

# Algoritmo de SLAM en un Robot Móvil gobernado por una Interface Cerebro-Computadora

F. A. Auat Cheeín<sup>1</sup>, R. Carelli<sup>1</sup>, F. Lobo Pereira<sup>2</sup>, T. F. Bastos Filho<sup>3</sup>, M. Sarcinelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, Av. San Martín Oeste 1109, San Juan, Argentina. {fauat, rcarell}@inaut.unsj.edu.ar*

<sup>2</sup>*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Rua Dr. Roberto Frias s/n. 4200-465 Porto, Portugal. flp@fe.up.pt*

<sup>3</sup>*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, Vitória-ES, Brasil. {teodiano, mario.sarcinelli}@ele.ufes.br*

**Resumen**— En este trabajo se presenta la aplicación de un algoritmo de Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM, por sus siglas en inglés de Simultaneous Localization and Mapping) en una Interface Cerebro-Computadora (ICC) que gobierna la navegación de un robot móvil. La ICC consta de un panel con lugares y funciones predefinidas dentro de un ambiente conocido. El paciente, mediante sus señales electroencefálicas, puede elegir a voluntad desde el panel de control, la función a ejecutar o el destino a alcanzar por el robot móvil. El algoritmo de SLAM permite generar mapas de nuevos entornos. Estos mapas, son segmentados y adicionados a la ICC, ampliando así las opciones del panel. Con los mapas obtenidos es posible generar trayectorias de navegación para el robot móvil. Acompañan este trabajo, los resultados experimentales obtenidos.

**Palabras Clave**— SLAM, robot móvil, Interfaces Cerebro-Computadora.

## I. INTRODUCCIÓN

El uso de Interfaces Cerebro-Computadoras (ICC) para el tratamiento de discapacidades físicas está relacionada principalmente a mejorar la movilidad del paciente y a su interacción con otras personas.

Las ICC adquieren las señales electroencefálicas, filtran sus artefactos y las interpretan. Esta interpretación no necesariamente implica la directa lectura de la intención del paciente, sino también la adjudicación de un determinado comando de acción al detectarse un evento -estado mental-específico. Tanto los eventos y los estados mentales en general, deben haber sido generados por el paciente en forma voluntaria. El objetivo de la ICC es la aplicación a la que es destinada.

Entre las distintas aplicaciones de la ICC se pueden citar: el control del movimiento de un puntero de mouse ([1]); la escritura de una carta mediante la selección de los caracteres ([1]); el control de un robot móvil ([2]); el control de la posición de un manipulador robótico ([3]), entre otros.

La estructura de la ICC utilizada en este trabajo, se muestra en la Fig. 1.

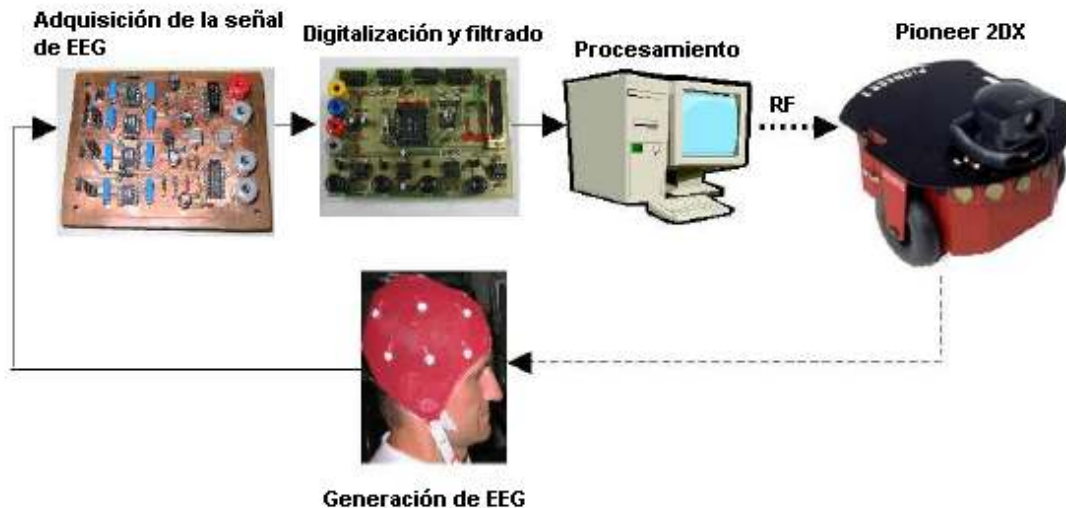


Fig. 1- Esquema general de la interface cerebro-computadora.

La señal de EEG, luego de adquirida y digitalizada, debe ser procesada. De este procesamiento, se extrae la información necesaria para detectar e interpretar el evento generado por el usuario ([4]).

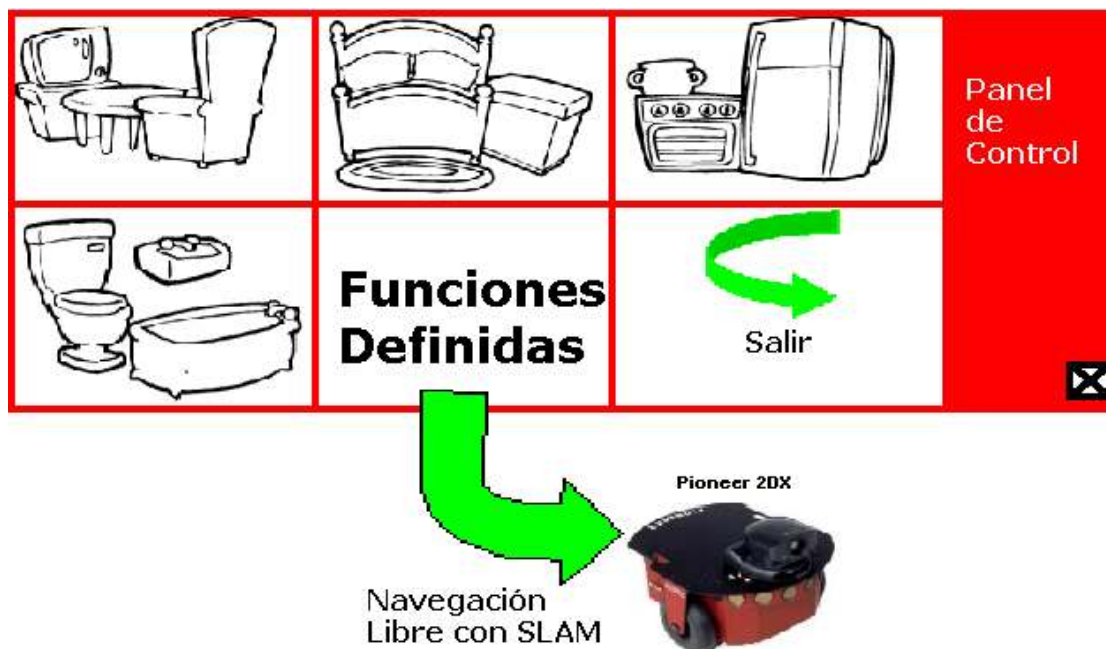


Fig. 2- Panel de control de la ICC. Cada ícono representa un lugar representativo a donde el robot móvil se debe dirigir. El funcionamiento de este panel se puede ver en [5].

El entorno visual de la interface, se compone de un panel de selección, como se ve en la Fig. 2, donde el paciente escoge el lugar a acceder por el dispositivo ejecutor de la ICC, que en este trabajo es un robot móvil tipo Pioneer 2DX, aunque el fin de este proyecto, es la implementación de la ICC en una silla de ruedas motorizada. Los lugares a acceder por el robot móvil, requieren de conocer previamente el mapa del entorno donde se está desplazando.

En este trabajo se presenta la implementación de algoritmos de SLAM (por sus siglas en inglés de Simultaneous Localization and Mapping) basados en el filtro de Kalman en una ICC, como una nueva función dentro del panel de control. Esta función surge de la necesidad de mapear en entornos desconocidos e incorporar dichos mapas al panel original. Con un mapa previo en el panel de control, el usuario puede generar trayectorias de navegación dentro del entorno para, por ejemplo, llegar a un punto determinado dentro del ambiente donde se encuentra.

Este trabajo se organiza como se explica a continuación. En la sección II, se muestra la arquitectura de la función de navegación libre con SLAM que se implementa en el panel de control de la ICC. La sección III explica y referencia cada una de las etapas de la arquitectura mostrada en la sección anterior. En la sección IV se muestran los resultados experimentales. La sección V, son las conclusiones y trabajos futuros.

## II. Arquitectura del sistema

En la Fig. 3 se puede ver la arquitectura del sistema implementado en este trabajo.

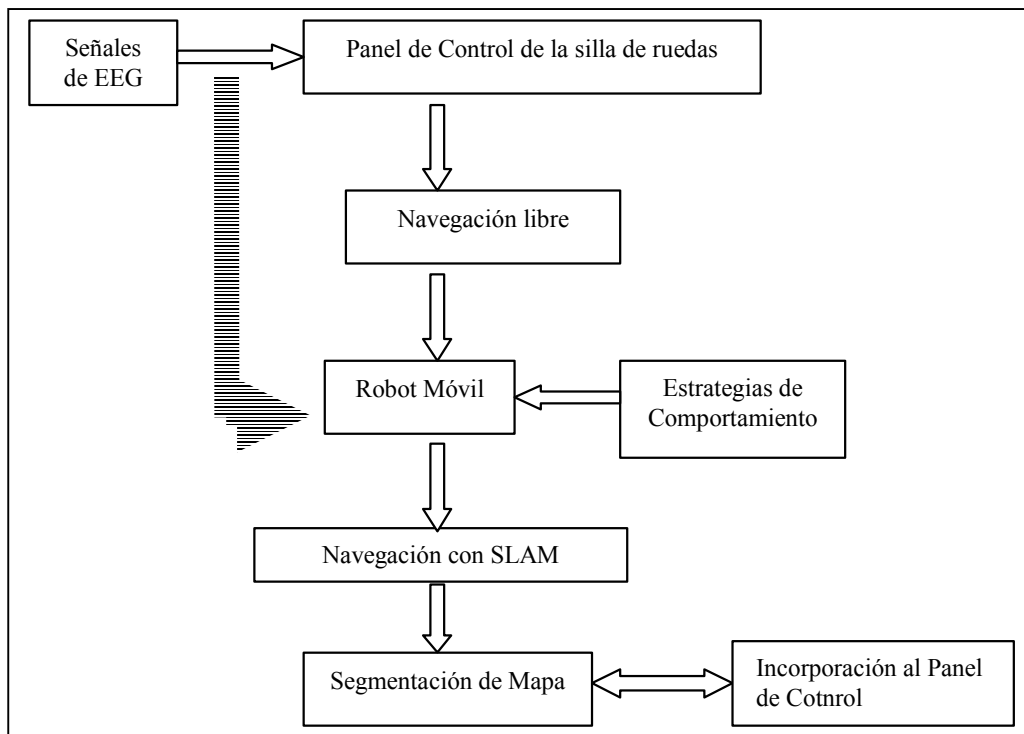


Fig. 3- Arquitectura del sistema propuesto.

Cada etapa del sistema se explica a continuación:

- I. Señales de EEG: se refiere a la adquisición, procesado e interpretación de las señales electroencefalográficas (EEG). Esta etapa es realizada por la ICC.
- II. Panel de control de la ICC: Contiene las funciones predefinidas de navegación del robot móvil como así también los destinos dentro de un mapa conocido.
- III. Navegación libre: es la opción de navegación libre de restricciones del robot móvil.
- IV. Robot Móvil: se implementaron los algoritmos de navegación en un robot móvil (RM) del tipo Pioneer 2DX con 16 sensores de ultrasonido.
- V. Estrategia de Comportamiento: son algoritmos de comportamiento incorporados a la navegación del robot móvil para proteger la integridad del mismo.
- VI. Navegación con SLAM: mientras navega el robot móvil, construye un mapa del entorno y se localiza, de tal manera de disponer de información previa para una navegación posterior.
- VII. Segmentación de mapa: cuando finaliza la navegación libre, el entorno reconstruido es segmentado. Este nuevo mapa es de menor complejidad y menor tamaño. Éste es el mapa que será tenido en cuenta para posteriores trayectorias.

### III. Etapas de la arquitectura del sistema

En esta sección se explicarán con más detalles cada etapa de la arquitectura presentada en la Fig. 3.

#### *Señales de EEG*

La adquisición y procesamiento de las señales de EEG es realizada por la ICC. En este trabajo, se detectaron y procesaron eventos relacionados a la sincronización y desincronización, que tienen lugar en la región occipital del cráneo ([6]). La detección e identificación de estos eventos, son funciones de la ICC. En [1] se puede ver explicado con más detalle éste aspecto.

#### *Panel de control*

El panel de control de la ICC, permite al usuario de la misma, disponer de un conjunto de funciones predefinidas asociadas al movimiento del robot móvil o al entorno donde se encuentra. Entre las opciones más frecuentes dentro del panel, se pueden citar las siguientes: ir hacia un determinado lugar -por ejemplo, un baño- dentro de un mapa específico; disminuir o aumentar la velocidad de desplazamiento y acercarse hasta cierta distancia de un objeto específico. La selección de cada función del panel es realizada mediante el usuario ante la generación de los eventos de sincronización y desincronización mencionados anteriormente. La forma en que se presenta el panel y su funcionamiento puede ser visto en [7].

#### *Navegación libre y estrategia de comportamiento*

Mediante la ICC, el usuario de este sistema, genera los comandos de movimientos necesarios para la navegación libre del robot móvil. La forma en que son generados e identificados estos comandos, puede ser visto en [2]. Los cinco comandos básicos de movimientos son: marcha hacia adelante, marcha hacia atrás, giro a la izquierda, giro a la derecha y parada. Estos comandos se pueden interpretar como el alfabeto de salida de la ICC. Estos cinco comandos, permiten al RM desplazarse dentro de un ambiente no estructurado.

Debido a que la integridad del robot móvil debe ser protegida, se implementaron estrategias de comportamiento dentro del autómata. Estas estrategias tienen como fin evitar colisiones y obstáculos en el desplazamiento del RM. Las estrategias implementadas se pueden ver en [2].

#### *Robot móvil*

Durante la fase de experimentación, se utilizó un robot móvil del tipo Pioneer 2DX con 16 sensores de ultrasonido.

#### *Cinemática del Robot Móvil*

Las ecuaciones cinemáticas que describen el movimiento del RM están dadas por (1).

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \varphi \\ \dot{y} = u \sin \varphi \\ \dot{\phi} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

donde  $u$  es la velocidad lineal,  $\varphi$  es la orientación,  $\omega$  es la velocidad angular del RM,  $\dot{x}$  es la velocidad lineal en la dirección  $x$ ,  $\dot{y}$  es la velocidad lineal en la dirección  $y$ . En la Fig. 6 se muestra el modelo cinemático del RM.

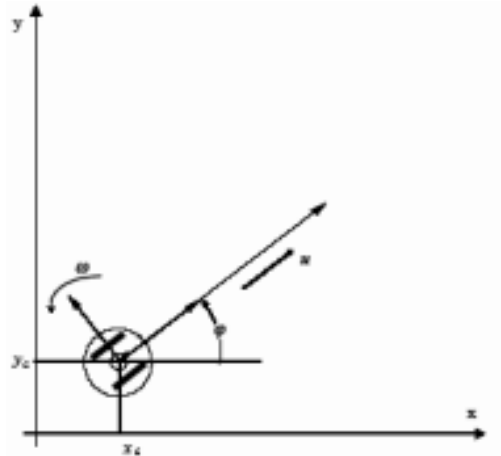


Fig. 4- Modelo cinemático del Robot Móvil.

### *Navegación con SLAM*

Cuando la opción de navegación con SLAM es seleccionada por el usuario dentro del panel de control de la interface, el robot móvil construye un mapa basado en los sensores de ultrasonido que dispone. Simultáneamente al mapeo, se localiza el robot móvil de forma tal de confeccionar un mapa del entorno con el menor error de odometría posible.

Para mapear y localizar simultáneamente, se implementa en el robot móvil un algoritmo de SLAM basado en el filtro de Kalman ([8]) que se presenta a continuación.

### *SLAM basado en el filtro de Kalman*

Los sensores de ultrasonido del robot móvil, aportan la información suficiente para reconstruir el mapa del entorno. Para que esto sea posible, la pose (posición y orientación) del robot debe tener un mínimo de error.

El filtro de Kalman implementado corrige los errores de odometría del robot móvil ([8]).

### *Filtro de Kalman extendido*

En este trabajo se implementó un filtro de Kalman Extendido. Asumiendo que el modelo del sistema está representado por (2),

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) + G(t)w \\ z_k = h(x(t_k), t) + v_k \end{cases} \quad (2)$$

donde  $x$  es el vector de estados del sistema y  $z_k$  es la  $k$ -ésima medición, el objetivo del filtro de Kalman es reconstruir el vector de estados  $x$  para cualquier instante, dada la medición  $z_k$ . Se asume además que, el estado inicial  $x(0)$ , el ruido del proceso  $w$  y el ruido de la medición  $v$  son gaussianos y descorrelacionados entre sí. En (3), se muestra la hipótesis de gaussianidad.

$$\begin{cases} x(0) \sim N(\bar{x}_0, P_0) \\ w(t) \sim N(0, Q) \\ v_k \sim N(0, R) \end{cases} \quad (3)$$

En (6),  $\bar{x}_0$  es la condición del estado inicial. Sean además  $F(x, t)$  y  $H(x, t)$  las matrices jacobianas de  $f$  y  $h$  respectivamente, entonces,

$$F(x, t) = \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$H(x, t) = \frac{\partial h(x, u, t)}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

El EKF propaga la estimación de  $x$ , llamada  $\hat{x}$ , y su covarianza, llamada  $P$ .

### Inicialización

El algoritmo EKF es inicializado mediante:

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = \bar{x}_0 \text{ el estado inicial} \\ P(0) = P_0 \text{ la matriz inicial de covarianza} \end{cases}$$

### Predicción

Las ecuaciones continuas para la etapa de predicción se definen en (6).

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u, t) \quad (6)$$

Luego, mediante la propagación de Euler, la expresión (6) se reescribe como se muestra en (7).

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}^+ + \Delta t * f(\hat{x}_{k-1}^+, u_k) \quad (7)$$

En (7),  $\Delta t$  es el tiempo de muestreo,  $\hat{x}_k^-$  es el k-ésimo estado previo y  $\hat{x}_{k-1}^+$  es el k-ésimo estado posterior. La matriz de covarianza actualizada se muestra en (8).

$$P_k^- = A_k P_{k-1}^+ A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \quad (8)$$

donde,  $P_k^-$  es la matriz de covarianza previa y  $P_k^+$  es la matriz de covarianza posterior.

### Corrección

La corrección es realizada en tres etapas:

1- Se computa la ganancia de Kalman,

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \quad (9)$$

2- Se actualiza la estimación del vector de estados  $x$  mediante el vector de mediciones  $z_k$ :

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-)) \quad (10)$$

3- Actualización de la matriz de covarianza.

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (11)$$

### Aplicación del EKF a robots móviles

Las siguientes expresiones son las ecuaciones del EKF para la implementación en la corrección de odometría de un robot móvil.

$$\begin{cases} f(x, u, t) = \begin{pmatrix} u_{control} \cos(\varphi) \\ u_{control} \sin(\varphi) \\ \omega_{control} \end{pmatrix} \\ G = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ w = \begin{pmatrix} e_{u\_control} \\ e_{\omega\_control} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

En (12),  $u_{control}$  y  $\omega_{control}$  son las velocidades de control lineal y angular respectivamente del autómeta;  $e_{u\_control}$  y  $e_{\omega\_control}$  son los errores de las señales de control. La matriz asociada al vector  $w$  está compuesta por los parámetros de sintonización mostrados en (13).

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

En (13), se assume independiencia estadística entre  $e_{u\_control}$  y  $e_{\omega\_control}$ .

Sea  $A$  el jacobiano de  $f$ , luego,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -u_{control} \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & u_{control} \cos(\varphi) \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

y,

$$h(x, t) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{pmatrix} \quad (15)$$

donde el jacobiano de (15) es,

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

El algoritmo de EKF para la corrección de odometría en robots móviles, se encuentra descrito por las ecuaciones (6) a la (16).

## Segmentación

Una vez que el usuario abandona la opción de *Navegación con SLAM*, el mapa obtenido mediante este algoritmo es sometido a un proceso de segmentación.

El proceso de segmentación, divide el mapa métrico de grillas obtenido en un nuevo mapa compuesto por elementos de la dimensión del robot móvil en el plano de trabajo. Cada elemento tiene asignado un peso. Los pesos son el resultado de la probabilidad de ocupación conjunta de cada celda del mapa. Éste tema se puede ver en detalle en ([7]).

El mapa segmentado, es luego incorporado al panel de control de la interface. Así, el usuario, cuando ingresa a un entorno ya navegado y mapeado, selecciona el mapa correspondiente a dicho entorno. Una vez que dicho mapa fue seleccionado, el mapa segmentado le permite al usuario elegir el lugar de destino y trazar una trayectoria al mismo. Algoritmos de control de trayectorias y evitación de obstáculos, fueron incluidos en la interface. El funcionamiento del mapa segmentado y de los controladores implementados en el robot móvil se pueden ver en [7].

## IV. Resultados experimentales

En la Fig. 5 se puede ver el mapa obtenido por el robot móvil Pioneer 2DX mientras navega por un corredor. El error de odometría no está corregido.

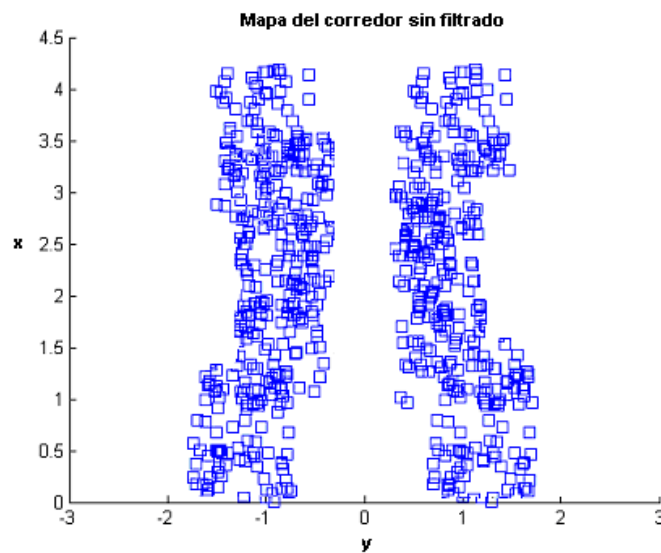


Fig. 5- Mapa del corredor sin filtrado.

En la Fig. 5, el robot móvil se desplaza a lo largo del eje y. En la Fig. 6, se puede ver el mapa que se obtiene cuando se aplican los algoritmos de localización expuestos.



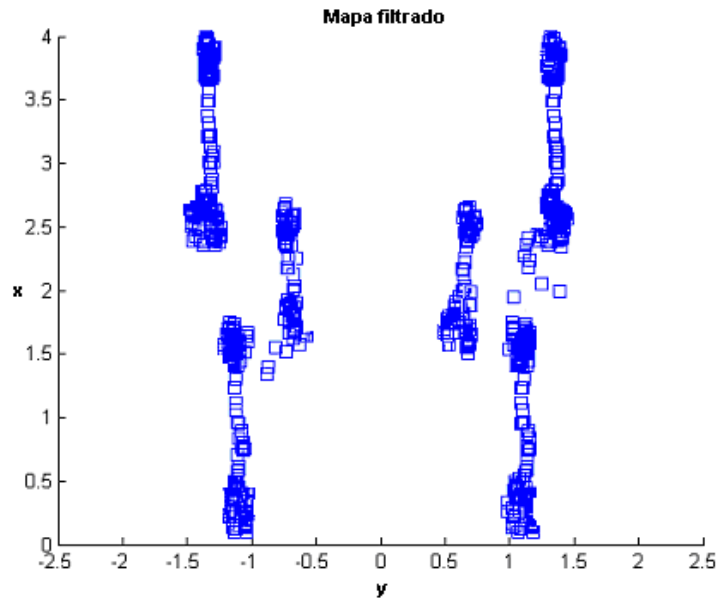


Fig. 6- Mapa del corredor con el algoritmo de SLAM implementado.

Comparando las Figs. 5 con 6, se puede ver como la incertidumbre del mapa disminuye.

En la Fig. 7 se puede observar el modelo final del mapa, luego de haber sido segmentado.

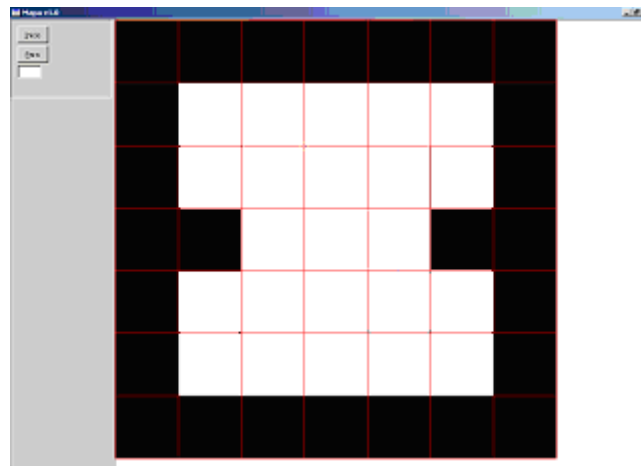


Fig. 7- Representación segmentada del mapa de la Fig. 6.

El mapa segmentado de la Fig. 7, es el que le permitirá luego al usuario, planificar trayectorias de navegación dentro de ese entorno. Esto se puede ver en [9].

## V. Conclusión

La implementación de una función de mapeo y localización simultáneas dentro del panel de control de la interface que gobierna al robot móvil otorga al usuario mayor independencia del medio donde se encuentra. El mapa segmentado que se obtiene luego de finalizar el mapeo, se incorpora al panel de control, permitiendo la generación de trayectorias dentro de dicho entorno. La generación de trayectorias está también gobernada por la ICC implementada.

Los algoritmos de mapeo y localización simultáneas funcionan en línea y no se restringen a los sensores de ultrasonido del robot móvil. El proceso de segmentación es realizado fuera de línea.

Como trabajo futuro se propone el mejoramiento del algoritmo de SLAM para mapas dinámicos y la incorporación de algoritmos de reconocimiento de entornos sin la intervención del usuario. Esta función permitiría el despliegue automático del mapa una vez que el autómatas hubiera reconocido el entorno en que se encuentra.

## Referencias

- [1] Jorge Baztarrica Ochoa, *EEG Brain Classification for Brain Computer Interface Applicatios*, Ecole Polytechnique Federale de Lusanne, 2002.
- [2] Auat Cheeín, F. A. (2005b). Diseño de una Interface Cerebro Computadora para la Navegación de un Robot Móvil. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- [3] A. Ferreira, T. F. Bastos-Filho, M. Sarcinelli-Filho, F. A. Auat Cheeín, J. F. Postigo, R. Carelli. *Teleoperation of an Industrial Mnipulator Through a TCP/IP Channel Using EEG Signals*. En: ISIE2006, Montreal, Canadá, Julio, 2006.
- [4] G. Pfurtscheller and C. Guger, *Brain-Computer Communication-System: EEG-based control of hand orthosis in a tetraplegic patient*, Department of Medical Informatics, Institute of Biomedical Engineering, Universite of Technology Graz, Austria.
- [5] A. F. Neto, W. C. Celeste, V. R. Martins, T. F. Bastos-Filho, M. Sarcinelli-Filho. *Human-Machine Interface Based on Electro-Biological Signals for Mobile Vehicles*. En: ISIE2006, Montreal, Canadá, Julio, 2006.
- [6] M. Teplan, *Fundamentals of EEG Measurement*, Measurement Science Review, Volume 2, Section2, 2002.
- [7] A. F. Neto, F. A. Auat Cheeín, W. C. Celeste, C. C. Toniolo, T. F. Bastos-Filho, R. Carelli. *Navegação de um veículo móvel a rodas em Ambientes Mapeados Utilizando Tabuleiro Eletrônico com Varredura Automática*. IBERDISCAP2006. Espírito Santo, Brasil. 2006.
- [8] P. M. Newman. *On the Structure and Solution of the Simultaneous Localization and Map Building Problem*. Master Thesis. Australian Centre for Field Robotics. The University of Sydney. 1999.
- [9] H. Secchi, R. Carelli, V. Mut. "An Experience on Stable Control of Mobile Robots". Latin American Applied Research, Buenos Aires (Argentina). Vol. 33, No. 4, pp. 379-385. Octubre de 2003.