{S}_c$  es el

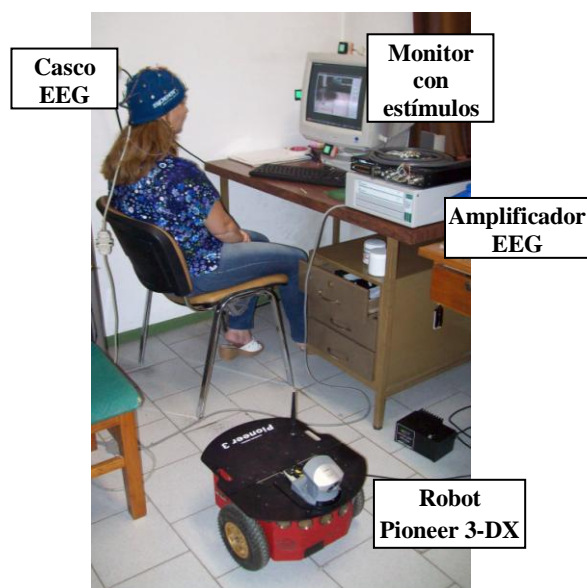


Figura 3: Sujeto conectado a la ICC, donde se observa el casco de EEG, el equipo de amplificación, las luces para estimular y el robot Pioneer 3-DX en el punto de partida.

periodograma del EEG en el canal  $c$ ;  $\widehat{BL}$  es el periodograma del EEG de base usado para ecualizar las potencias.

La ecualización del espectro es debida a que el espectro del EEG tiene menores potencias a medida que aumenta la frecuencia, por ejemplo, el potencial evocado que se obtiene a 37 Hz tiene mayor amplitud que otro potencial observado a los 40 Hz.

4. *Detección:* Para que un PEVEE sea detectado como tal y sea clasificado como una de las cuatro posibles clases, es necesario que dicho PEVEE sea más alto que los restantes potenciales durante al menos 2.5 s.

Este procedimiento se aplicó en ventanas de 2 s de duración que se movían en saltos de 0.25 s.

## 2. 2. Control del robot

Para realizar el control del robot se implementó un control de postura o de posición (Carelli, 2003: 235–247). Un esquema de la arquitectura del controlador del robot móvil se presenta en la Fig. 4, donde el robot se encuentra en la posición actual  $x_1$  y debe alcanzar una posición final  $x_2$  que se encuentra a una distancia  $e$  respecto de  $x_1$ ; además presenta un error de orientación  $\alpha$ .

Para alcanzar el punto final, el robot debe modificar su velocidad lineal  $u$  y angular  $\omega$  (Fig. 4). El controlador de postura tiene las siguientes expresiones para las acciones de control:

$$u = |u_{max}| \tanh(e) \cos\alpha \quad (2)$$

$$\omega = k\alpha + |u_{max}| \frac{\tanh(e)}{e} \sin\alpha \cos\alpha \quad (3)$$

Para este trabajo, se adoptó una velocidad lineal máxima  $u_{max}$  de 100 mm/s. El ajuste del controlador se realiza mediante la variable  $k$ , la cual fue ajustada empíricamente en 0.4.

Existe la posibilidad que el usuario encuentre obstáculos en su camino, los cuales en determinadas ocasiones no podrán ser evitados, ya que los comandos desde la ICC no son actualizados con la suficiente rapidez; es decir que con la ICC es difícil conseguir el control fino de las acciones del robot. Por ejemplo, resultaría complicado pasar a través del marco de una puerta sin correr el riesgo de colisionar contra el mismo marco, también si el robot se encuentra próximo a un obstáculo que no ha sido detectado por el usuario es posible que exista una colisión. En cualquier caso, es necesario que el robot detecte una situación de riesgo y tome las acciones necesarias para corregir esta situación.

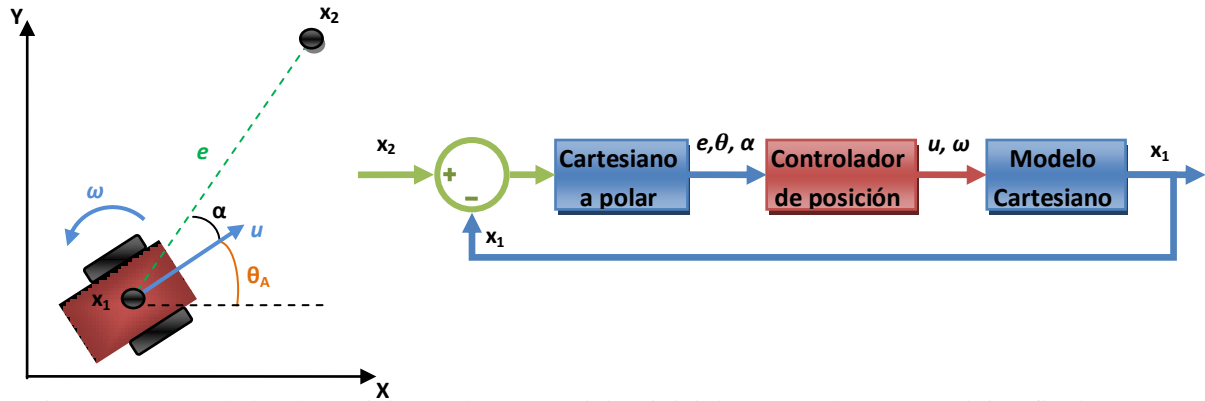


Figura 4: Controlador de posición, robot en posición inicial  $x_1$  para alcanzar posición final en  $x_2$  (izq.) y la arquitectura del controlador (der.)

Para evitar un choque, las acciones de control  $u$  y  $\omega$  calculadas en las ecuaciones (2) y (3) necesitan ser cambiadas. Para lograr esto, se utilizó el concepto de impedancia, mediante el cual la interacción mecánica ha sido sustituida por una interacción a distancia y sin contacto, teniendo en cuenta la distancia medida entre el robot y el obstáculo detectado. De esta manera, se genera una fuerza ficticia cuando un obstáculo es detectado, la cual empujará al robot alejándolo del obstáculo (Carelli, 2003: 235–247). En este trabajo se utilizaron los sensores ultrasónicos de los que consta el robot Pioneer para medir la distancia ente el robot y los objetos en el ambiente.

La interacción entre los comandos de la ICC y los movimientos del robot debe ser tenida en cuenta para conseguir una navegación estable. Cuando el usuario desea enviar un comando al robot (avanzar, girar a la izquierda, a la derecha o detener), debe mirar el estímulo correspondiente. La ICC debe entregar al controlador del robot las coordenadas del nuevo punto de destino  $x_2$ , de acuerdo a la selección realizada por el usuario. Para ello es necesario calcular primero el error de orientación, teniendo en cuenta que el robot solo puede moverse en dirección ortogonales a lo largo de los ejes:

$$\alpha = \theta_A + \psi \quad (4)$$

donde  $\theta_A$  es la dirección actual del robot y  $\psi$  es el ángulo de giro de la nueva dirección ( $\pm\pi/2$  rad para izquierda o derecha y 0 rad para avanzar en línea recta). Luego, las coordenadas del nuevo punto destino  $x_2$  se calculan como:

$$X_d = X + 10 \cos \alpha \quad (5)$$

$$Y_d = Y + 10 \sen \alpha \quad (6)$$

donde  $X_d$  e  $Y_d$  son las coordenadas del punto  $x_2$ , que se encuentra 10 m más delante de la posición actual. Posteriormente, con estas coordenadas se calculan las acciones de control en  $u$  y  $\omega$  según las ecuaciones (2) y (3). Entonces, el robot se mueve en la dirección deseada cambiando el ambiente que se encuentra a su alrededor, lo cual es transmitido al usuario a través de la imagen captada por la cámara a bordo del robot.

### 3. RESULTADOS

Para evaluar el desempeño de la ICC y el controlador del robot, se propuso un experimento en el cual cinco sujetos (edad promedio de  $24 \pm 4$  años, una sola mujer), debieron navegar el robot hacia un lugar determinado dentro del Laboratorio de Electrónica Digital de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan. La tarea consistía en conducir el robot desde el lugar donde estaba conectado el sujeto a la ICC (Fig. 3) hasta una de las puertas de acceso al Laboratorio. Los sujetos que participaron no tenían experiencia previa utilizando una ICC o en conducir un robot.

En la Fig. 5 se muestra el camino recorrido por el robot para alcanzar su destino durante uno de los experimentos.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los cinco sujetos, particularmente, el tiempo consumido, la tasa de error y el número de decisiones en cada experimento. El sujeto 5 realizó el experimento dos veces.

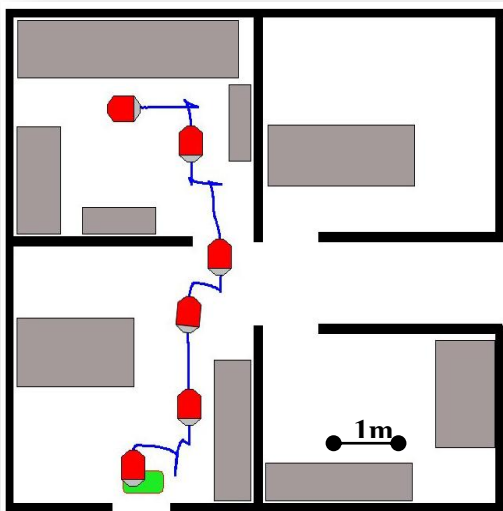


Figura 5: Camino recorrido por el robot hacia el destino propuesto (en verde) cuando fue controlado por el sujeto 5. En gris se grafican los escritorios y estanterías del laboratorio.

**Tabla 1: Resultados de la navegación del robot**

Sujeto	Tiempo [s]	Error	Correctos
		% (n)	% (n)
1	150	0 (0)	100 (20)
2	228	4,2 (1)	95,8 (23)
3	205	19 (4)	81 (17)
4	164	12,5 (2)	87,5 (14)
5	220	16,7 (2)	83,3 (10)
	150	18,2 (2)	81,8 (9)
<b>Media</b>	<b>186,2</b>	<b>11,8(2,2)</b>	<b>88,2 (14,6)</b>

#### 4. DISCUSIÓN

Todos los sujetos que participaron del estudio pudieron navegar el robot hacia el destino propuesto, independientemente del nivel de experiencia en ICC que tenían previo al experimento. No manifestaron molestias o fatiga con los estímulos debido a la alta frecuencia utilizada. Lograron el control del robot de manera sencilla y rápidamente.

El escenario no fue configurado especialmente para el experimento, de manera de asemejar lo más posible a la realidad el experimento. Así, en algunos lugares la distancia entre los objetos era tan solo de unos centímetros mayor a las dimensiones del robot.

Durante el funcionamiento del sistema, la ICC se enfrenta con el problema de proporcionar un resultado cada 0.25 s, en la mayoría de los casos el sujeto no se encuentra mirando un estímulo, por lo tanto no se debe emitir ningún comando. Sin embargo, los estímulos se encuentran en el campo visual del usuario y eventualmente, puede ser detectado un PEVEE sin que el sujeto esté efectivamente mirando uno de los estímulos, esto es conocido como “toque de Midas”.

La tasa de detección de los PEVEE es de un 88% en promedio, la cual es suficiente para navegar un robot. El sistema de control y evasión de obstáculos se desempeñó de manera correcta, haciendo más sencillo el pasar por la puerta y evitando colisiones con las estanterías y escritorios que existen en el lugar del experimento.

En trabajos similares (Mandel et al., 2009); (Prueckl y Guger, 2009) y (Torres Müller, 2010: 407-416) donde se controlan sistemas robóticos móviles, se utilizan algoritmos de procesamiento de EEG más complicados y además los algoritmos de control y evasión de obstáculos son más complejos.

Por ejemplo, en (Mandel et al., 2009) se obtiene un desempeño del 90%, pero es necesaria una fase de entrenamiento de unos 10 minutos, además en el procesamiento del EEG se utiliza un periodo de tiempo refractario para evitar el efecto del toque de Midas. Para la navegación del vehículo móvil se usó el Nearness Diagram Navigation method, es decir se necesita el conocimiento previo del escenario. En este trabajo, no existe fase previa de entrenamiento, ni tampoco periodo refractario por lo que el sujeto puede enviar comandos cuando el lo desee. Además, el algoritmo de control propuesto no necesita conocimiento previo del escenario, de hecho el sujeto 1 era la primera vez que entraba al escenario propuesto. En (Mandel et al., 2009), los sujetos debían realizar una trayectoria con forma de “8”, dentro de un escenario de 8 m de largo por 5 m de ancho, aproximadamente. En este trabajo, aunque la trayectoria es más simple, se presenta un escenario más pequeño



(6,5x3,5m) y además se incluyen diversos obstáculos como estanterías y escritorios, que son evitados exitosamente por el sistema.

En (Prueckl y Guger, 2009) se obtuvo una tasa promedio de error del 17.3% sobre tres sujetos, mientras que en este trabajo fue un poco menor (11.8%). Sin embargo, en (Prueckl y Guger, 2009) no se presentan datos respecto de la trayectoria, control o tareas realizadas por el robot, sino que el trabajo solo se enfoca a la evaluación del desempeño del sistema de ICC desarrollado.

En (Torres Müller, 2010: 407-416) se utilizó un clasificador basado en reglas y para extraer los PEVEE un análisis espectral estadístico (spectral F-test) obteniendo un 91% de exactitud en la clasificación; en conjunto con mapas del ambiente para generar caminos seguros con bajo riesgo de colisión. Para los experimentos en (Torres Müller, 2010: 407-416) se implementó un escenario hipotético, conformado por dos cuartos unidos entre sí por una puerta de 1,2 m; la tarea consistía en conducir una silla de ruedas robótica de un cuarto hacia el otro a través del camino seguro generado por el sistema. En este trabajo se obtuvo una exactitud cercana (88%) mediante un método más simple, mientras que el controlador propuesto genera velocidades para controlar el robot basado en la información proporcionada por los sensores ultrasónicos. En nuestro caso, la tarea era similar a la propuesta en (Torres Müller, 2010: 407-416) , ya que se debía conducir el robot desde un cuarto hacia el otro a través de una puerta.

Finalmente, cabe destacar que ninguno de los trabajos relacionados controla el dispositivo móvil usando PEVEE de alta frecuencia, los cuales mejoran el rendimiento porque producen una fatiga mucho menor en el usuario.

## **5. CONCLUSIÓN**

En el presente trabajo, se presentó el control de un robot móvil a través de algoritmos de procesamiento de señales EEG y de control, relativamente sencillos, con los que se obtienen resultados de hasta 100% de precisión en la clasificación de los PEVEE. Siendo esta la primera vez que un robot es navegado efectivamente con una ICC basada en PEVEE de alta frecuencia.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser extendidos al funcionamiento de una silla de ruedas robótica, la cual podría ayudar a personas discapacitadas a desempeñarse mejor en su vida diaria.

## BIBLIOGRAFÍA

- Carelli R., Oliveira Freire E., Corridor navigation and wall-following stable control for sonar-based mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems* 45:235–247 2003.
- Diez P. F., Mut V., Avila E. y Lacia E., Asynchronous BCI control using high-frequency SSVEP, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. 8:39, 2011.
- Fisher R. S., Harding G., Erba G., Barkley G.L., Wilkins A. Photic – and pattern - induced seizures: A review for the epilepsy foundation of america working group, *Epilepsia*, 46(9):1426-1441, 2005.
- Herrmann C. S. Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Exp Brain Res*, 137:346–353, 2001.
- Mandel C., Lüth T., Laue T., Röfer T., Gräser A., y Krieg-Brückner B., Navigating a Smart Wheelchair with a Brain-Computer Interface Interpreting Steady-State Visual Evoked Potentials, In *Proceedings The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 11-15, 2009 St. Louis, USA
- Millán J. del R, Renkens F., Mouriño J., Gerstner W.: Noninvasive Brain- Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG, *IEEE Trans. Biomed. Eng*, 51(6):1026-1033, 2004.
- Muller-Putz G.R., y Pfurtscheller G. Control of an Electrical Prosthesis With an PEVEE-Based BCI, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 55(1): 361-364, 2008.
- Prueckl R., Guger C., A Brain-Computer Interface Based on Steady State Visual Evoked Potentials for Controlling a Robot, In *Proceedings of the 10th International Work-Conference on Artificial Neural Networks IWANN '09*
- Regan D. *Human Brain Electrophysiology: Evoked Potentials and Evoked Magnetic Fields in Science and Medicine*. New York: Elsevier, 1989.
- Torres Müller S.M., Freire Bastos-Filho T., Cardoso Celeste W., Sarcinelli-Filho M., Brain-computer Interface Based on Visual Evoked Potentials to Command Autonomous Robotic Wheelchair , *Journal of Medical and Biological Engineering*, 30(6): 407-416.
- Wang Y., Wang R., Gao X., Gao S.: Brain-computer Interface based on the High-frequency Steady-state Visual Evoked Potential. In: *Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Neural Interface and Control*, May 2005, Wuhan, China; 2005:26-28.
- Wolpaw J. R., Birbaumer N., McFarland D. J., Pfurtscheller G. y Vaughan T. M., Brain-computer interfaces for communication and control. *Electroen. Clin. Neuro.*, 113(6):767-791, 2002.