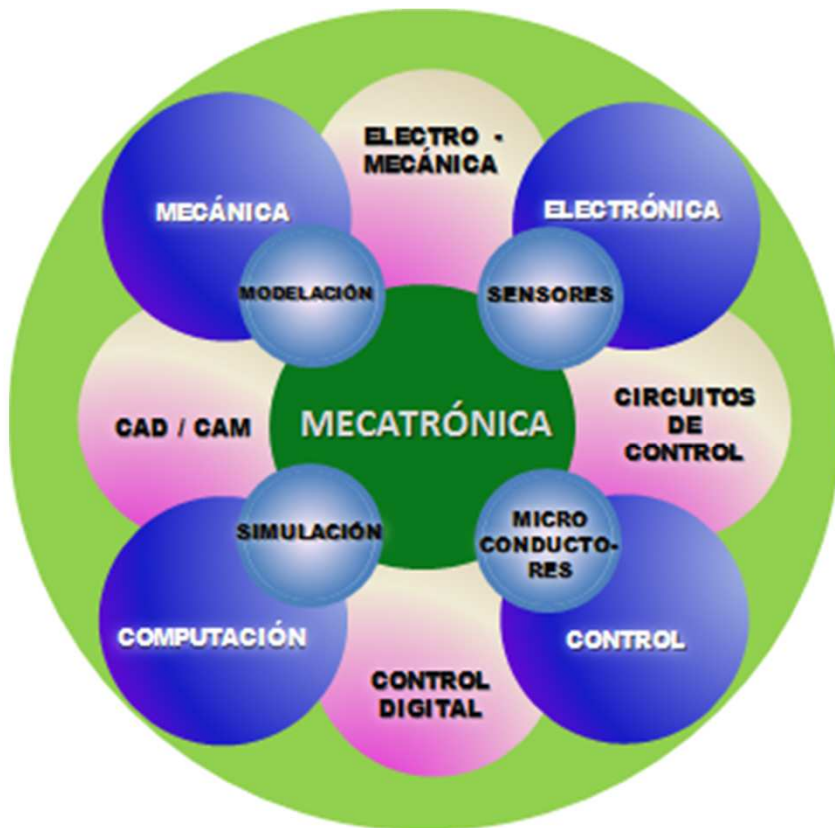


Memorias del VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Meatrónica

José Emilio Vargas Soto



Puerto Vallarta, Jalisco.
Abril 10-12, 2014.

VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Puerto Vallarta, Jalisco.
Abril 10-12, 2014.

José Emilio Vargas Soto
Autor

Grupo LOC
Comité Organizador

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Editor

Impreso y Hecho en México
Primera Edición, 2014
ISBN: 978-607-95347-9-0.

©2014, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la
autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Perspectivas de la Ingeniería Mecatrónica

Vargas-Soto J.E.¹, Aceves-Fernández M.A.¹, Sotomayor-Olmedo A.², Tovar-Arriaga Saúl¹
y Ramírez-Reséndiz J.²

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática¹ - Facultad de Ingeniería².
emilio@mecatronica.net

Resumen

El presente trabajo muestra un panorama general sobre la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica en el mundo. Se describe el origen del concepto mecatrónico, así como diferentes corrientes de pensamiento que muestran las principales Universidades dedicadas a la enseñanza e investigación de tecnologías afines a la mecatrónica.

El artículo describe algunas de las nuevas tendencias que prestigiosas Universidades e Institutos marcan sobre la formación del profesionista mecatrónico, principalmente en Japón, Estados Unidos y Alemania.

Finalmente se muestran las conclusiones de este trabajo de investigación documental y las propuestas que sobre enseñanza de la Mecatrónica consideran los autores a fin de propiciar un acercamiento a la requerimientos que muestra el entorno económico y social del profesionista de la Ingeniería Mecatrónica en México.

Palabras clave: Mecatrónica, servicios, perspectiva.

1. Introducción

La Ingeniería Mecatrónica surge como una propuesta de integración de conocimientos entre la Ingeniería Mecánica y la Ingeniería Electrónica. El concepto apareció en Japón el 12 de julio de 1969 en un reporte técnico realizado por Testuro Mori y Ko Kikuchi en la empresa del sector eléctrico Yaskawa Co. En dicho reporte se muestra la forma en cómo se aplicó la técnica conocida como *Kaizen*, cuyo término está relacionado con acciones de mejora continua. En enero de 1972 la empresa japonesa Yaskawa Co. obtiene el derecho de marca del concepto de Mecatrónica con número de registro 946594 (Japan Trademark Registration). Sin embargo fue hasta principios de los 80s donde el concepto de mecatrónica se empieza hacer popular en forma mundial, retomado por el sector industrial y las universidades [1].

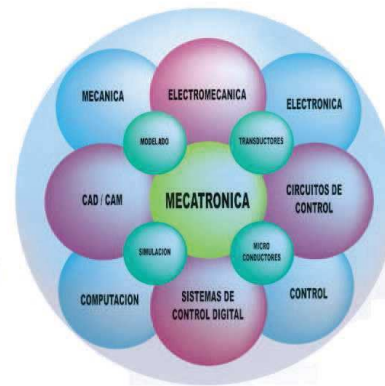


Fig. 1 Concepto de Ingeniería Mecatrónica.

La ingeniería mecatrónica ocupa un papel clave y estratégico en los países desarrollados, prácticamente en la mayoría de sus universidades más importantes se ofrece como carrera profesional, y en algunas universidades y centros de investigación incluso como maestría y doctorado. El mismo caso se observa en países en vías de desarrollo.

Mecatrónica es una disciplina de carácter científico y tecnológico, e integra áreas del conocimiento asociadas a la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica y a los Sistemas Computacionales. Un sistema mecatrónico se refiere a la integración de componentes mecánicos, electrónicos y de programación que incluye principalmente aspectos de control automático, y administración de proyectos para realizar la automatización de productos, procesos o servicios con bajos costos, flexibilidad y características de competitividad.

2. Desarrollo de la Mecatrónica.

2.1 Mecatrónica en Norteamérica.

En los últimos 30 años se ha desarrollado de forma sistemática una educación universitaria hacia las tecnologías afines a la Ingeniería Mecatrónica. No

es de extrañar que el Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE) considerado como la más importante agrupación académica del mundo, se encuentra a cargo de la edición de la revista Transaction on Mechatronics, bajo la supervisión de la prestigiosa Sociedad de Robótica y Automatización (RAS).

Diversas universidades en las ciencias y las tecnologías modernas, como la Universidad de Colorado, Georgia Tech, el MIT, Ohio University, entre otras, realizan importantes programas académicos sobre robótica y mecatrónica, esto como una estrategia para desarrollar mayores conocimientos en tecnología.



Fig. 2 . Proyecto de detección de fisuras en tubería en el MIT.

A manera de ejemplo, la Fig. 2 muestra un robot desarrollado en el MIT con el propósito de detectar fisuras en tubería [2], éste tipo de desarrollo permitirá detectar puntos de fuga del material confinado en las tuberías, evitando así daños y pérdidas económicas.

Por otra parte, existe una relevante interacción entre universidades y empresas privadas, que favorecen de forma significativa el desarrollo de nuevos productos y servicios con componentes tecnológicos de vanguardia. De acuerdo con Reed Business Information, se estima que la industria de controladores, una parte de la tecnología mecatrónica, genere unos 200 billones de dólares anualmente en el mercado mundial, dicha estimación se considera en dos partes: administración de procesos y controladores industriales [3].

2.2 Mecatrónica en Sudamérica.

La enseñanza de la mecatrónica en Sudamérica tiene su origen en los primeros cursos de especialización y diplomados que se realizaron a finales de los 80s en Cd. de México, entre en la UNAM y la empresa alemana FESTO. En 1992 se crea la primera carrera profesional de Ingeniería

Mecatrónica por la Universidad Anáhuac del Sur. En el año 2000 se funda la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., cuyo propósito es difundir y promover la Ingeniería Mecatrónica, logrando con ello impulsar la creación de la Asociación Peruana de Mecatrónica en el 2006 y un años después la Asociación Chilena de Mecatrónica.

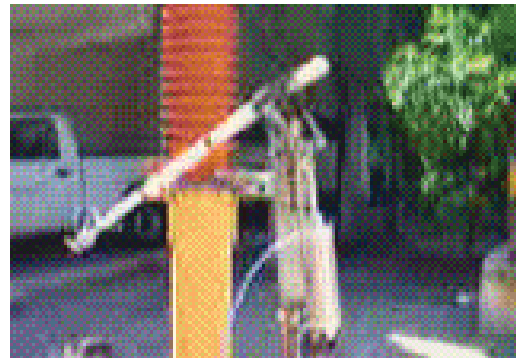


Fig.3 Manipulador flexible de accionamiento neumático para limpieza industrial [4].

Existen diferentes programas académicos a nivel profesional sobre mecatrónica en Perú, Chile, Argentina, Colombia, Costa Rica, Brasil, Ecuador y Cuba, principalmente [5]. Una característica importante por mencionar es la pobre interacción entre los gobiernos y las empresas privadas con las universidades, situación que no ha permitido desarrollos tecnológicos de alto impacto en la sociedad. Sin embargo, algunos gobiernos se encuentran valorando como puede favorecer el desarrollo de programas educativos afines a la mecatrónica para favorecer las condiciones de desarrollo de sus países.

2.2 Mecatrónica en Europa.

Hace unos cuarenta años poco se conocía del concepto de mecatrónica, pero ahora es diferente. Desde que la Ingeniería Mecatrónica fue considerada por las más importantes universidades europeas como una alternativa revolucionaria para desarrollar productos e ideas innovadoras, todo ello bajo un soporte tecnológico, la realidad en europa muestra diversos beneficios en sus sociedades. La Asociación Danesa de Mecatrónica, los grupos de mecatrónica de Finlandia, la Asociación Mecatrónica Húngara, así como diversos institutos de investigación en Italia, Inglaterra, España, Alemania y Suiza realizan una intensa educación sobre áreas del conocimiento afines a la mecatrónica en los 90s. En la actualidad, existe una importante interacción entre las empresas privadas y las universidades y centros de investigación, uno de los más importantes: El Centro Europeo de Mecatrónica, desarrolla proyectos de alto

valor tecnológico con la participación de las más importantes universidades e institutos de Europa.

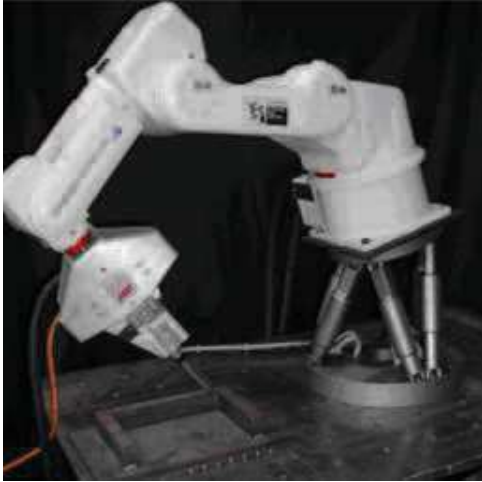


Fig. 4 Robot soldador para ambiente rudo. Centro Europeo de Mecatrónica, Aachen.

Un proyecto educativo de corte internacional denominado: Eumecha-pro, se orienta en obtener el mejor marco educativo que propicie la formación de excelentes ingenieros mecánicos para las industrias de la manufactura. Los requerimientos educativos de la mecatrónica así como sus enfoques serán analizados a fin de obtener una visión europea de la forma en como la educación puede ser mejorada y ser más coherente con las necesidades de toda Europa. La alta tecnificación de los procesos de producción requiere de investigación y desarrollo tecnológico, así como innovación en el concepto de nuevos productos y servicios. Los mercados más importantes están en el oeste de Europa, seguidos del mercado de Norteamérica y Asia.

Actualmente, existen importantes programas educativos sobre Mecatrónica en toda Europa, no solamente a niveles de posgrado o profesional, sino también en niveles de primaria, secundaria y bachillerato.

2.3 Mecatrónica en Asia.

Una referencia obligada sobre la evolución que ha tenido la Mecatrónica en Asia es Japón. En Japón nace el concepto de mecatrónica y es considerado un país líder en esta área de la ingeniería, dado el relevante impacto que ha tenido en el mundo la tecnología japonesa en productos y procesos con modernos procesos de manufactura. Por lo tanto, el

desarrollo de la mecatrónica será esencial lograr una competitividad sostenida en una economía intensa en los procesos de manufactura, como es típico en muchos países de Asia. En Japón, el gobierno tiene una alta influencia para definir las líneas de investigación donde la robótica y la mecatrónica tiene un papel destacado en productos con alto impacto económico y social tales como medicina, comunicación, rescate de personas, e incluso de entretenimiento. El gobierno japonés ha aprobado diversas leyes que favorece y estimula la colaboración entre las Universidades y la industria, así como la creación de nuevos negocios. MITI por ejemplo, a iniciado trabajos orientados a brindar asesoría a pequeñas empresas bajo un programa denominado “Foundation for Venture Business”, programas similares se llevan a cabo en China, Rusia, Taiwan, Korea, Hong Kong, Irán e Israel principalmente.

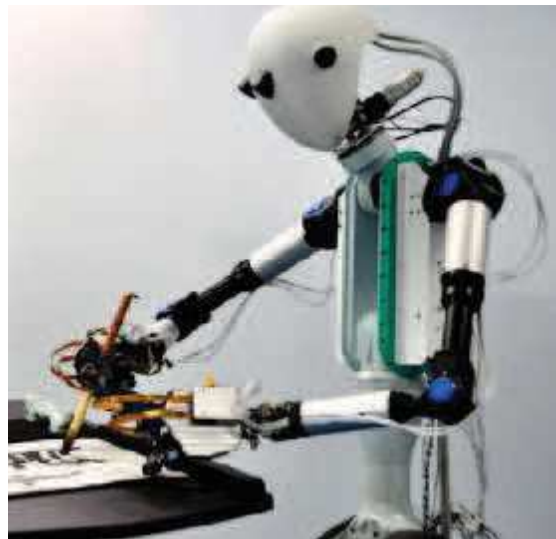


Fig.5 Telesar V, robot japonés capaz de escribir kanjis.

Mecatrónica es ampliamente utilizada en los sistemas robóticos, aeronáutica, y otros sistemas que requieren sistemas mecánicos inteligentes. Por ejemplo, las investigaciones tradicionales rusas que sobre aeronáutica o defensa se han desarrollado en años anteriores, hoy día exploran con la mecatrónica una combinación de aparatos mecánicos, electrónicos y sistemas de control por computadora para mejorar su desempeño y funcionalidad. Existen diversos programas académicos diseñados para desarrollar habilidades de integración tecnológica en profesionistas y jóvenes científicos, a fin de lograr una formación que favorezca el desarrollo de talento con un sentido de desarrollo tecnológico, involucrando a los participantes en proyectos de investigación científica.

2.4 Mecatrónica en África.

En África hay importantes universidades que ofrecen carreras profesionales en ingeniería. La Universidad de Cape Town (UCT) en Sudáfrica define a la mecatrónica como una rama interdisciplinaria de la ingeniería que combina estudios fundamentales de la ingeniería mecánica con elementos de la ingeniería electrónica. Los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica en UCT desarrollan elementos fundamentales sobre el entendimiento de fenómenos físicos y matemáticas avanzadas en ingeniería como elementos que soportan el diseño y control de sistemas mecánicos y electro-mecánicos, tecnología de los micro-controladores y diversos principios considerados básicos sobre la administración de proyectos de ingeniería. Adicionalmente, prácticamente todos los programas de Ingeniería Mecatrónica ofrecen en los últimos años de la carrera cursos opcionales sobre estudios especializados como: ingeniería biomédica, electrónica de potencia y administración de máquinas y procesos industriales. Los sectores industriales en los países africanos requieren profesionistas de la ingeniería mecatrónica con una amplia diversidad de habilidades, tales como instrumentación, automatización, robótica, ingeniería biomédica y sistemas de visión.



Fig.6 Enseñando Sistemas Automáticos neumáticos en la Universidad Tecnológica de Tswane.

Para la Universidad Tecnológica de Tswane en Cape, la Ingeniería Mecatrónica en Sudáfrica se refiere a una integración de ingeniería electrónica, ingeniería eléctrica, tecnología de las computadoras e ingeniería de control con ingeniería mecánica. Estas áreas del conocimiento aportan un gran valor en las tareas relacionadas con el diseño de máquinas, procesos de manufactura y su automatización, mantenimiento y un amplio rango de productos y procesos. Como una consecuencia asociada a las necesidades en Sudáfrica, los ingenieros

mecatrónicos y los tecnólogos han adoptado una formación interdisciplinaria, lo que les permite habilidades y conocimientos en diversos campos de la ingeniería, se pueden desarrollar profesionalmente y comunicarse en un amplio rango de disciplinas. Sin embargo, desde otra perspectiva los programas de ingeniería mecatrónica procedentes de la Universidad Metropolitana Nelson Mandela es relevante que la mecatrónica tenga un papel destacado en el diseño y desarrollo de procesos de manufactura, así como la operación de maquinaria especializada y su mantenimiento- desde el control y manejo de sistemas de video hasta la supervisión de procesos de manufactura altamente automatizados y robotizados. La reconocida Universidad de Johannesbur incluye ingeniería mecatrónica dentro de la oferta de sus carreras profesionales. El departamento de ciencias de ingeniería mecánica está a cargo de la carrera de mecatrónica, y cuenta con una planta docente sumamente dedicada a la enseñanza, muchos de sus profesores cuentan con una amplia trayectoria en investigación aplicada, Cuatro grupos de investigación se encuentran activos, y desarrollan proyectos, artículos científicos, libros, conferencias e importantes contribuciones científicas. El departamento se encuentra ampliamente equipado con modernos laboratorios y equipos especializados, lo que ha favorecido su interacción con diversas industrias de la manufactura y la aeronáutica. Los programas académicos están reconocidos por la Academia de Ingeniería de Sudáfrica. La carrera de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad de Stellenbosch se desarrolla bajo un enfoque de automatización, como la clave para favorecer la productividad en las empresas donde se desarrollarán sus egresados.

2.5 Mecatrónica en Oceanía.

La Escuela de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad of Este de Sidney es considerada la primera escuela en Australia que inicio estudios formales de Ingeniería Mecatrónica, su programa académico fue establecido con el propósito de responder a la expansión industrial que ocurre al Este de la región de Sidney, el cual demanda altas habilidades de recursos humanos. El principal objetivo de la carrera de ingeniería mecánica consiste en educar ingenieros capaces de aplicar exitosamente las tecnologías mecánicas, electrónicas y computacionales como líderes de proyectos que diseñen y construyan máquinas inteligentes.

La Universidad de Monash en Sidney ofrece la carrera de Ingeniería mecatrónica desde el 2008. Los ingenieros mecatrónicos son altamente demandados

en la industria, por su destreza en el diseño e innovación de nuevos productos con valor tecnológico en grupos multidisciplinarios, así como su habilidad de tecnificar y modernizar procesos existentes para mejorar su desempeño. Por su parte, la Universidad de Canterbury en Nueva Zelanda desarrolla un programa profesional de ingeniería mecatrónica, el cual busca desarrollar el talento humano a fin de contar con un ingeniero con habilidades para diseñar y desarrollar productos con una alta integración de tecnologías mecánicas, electrónicas y de los sistemas computacionales. Sus egresados son altamente solicitados por países del sur y del este de Asia, en sectores de la nanotecnología, robótica, bioingeniería, entre otros.



Fig.7 Sistemas autónomos de vigilancia forestal.

3. Nuevas tendencias en la enseñanza de la mecatrónica.

Las modernas tendencias que presenta la educación del ingeniero mecatrónico no solo está orientada a la formación de personas con excelentes habilidades para resolver problemas de ingeniería bajo un trabajo en un equipo multicultural, o habilidades para formar líderes de proyectos con una alta integración tecnológica [6]. La tendencia muestra una educación para desarrollar un nuevo punto de vista enfocado en la creación de nuevos negocios derivados de los productos obtenidos de las investigaciones aplicadas. Se requieren nuevos ingenieros con una visión integral que responda a los cambios tecnológicos y a las necesidades sociales de nuestros tiempos. Existen pocas universidades en el mundo que definen el liderazgo o las nuevas tendencias de sus programas educativos. Al igual que las empresas más exitosas y competitivas, las universidades líderes en alguna área del conocimiento desarrollan ejercicios serios de prospectiva tecnológica para adelantarse a las necesidades que tendrán sus programas educativos en los siguientes años, y así generar sus líneas de trabajo que les

mantendrá a la vanguardia en el mercado educativo. Existen diversos casos que hacen patente esta nueva forma de educar a profesionistas de la ingeniería mecatrónica en diversas partes del mundo. Destacan entre ellos la Universidad de Tokyo, en Japón, el Instituto Tecnológico de Massachusetts en Estados Unidos de América, y la Universidad de Esslingen en Alemania, entre otras.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una breve reseña sobre la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica en el mundo, así como algunos enfoques que tienen diversas Universidades sobre la formación del profesionista en ésta área del conocimiento. No es fácil englobar todas las visiones. Sin embargo, es importante remarcar que tanto en los países desarrollados, como en aquellos en vías de serlo, se considera que los programas académicos con alto contenido tecnológico es la clave para mejorar la eficiencia y productividad en sus empresas, y con ello propiciando una mejor economía.

Aún cuando se distinguen enfoques diferentes sobre la enseñanza de esta disciplina, en todos los casos se hace mención que esta profesión es ampliamente demandada, por lo que a diferencia de hace algunos años, hoy en día la ingeniería mecatrónica es reconocida por muchas empresas, sobre todo aquellas que están cercanas al uso de nuevas tecnologías. No obstante, es indispensable continuar difundiendo las habilidades del profesionista y el valor agregado que brinda a las empresas.

Finalmente las tendencias analizadas muestran una clara intención de las Universidades en dotar al ingeniero mecatrónico de elementos que le lleven a crear e innovar productos, procesos y servicios bajo una clara intención de formar personas emprendedoras.

Referencias

- [1] Fernando Reyes, Jaime Cid y Emilio Vargas, "*Mecatrónica: Control y Automatización*", Editorial: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 1° edición, México, ISBN: 9786077075486, 2013.
- [2] Choi, C., *Robot design for leak detection in water-pipe systems*, (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). 2013.

- [3] Reed Business Information, <http://controleng.com>, consulta realizada: 12/01/2014.
- [4] J.M. Ramos, E. Gorrostieta, E. Vargas, J.C. Pedraza, R.J. Romero y B. Ramírez, "Pneumatic Fuzzy Controller for a Flexible Arm", 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR2007, ISBN 978-83-751803-2-9, Szczecin, Poland. 27-30 August, 2007.
- [5] Noticias RIBAMEC, No. 1-10/2000, Laboratorio de Mecatrónica, Dr. Roberto Frias, Universidad de Porto, CITED.
- [6] Allen, R. G., Mechatronics Engineering: A critical need for this interdisciplinary approach to engineering education. In Proceedings of the 2006 IJME—INTERTECH conference on synergistic integration of mechanical engineering with electronics, 2006

Diseño de un Robot Móvil

Gorrostieta-Hurtado Efrén¹, García-Sillas Daniel¹ y Zúñiga-Aviles Luis A.².

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática¹

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial².

efrengorrostieta@gmail.com

Resumen

El desarrollo y diseño de un robot es una mezcla de varias disciplinas que se integran para conformar un sistema, una de la óptica es ver el desarrollo de su diseño como una máquina mecatrónica. En el presente trabajo se abordan los diferentes elementos que se utilizan para el diseño de un robot móvil en las cuales se introducirá las características de los motores con el propósito de tener un modelo más completo del comportamiento del robot, con el propósito de integrar diseño mecánico, control, y sistemas eléctricos. Esta integración permite predecir el comportamiento físico del robot y facilitar la implementación de los sistemas mecánicos, de control y eléctricos.

Palabras clave: Robot móvil, diseño, mecatrónica.

1. Introducción

La El diseño y construcción de un robot siempre representan reto intelectual como técnico, tal vez muy dentro de cada uno de nosotros conservamos el sueño y el espíritu de realizar un pequeño robo a miniatura como una réplica y semejanza propia[1,2]. Hay mucho el efecto de la primera vez que apareció la palabra relacionada con robótica en aquella novela del autor checo. Hoy en día tenemos una gran diversidad de robots dependiendo de sus aplicaciones, los mas conocidos son los robots manipuladores, uno de los primeros desarrollos de este tipo de robo fue un brazo artificial multiarticulado, o manipulador. Desarrollado en 1954 por George Devol, en este diseño de brazo se podía programar para realizar tareas específicas. En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Víctor Scheinman, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (PUMA, siglas en inglés). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico multiarticulado del PUMA es la base de la

mayoría de los robots actuales. En la Actualidad tenemos un gran número de robots articulados de aplicaciones industriales.

Otro de los tipos de robot también muy utilizados y muy difundidos son los robot con ruedas mejor conocidos como robot móviles, los cuales también cuentan con un gran número de aplicaciones diseño y morfologías triciclo clásico, omnidireccionales, robots con orugas, tracciones diferencial combinaciones entre otras.

Las aplicaciones de robot móviles van desde robot para entretenimiento carritos móviles con distintos desempeños, robots exploradores como por ejemplo el realizado para las pirámides, robots que transportan material peligroso en una áreas específica de algún proceso. Una de las soluciones de robótica que permite el diseño de los distintos robots móviles es una estructura modular adecuada y bien adaptado a condiciones locales de las aplicaciones así como las zonas peligrosas donde se pueda mejorar en gran medida la seguridad del personal, así como la eficiencia en el trabajo, la productividad y flexibilidad.

En este sentido, los sistemas móviles equipados con manipuladores para detección y localización de minas terrestres antipersonal son considera de la mayor importancia para localización de la mina autónoma o semi-autónoma en una forma competente, fiable, segura y eficaz.

Sin importar el tipo de robot, es importante el desarrollo de la parte formal del robot la cual corresponde al modelado cinemático, el modelado dinámico, el desarrollo del control que implica el diseño y escritura de software [3,4,5]. Esto motiva la investigación y desarrollo, dando como resultado un considerable número de documentos sobre el tema

2. Robot Móvil

El modelo del robot que se pretende desarrollar está basado en una plataforma móvil omnidireccional con ruedas[5]. El cuerpo del robot se describe como triangular y en cada uno de sus vértices está articulado, en cada articulación se encuentra un brazo o pata que a su vez en el extremo opuesta tiene una eje en donde está la rueda.

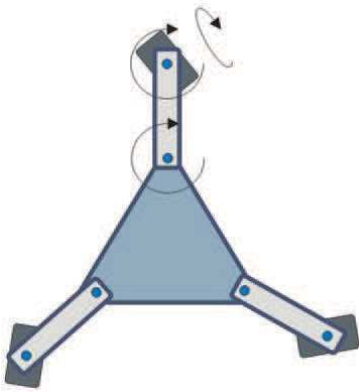


Figura 1. Estructura del robot triangular.

Dentro de los requerimientos del robot se establece que este debe ser autónomo completamente, debe tener nueve grados de libertad, tres por cada pata consistiendo en la articulación que se encuentra ligada al cuerpo siguiendo por el eje que permite girar la rueda y finalmente la tracción de la rueda para su desplazamiento.

Todos los movimientos del robot deben ser bidireccionales, es decir, que se debe permitir el giro de las ruedas hacia adelante y hacia atrás de forma independiente, las patas deben poder girar en ambos sentidos también.

En cuanto a las dimensiones, estas no están especificadas debido a que solo se quiere obtener un modelo para simulación de los movimientos y no para la construcción física, aunque para la construcción del modelo en la computadora se tomen algunas dimensiones probables para el modelo físico.

Modelo cinemático del robot.

Para realizar el análisis del modelo cinemático del robot omnidireccional, es necesario comenzar describiendo los grados de libertad de los cuales está provisto. Como mencionamos anteriormente, el robot

cuenta con un juego de tres extremidades, todas ellas unidas al cuerpo triangular y que a su vez cuentan con tres grados de libertad cada una, para dar un total de nueve.

Cada una de las articulaciones, son bidireccionales y el robot debe ser capaz de trasladarse girando las ruedas en un sentido o en otro. En la Figura 2, puede observar la estructura cinemática genérica del robot, puede apreciarse los diferentes grados de libertad del robot, además del sistema de elementos que determinan la dirección.

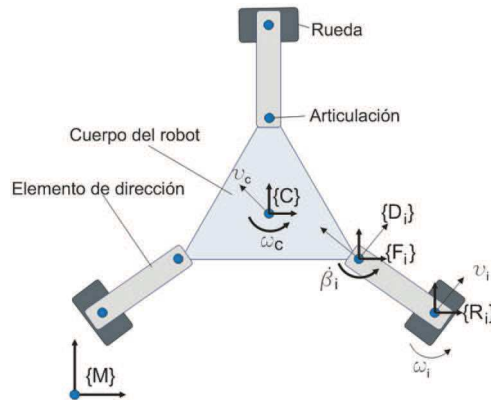


Figura 2. Esquema de la estructura cinemática genérica.

Este desarrollo está basado en el trabajo, en donde se desarrolla un modelo cinemático como el que se busca. En la Figura 2 se ilustran los elementos de dirección o extremidades que se encuentran fijadas a las ruedas y a su vez unidas al cuerpo del robot mediante una articulación. Para poder obtener las posiciones y orientaciones de los componentes, se debe asociar un sistema de coordenadas solidario a cada uno, tal y como se describe abajo:

$\{C\}$: Asociado al cuerpo del robot y es el punto guía del vehículo, su posición cartesiana es x_c , y_c y su orientación θ_c con respecto a un sistema global de trabajo $\{M\}$ corresponden a la del robot.

$\{F_i\}$: Es el sistema fijado en el punto de anclaje de la articulación de la extremidad i -ésima. El ángulo α_i representa la orientación relativa de este sistema con respecto al sistema $\{C\}$, y su vector de posición es A_i .

$\{D_i\}$: Referente al elemento de dirección de la rueda i -ésima. El ángulo de dirección entre el sistema actual y el anterior, es β_i . El vector de

posición resulta nulo ya que $\{F_i\}$ y $\{D_i\}$ son coincidentes.

$\{R_i\}$: Sistema ubicado en el punto de contacto de la rueda i -ésima con el suelo, tal como aparece en la Figura 2. El ángulo de dirección, y el vector de posición entre el sistema actual y el anterior son respectivamente γ_i y δ_i .

La velocidad lineal del robot, entonces estará dada por la ecuación 1:

$$v_c = R(\theta_i) \cdot v_i + \omega_i \cdot p_i + \dot{\beta}_i \cdot \lambda_i \quad (1)$$

Donde $R()$ representa una matriz de rotación en el plano, p_i y θ_i se definen como el vector de posición y la orientación del sistema $\{R_i\}$ visto desde $\{C\}$, tal y como se indica a continuación:

$$p_i = \lambda_i + R(\alpha_i + \beta_i) \delta_i \quad (2)$$

$$\theta_i = \alpha_i + \beta_i + \gamma_i \quad (3)$$

En cuanto a la velocidad angular del robot, sólo se toman en cuenta las velocidades homónimas de la articulación y de la rueda:

$$\omega_i = \dot{\beta}_i - \omega_i \quad (4)$$

Las ecuaciones 2,3 y 4 se organizan en forma de matriz jacobiana, tal y como se indica a continuación:

$$\begin{pmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ \omega_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_i & -s_i & p_{iy} & -\lambda_{iy} \\ s_i & c_i & -p_{ix} & \lambda_{ix} \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ \omega_i \\ \beta_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$V_c = \hat{J}_i \cdot \hat{q}_i$$

Donde v_{cx} y v_{cy} son las componentes de v_c , p_{ix} y p_{iy} las de p_i , λ_{ix} y λ_{iy} las de λ_i , y por último v_{ix} y v_{iy} las de v_i . Además, c_i y s_i , respectivamente, al coseno y al seno del ángulo θ_i .

La velocidad lineal de la rueda se obtiene a partir del giro de la misma a partir de la acción de un motor. En el caso de una rueda convencional, de tracción y no direccional, con un radio r_i y una velocidad de giro ω_{ix} , se define la matriz de

conversión de la actuación W_i de la siguiente manera:

$$\dot{\hat{q}}_i = W_i \cdot \hat{q}_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -r_i & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

De acuerdo a la ecuación 3.6, esta permite introducir la actuación ω_{ix} y anular la acción de dirección debida a $\dot{\beta}_i$. En el supuesto de que la rueda sea direccional, se empleará la matriz W_i , presentada en la siguiente ecuación:

$$\dot{\hat{q}}_i = W_i \cdot \hat{q}_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -r_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_i \\ \dot{\beta}_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

Considerando n ruedas en el robot, a partir de la ecuación 5, se plantea un sistema de ecuaciones sobre determinado, donde el vector de velocidades V_c tiene que satisfacer simultáneamente las siguientes restricciones:

En la Figura 3 se presenta como uno de los resultados del simulador y el entorno gráfico diseñado para realizar algunas pruebas y locomoción del robot [6,7].



Figura 3 Simulación del Robot en un entorno definido.

3. Robot Móvil y Manipulador

Una de las aplicaciones prácticas de los robots móviles se encuentra cuando agregamos también un manipulador lo que permite una versatilidad en muchas tareas, una de las aplicaciones es como se mencionó con anterioridad es para desactivar explosivos o el manejo de material peligroso por ejemplo desechos radioactivos. En la figura 4 se presenta el diseño de un robot con un manipulador.

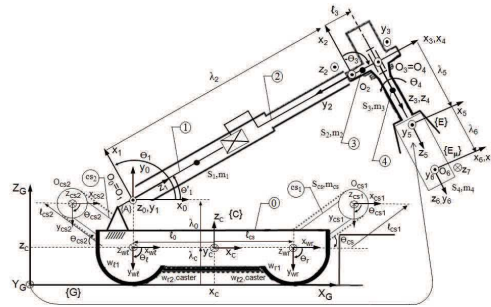


Figura 4 Robot móvil con manipulador.

Una de las partes que debemos de tener especial atención es el desarrollo de los modelos matemáticos como se vio en la sección anterior principalmente los modelos cinemáticos que nos ayudaran a la construcción de trayectorias y orientaciones de la articulación o de robot en general. el otro modelo que se realizara es el dinámico es el que se utilizara para el desarrollo de los sistemas de control para asegurar el buen funcionamiento de control cinemático.

Para el robot móvil con el manipulador las ecuaciones de movimiento de Lagrange se obtienen con la suma de las energías cinética y potencial [8].

Se sabe que la formulación de movimiento de Lagrange sólo se refiere a los sistemas conservadores. Un modelo en el que se consideró que estos efectos de la fricción sería::



$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + F_v \dot{q} = \tau \quad (8)$$

Donde :

$M(q)$ N x N Matriz de Inercia

$V(q, \dot{q})$ N x 1 Matriz de Coriolis

$F_v(q)$ Matriz de fricción

τ Torques

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ E & F & G & H \\ I & J & K & L \\ M & N & O & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q \\ R \\ S \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \\ N \\ O \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta los cofactores nulos y otras características propias del sistema se pueda finalmente se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F & G & H \\ 0 & J & K & L \\ 0 & N & O & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q \\ R \\ S \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \\ N \\ O \\ P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

To obtain the direct dynamic model, is used the inverse dynamic, and applying Cramer's rule:

$$\tau_1 = A\ddot{\theta}_1 + J + v_1\dot{\theta}_1 \quad (11)$$

$$\tau_2 = E\ddot{\theta}_2 + F\dot{\theta}_2 + K + N + v_2\dot{\theta}_2 \quad (12)$$

$$\tau_2 = H\ddot{\theta}_2 + I\dot{\theta}_2 + P + O + v_2\dot{\theta}_2 \quad (13)$$

$$T = \tau_1 - J - v_1\dot{\theta}_1 \quad (28)$$

$$Q = \tau_2 - K - N - v_2\dot{\theta}_2 \quad (14)$$

$$S = \tau_2 - P - O - v_2\dot{\theta}_2 \quad (15)$$

$$T = AX \quad (16)$$

$$Q = EY + FZ \quad (17)$$

$$S = HY + IZ \quad (18)$$

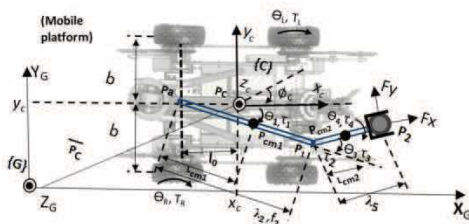
Los valores resultantes para los ángulos de presentan en las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{T}{A} \quad (19)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{IE-FH} [\tau_2 - K - N - v_2\dot{\theta}_2] - \frac{F}{IE-FH} [\tau_2 - P - O - v_2\dot{\theta}_2] \quad (20)$$

$$\ddot{\theta}_4 = \frac{E[\tau_2 - P - O - v_2\dot{\theta}_2]}{IE-FH} - \frac{H[\tau_2 - K - N - v_2\dot{\theta}_2]}{IE-FH} \quad (21)$$

De esta forma llegamos a las ecuaciones representan del robot articulado el cual se aplica al manipulador. En la Figura 5 se presenta la parte móvil del robot.



El diseño es una plataforma que cuenta con dos ruedas motrices y dos ruedas de apoyo pasivo, el primero son conducidos de forma independiente por los motores de corriente continua. Centro instantáneo de rotación (ICR) es un punto de cruce de todos los ejes de las ruedas [8], con la movilidad de grado 2.

$$q = (x_c, y_c, \varphi_c, \theta_r, \theta_l) \quad (22)$$

Para orientar el robot en el espacio es necesario definir el vector q con las variables de orientación (x_c, y_c, φ_c) , las cuales nos ayudan describir la orientación de la plataforma tomando como referencia su centro de gravedad. Por otro lado debemos considerar que el robot móvil es un sistema que cuenta con restricciones no holonomicas representadas en las ecuaciones 23,24 y 25:

$$\dot{y}_c \cos \varphi_c - \dot{x}_c \sin \varphi_c - d\dot{\phi}_c = 0 \quad (23)$$

$$\dot{x}_c \cos \varphi_c + \dot{y}_c \sin \varphi_c + b\dot{\phi}_c = r\dot{\theta}_r \quad (24)$$

$$\dot{x}_c \cos \varphi_c + \dot{y}_c \sin \varphi_c - b\dot{\phi}_c = r\dot{\theta}_l \quad (25)$$

La ecuación 26 representa la ecuación general del robot móvil.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = E(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (26)$$

Donde:

$M(q)$ N x N Matriz de inercias

$V(q, \dot{q})$ N x 1 Coriolis

$E(q)$ N x r input transformation matrix

τ Torque de los motores

$A(q)$ Matriz de condiciones y restricciones

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_c d \sin \varphi_c & 0 & 0 \\ 0 & m & m_c d \cos \varphi_c & 0 & 0 \\ -m_c d \sin \varphi_c & m_c d \cos \varphi_c & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$m = m_c + 2m_w,$$

$$I = I_c + 2m_w(d^2 + b^2) + 2I_m,$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} -m_c d \dot{\phi}_c^2 \cos \phi_c \\ -m_c d \dot{\phi}_c^2 \sin \phi_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad E(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Una vez construidos los modelos es posible establecer el sistema de control a utilizar la generación de trayectorias.

4. Conclusiones

En el diseño de los robots el desarrollo de los modelos matemáticos correspondiente a la cinemática y dinámica del sistema juega un papel muy importante ya que son los que no van a permitir el buen desempeño primero de los sistemas de control los cuales se reflejarán en un buen seguimiento de trayectorias del robot correspondiente al control cinemático. Por otro lado el primer contacto con los robots móviles se presenta de una manera no tan complicada cuando realizamos algún robot seguidor de línea, en estas aplicaciones a veces utilizamos el desarrollo de modelos y eso por un lado no nos permite darnos cuenta de la importancia que tiene el desarrollo formal en el diseño y construcción de los robots móviles, estas dificultades se presentan cuando se quiere realizar una tarea un poco más elaborada.

Referencias

- [1] Fish, S., 2004, "UGV's in Future Combat Systems," *Proceedings of the SPIE – The International Society for Optical Engineering, Unmanned Ground Vehicle Technology VI, Vol. 5422*, pp. 288–291.
- [2] Blüch, J., 1996, "Artificial Intelligence Technologies for Robot Assisted Urban Search and Rescue," *Expert Systems with Applications*, 11 (2), pp. 109–124.
- [3] Erickson, J., 2006, "Living the Dream: An Overview of the Mars Exploration Project," *IEEE Trans. Rob. Autom.*, 13 (2), pp. 12–18.
- [4] Cheng, J., Gao, L., and Wang, H., 2006, "Steering Analysis of Tracked Vehicles Based

on Skid Condition," *Chin. J. Mech. Eng.*, 42, pp. 192–195.

- [5] Park, T., Lee, J., Yi, B., Kim, W., and You, B., Oh, S., 2002, "Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-Directional Mobile Robots," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 732–737.
- [6] OpenGL, *OpenGL API Documentation* <http://www.opengl.org/documentation/>, 2010.
- [7] Whitrow, R., 2008, "OpenGL Graphics Through Applications," *Springer-Verlag London Limited*, pp. 145–153.
- [8] Luis Adrian Zuñiga Aviles, Jesus Carlos Pedraza Ortega, Efrén Gorrostieta Hurtado (2012). *Experimental Study of the Methodology for the Modelling and Simulation of Mobile Manipulators*. *Int J Adv Robot Syst*, 2012, 9:192. doi: 10.5772/51867

Autómatas Celulares y su Aplicación en Computación

Fernández Fraga Santiago Miguel, Rangel Mondragón Jaime
Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

Los autómatas celulares son herramientas computacionales que nos permiten análisis sistemas dinámicos a través del tiempo. Por lo cual son ideales como herramientas de simulación. El presente documento presente presentar una introducción a las características de ésta herramienta, sus principales componentes y de forma general su funcionamiento, así mismo mostrar de forma general sus principales aplicaciones.

Palabras Clave: autómatas celulares, sistemas dinámicos

1. Introducción

El desarrollo de modelos para sistemas físicos, eléctricos y mecánicos, está basado en métodos y expresiones matemáticas, las cuales representan teóricamente el comportamiento de dichos sistemas a través del tiempo. A este tipo de sistemas se les conoce como *sistemas dinámicos*. Los *sistemas dinámicos* son susceptibles a encontrarse en algún estado determinado en el tiempo, y de alterarse en un instante de tiempo posterior. Generalmente para modelar dichos sistemas, los cuales son de naturaleza continua, se utilizan herramientas matemáticas como las ecuaciones diferenciales, las integrales funcionales, variables de estado, elementos finitos, entre otras. La simulación computacional por medio de estas herramientas nos lleva a transformar variables continuas en variables discretas, obteniendo de esta manera análisis numéricos sobre modelos aproximados.

Los *autómatas celulares* son estructuras ideales para construir modelos computacionales de sistemas dinámicos o complejos de una manera discreta; es posible, por ejemplo, lograr modelos que representen con suma fidelidad algunas leyes de la Física. El aspecto que más caracteriza a los autómatas celulares es su capacidad para dotar al conjunto de elementos del sistema, visto como un todo, con una

serie de propiedades emergentes inducidas por su propia dinámica.

2. Antecedentes

La teoría de Autómatas Celulares está desarrollada con base en la teoría de autómatas definida por John Von Neumann en su trabajo “*The General and Logical Theory of Automata*”.

Von Neumann con frecuencia habló de una “Teoría Lógica de Autómatas” en lugar de simplemente de “Teoría de Autómatas”, sin embargo, él sentía que las matemáticas de la teoría de autómatas también deberían tener características formales muy diferentes de las de la lógica matemática. Mientras Von Neumann trabajaba en su teoría de autómatas, Kurt Gödel (1906-1978) redujo la lógica matemática a una teoría de cómputo, al mostrar que las nociones fundamentales de lógica (una fórmula bien definida, un axioma, la regla de la inferencia, las pruebas, etc...) son esencialmente recursivas. Las funciones recursivas son aquellas que pueden ser computadas en máquinas de Turing, y por lo tanto la lógica matemática puede ser tratada desde el punto de vista de los autómatas [6].

En la época de los 50’s, Von Neumann (1903-1957) trató de desarrollar una máquina capaz de idear instrucciones que la modificaran a sí misma, un “autómata auto-replicable” (selfreplicating automaton) [5]. Posteriormente se interesó en generar reglas para las cuales la computadora pudiera programarse y generar una réplica de sí misma. Stanislaw Ulam (1909-1984) consideró un arreglo rectangular de celdas, como un tablero de ajedrez, en el cual cada celda podía estar en uno de un número finito de estados, y el tiempo se desarrollaba a saltos (forma discreta). Durante cada “salto” del tiempo, las celdas tenían la oportunidad de cambiar de estado. La regla que determina el cambio de estado de una celda

dependía únicamente de la celda misma y del estado de sus celdas vecinas. La cuadrícula de Ulam fue un ejemplo de lo que después se llamaría un autómata celular (AC) [3],[4]. Von Neumann comprendió que éste sistema podría servir a sus propósitos para resolver su problema de auto-reproducción. La cuadrícula de celdas podría ser una computadora. "Theory of Self-Reproducing Automata" fue el resultado de sus observaciones, publicadas posteriormente por su estudiante de doctorado W. Burks en 1966 [5].

En los años 60 John Holland comenzó a aplicar los AC en problemas de optimización y adaptación [3],[4]. A su vez, un gran número de matemáticos dirigían su atención hacia las transformaciones iterativas que actúan sobre estructuras espacialmente extendidas y con un conjunto discreto de estados, es decir autómatas celulares (cuestiones importantes sobre complejidad de ejecución y reversibilidad se han estudiado por Alvy Smith, Serafino Amoroso y Victor Aladyev) [4]. El juego de la vida de John Conway que alcanzó popularidad gracias a Martin Gardner se convirtió en uno de los principales AC más estudiados en los años 70's.

Los AC pueden servir para modelar las propias leyes físicas en lugar de sólo sistemas complejos, esto fue estudiado por Edward Fredkin y Tommaso Toffoli en los años 80's [7]. El tema principal de su investigación fue la formulación de que los modelos computacionales de problemas físicos conservan información, y de esta forma conservan uno de los elementos principales de la física microscópica, su carácter reversible. Desde el punto de vista de la Física y la Química el estudio de modelos que reducen fenómenos macroscópicos a procesos microscópicos perfectamente definidos son de un interés metodológico fundamental.

Los simuladores de AC son capaces de actualizar millones de celdas en un tiempo extremadamente corto y son una herramienta ideal en la construcción de modelos simples de ecuaciones diferenciales como las ecuaciones del calor de propagación de ondas o de Navier-Stoke. En particular los modelos de AC se utilizan de forma regular en dinámica de fluidos. Finalmente para una de las ramas de la Física que más se está desarrollando ésta teoría es la de los sistemas

dinámicos, la aparición de fenómenos colectivos, la turbulencia, el caos, los fractales, entre otros. Los AC dan una rica y creciente colección de modelos representativos de estos fenómenos, que pueden ser aislados y estudiados de forma sencilla. El uso de los autómatas celulares en este campo fue iniciado por Stephen Wolfram a mediados de los años 80's [3].

3. Elementos que forman a los autómatas celulares

Definimos formalmente a un Autómata Celular como una función $AC(L, S, N, f)$ donde:

- L región regular de dimensión d , donde los elementos de L se llaman *celdas*
- S conjunto finito de estados
- N conjunto finito de vecindades
- f función de transición $f : S^N \rightarrow S$

3.1 Región y Dimensión

Región.- Espacio físico donde evoluciona el autómata.

Dimensión.- Enfatiza principalmente al espacio sobre el cual evoluciona a través del tiempo dentro de un espacio restringido. Los autómatas celulares con $d = 1$ (ACD1), o *autómatas lineales*, es un arreglo de celdas de la forma:

$$C^{(t)} = \dots C_{-2}^{(t)} C_{-1}^{(t)} C_0^{(t)} C_1^{(t)} C_2^{(t)} \dots \quad (1)$$

$$C^{(t)} = C_0^{(t)} C_1^{(t)} C_2^{(t)} \dots C_{n-2}^{(t)} C_{n-1}^{(t)} C_n^{(t)} \quad (2)$$

donde n representa el total de celdas.

Los autómatas celulares con $d = 2$ (ACD2), representan una superficie plana formada por un número finito de celdas con base a las siguientes configuraciones

$$C^{(t)} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \dots & C_{-1,-1}^{(t)} & C_{-1,0}^{(t)} & C_{-1,1}^{(t)} & \dots \\ \dots & C_{0,-1}^{(t)} & C_{0,0}^{(t)} & C_{0,1}^{(t)} & \dots \\ \dots & C_{1,-1}^{(t)} & C_{1,0}^{(t)} & C_{1,1}^{(t)} & \dots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$C^{(t)} = \begin{bmatrix} C_{0,0}^{(t)} & C_{0,1}^{(t)} & \dots & C_{0,m-1}^{(t)} \\ C_{1,0}^{(t)} & C_{1,1}^{(t)} & \dots & C_{1,m-1}^{(t)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n-1,0}^{(t)} & C_{n-1,1}^{(t)} & \dots & C_{n-1,m-1}^{(t)} \end{bmatrix}$$

3.2 Conjunto de estados

Todos los valores posibles que puede tomar una celda. En cada instante de tiempo t , cada celda deberá encontrarse en un estado k , que está definido dentro del conjunto de estados del AC. El conjunto de estados más sencillo corresponde a los elementos *biestables*, los cuales se pueden encontrar en sólo uno de dos estados posibles, 0 y 1. Pero también el estado puede venir representado por un vector de componentes reales,

$$S = \{0, 1, 2\}$$

$$S = \{\text{sano, enfermo, inmune, muerto}\}.$$

3.3 Vecindades

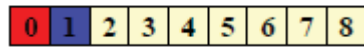
Para cada celda de un AC, es necesario establecer el *conjunto de celdas vecinas*. En caso de asociar objetos con coordenadas de un sistema de referencia, el criterio suele ser construir la vecindad de un elemento dado con todos aquellos otros elementos que se encuentran a menos de una cierta distancia de radio r , de tal forma que los más alejados no ejerzan influencia directa sobre él (Figura 1).



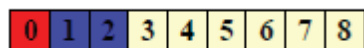
(a)



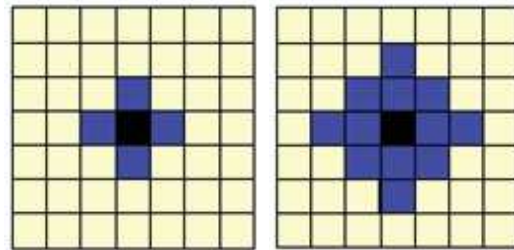
(b)



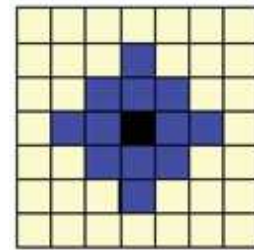
(c)



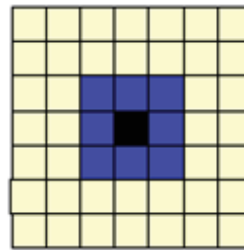
(d)



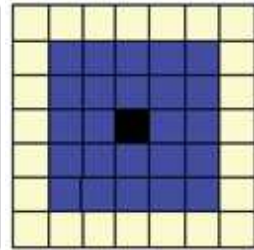
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 1. a) AC $d = 1, N(1) = 2$ b) AC $d = 1 N(2) = 4$ c) AC $d = 1 N(1) = 1$ d) AC $d = 1 N(2) = 2$ e) vecindad Von Neumann $N(1) = 4$ f) vecindad Von Neumann $N(2) = 12$ g) vecindad de Moore $N(1) = 9$ h) vecindad de Moore $N(2) = 24$

Las vecindades en los bordes de la región geométrica dependen de las condiciones que se impongan en los límites de la retícula (Figura 3). Se suelen considerar tres casos:

- **Bordes periódicos.** Células opuestas se consideran vecinas, de forma que en un retículo plano la superficie se convierte en un *torus* (Figura 2).
- **Bordes absorbentes.** Las células de los bordes no tienen vecinos más allá de los límites del retículo.
- **Bordes reflejantes.** Las células de los bordes tienen como vecinos más allá de los límites del retículo a la celda misma

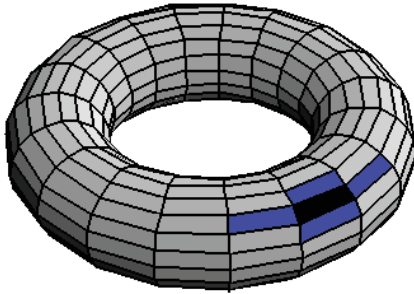
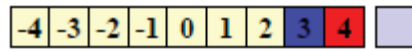
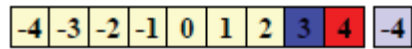


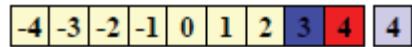
Figura 2. Torus



Bordes absorbentes

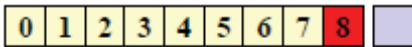


Bordes periódicos

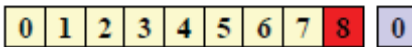


Bordes reflejantes

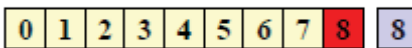
(a)



Bordes absorbentes

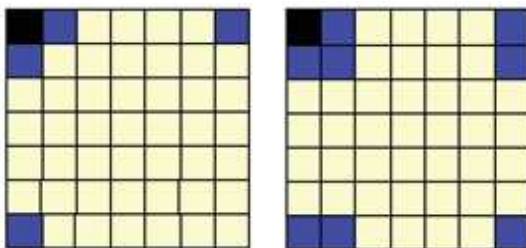


Bordes periódicos



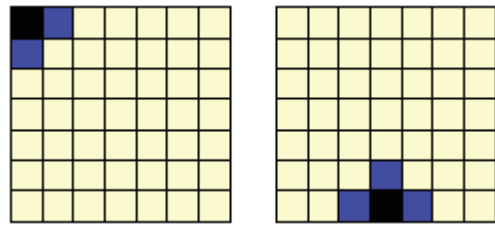
Bordes reflejantes

(b)

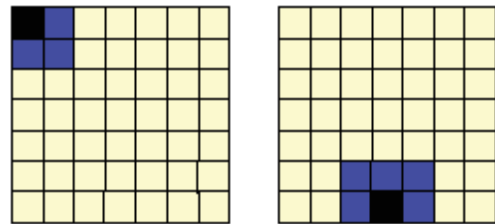


(c)

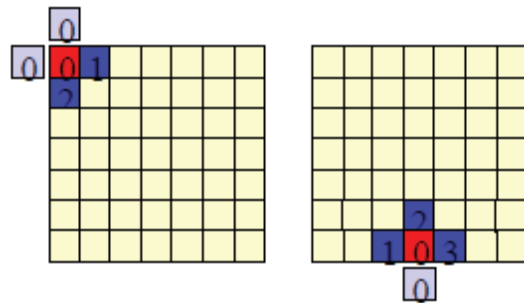
(d)



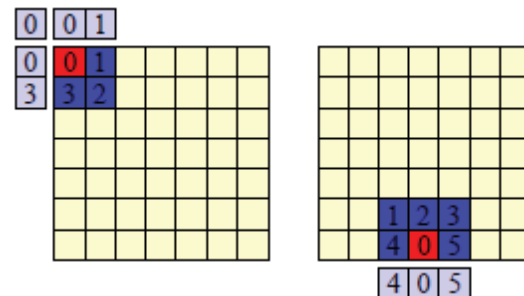
(e)



(f)



(g)



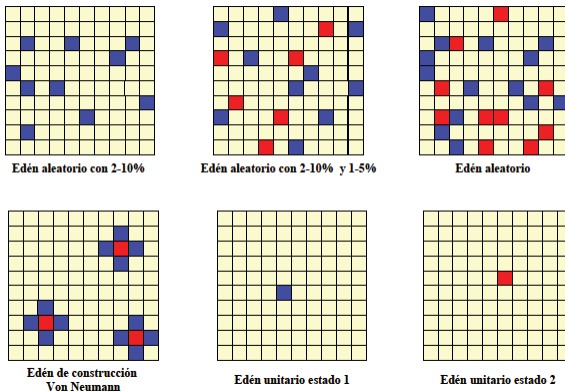
(h)

Figura 3. Autómatas celulares a) $d = 1$ $N(1) = 2$ b) $d = 1$ $N(1) = 1$ c) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes periódicos d) $d = 2$ vecindad de Moore bordes periódicos e) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes absorbentes f) $d = 2$ vecindad de Moore bordes absorbentes g) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes reflejantes h) $d = 2$ vecindad de Moore bordes reflejantes

Es importante establecer el punto de partida a través del tiempo desde donde comenzará a evolucionar el autómata para lo cual se definen sus **condiciones iniciales** (Figura 4). Las condiciones iniciales también llamadas **edén** (Moore, MyHill 1963), pueden tener una “construcción” específica (edén construido), generadas de forma aleatoria (edén aleatorio) o formadas por un único estado rodeado de estados quiescentes, nulos (edén unitario) [8].

Ejemplos:

- i. AC $d = 1, L = 20$ biestable, *edén construido*
edén = {0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0}
- ii. AC $d = 1, L = 20, S = \{0, 1, 2\}$, *edén aleatorio*
edén = {0 0 1 1 0 2 1 2 2 1 0 2 1 2 2 2 1 0 2 1}
- iii. AC $d = 1, L = 2$. Biestable, *edén unitario*
edén = {0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0}
- iv. AC $d = 2$, y $S = \{0 \rightarrow \text{amarillo}, 1 \rightarrow \text{azul}, 2 \rightarrow \text{rojo}\}$



3.4 Función de Transición

El aspecto más importante de los AC es la **regla de transición**, o **función de transición**, ya que ésta determina la evolución del sistema. El conjunto de reglas de transición T define la dinámica del AC.

Dada una celda i en un estado k , en conjunto con el estado k de cada uno de sus vecinos, estipulados por una vecindad N , para un instante de tiempo t , la regla de transición $T_m \in T$, calcula el siguiente estado de la celda. El número total de reglas posibles puede ser calculado por k^{k^n} donde k es el número de estados para cada celda y n es el número de vecindades, incluyendo a la propia celda [8].

Ejemplos:

- i. Para un autómata celular de dimensión $d = 1$, con dos estados y dos vecinos. Tenemos que $k = 2$ y $n = 3$, por lo que el número total de reglas es $2^{2^3} = 256$.
- ii. Para un autómata celular de dimensión $d = 2$, con dos estados y vecindad de Moore, tenemos que $k = 2$ y $n = 9$, así que el número total de reglas es $2^{2^9} = 262144$

La función de transición asocia a un estado con cada celda de la región. El efecto de la función de transición f es cambiar la configuración de la celda C_t en una nueva configuración de celda C_{t+1} de acuerdo a la regla:

$$C_{t+1} = f(\{C_t(i) : N(r)\}) \quad (3)$$

donde $N(r)$ es el conjunto de vecindades de r celdas.

Las funciones o reglas de transición se pueden especificar de diferente manera con base a la configuración del AC.

3.4.1 Reglas Determinísticas

Para AC $d = 1$ tenemos que las reglas **determinísticas** se definen para cada posible combinación de estados, con sus respectivas vecindades, asignar un valor de estado, que determine la evolución de la siguiente generación.

Consideremos un AC $d = 1, L = 20, N(1) = 1$, con edén aleatorio. Podemos definir las reglas de la Tabla 1:

Regla 1	Regla 2	Regla 3
$C_t V \rightarrow C_{t+1}$	$C_t V \rightarrow C_{t+1}$	$C_t V \rightarrow C_{t+1}$
$(0,0) \rightarrow 1$	$(0,0) \rightarrow 0$	$(0,0) \rightarrow 0$
$(0,1) \rightarrow 0$	$(0,1) \rightarrow 0$	$(0,1) \rightarrow 1$
$(1,0) \rightarrow 0$	$(1,0) \rightarrow 0$	$(1,0) \rightarrow 0$
$(1,1) \rightarrow 1$	$(1,1) \rightarrow 1$	$(1,1) \rightarrow 0$

Tabla 1. Reglas determinísticas

La regla 1 y regla 2 definen a las funciones lógicas disyunción y conjunción, respectivamente y la regla 3 es una definición específica que puede representar a alguna función lógica. La evolución de los AC bajo las mismas condiciones iniciales y que representan estas reglas se muestran en la Figura 4.

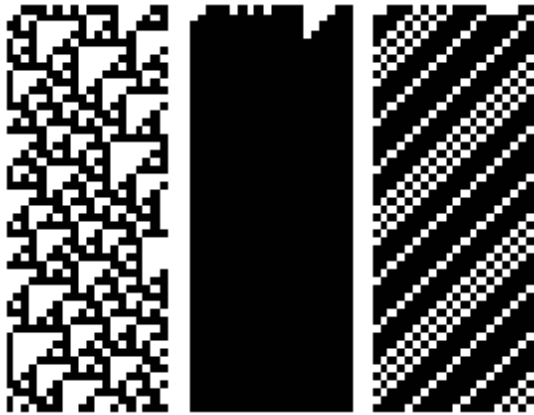


Figura 4. a) Regla 1 b) Regla 2 c) Regla 3 para 50 generaciones

Para AC $d = 2, L = 30 \times 30, N(1) = 9, S = \{0,1\}$, (vecindad de Moore bordes periódicos, edén aleatorio) y $f\{(1:2) \rightarrow 1, (1:3) \rightarrow 1, (0:2) \rightarrow 1, (*:*) \rightarrow 0\}$ donde $f\{(C_t: k \rightarrow 1)\}$, el comportamiento del AC lo podemos apreciar en la Figura 5.



Figura 5. Reglas determinísticas para AC $d = 2$

3.4.2 Reglas Totalísticas y Totalísticas exterior

Para AC $d = 1$ las *reglas totalísticas* son aquellas donde depende de la suma de los estados de

todas las celdas vecinas [2]. La regla totalística se puede describir por

$$C(r)_{t+1} = f(\sum\{N(r): C(r)_t\}) \quad (4)$$

Para AC $d = 1$ las reglas *totalísticas exterior* donde también depende del estado de la celda misma [2]. La regla totalística exterior se expresa por

$$C(r)_{t+1} = f(C(r)_t, \sum\{N(r): C(r)_t\}) \quad (5)$$

Ejemplos:

- i. Para AC $d = 1, L = 20, N(1) = 2, S = \{0, 1, 2\}$ Definimos la regla *totalística* $f = \{0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 0\}$ esto es: si la suma de los vecinos es 0 entonces $C_{t+1} = 1$, si la suma de los vecinos es 1 entonces $C_{t+1} = 2$ y si la suma de los vecinos es 2 entonces $C_{t+1} = 0$ (Figura 6.a).
- ii. Para AC $d = 1, L = 20, N(1) = 2, S = \{0, 1, 2\}$ Definimos la regla *totalística exterior* $f = \{(0,0) \rightarrow 0, (0, x > 0) \rightarrow 2, (1, x) \rightarrow 0, (2, x) \rightarrow 1\}$ esto es: si $C_t = 0$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es 0, entonces $C_{t+1} = 0$, si $C_t = 0$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es mayor a 0, entonces $C_{t+1} = 2$, si $C_t = 1$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es cualquier valor, entonces $C_{t+1} = 0$ y si $C_t = 2$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es cualquier valor, entonces $C_{t+1} = 1$ (Figura 6.b).

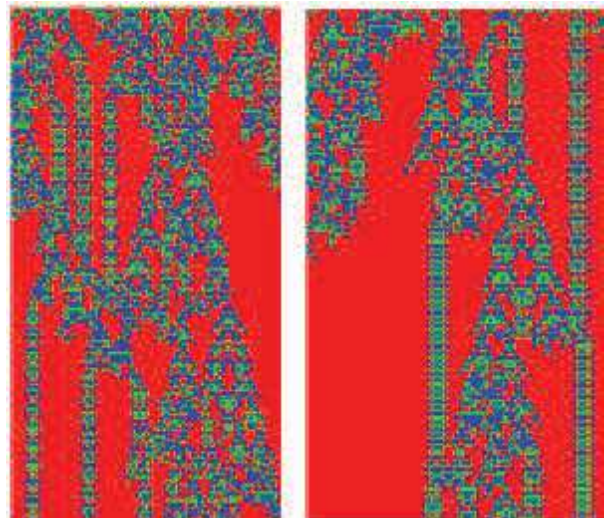


Figura 6. a) Regla totalística b) Regla totalística exterior

3.4.3 Reglas de Wolfram

Para AC $d = 1, N(1) = 2$, biestables. Las reglas de **Wolfram** son descritas por números binarios de ocho dígitos. Cualquier número binario de ocho dígitos puede describir un AC, por lo tanto hay $2^8 = 256$ reglas distintas (Tabla 2). Dos restricciones (no esenciales), son generalmente aplicadas a éstas reglas. Primero, una regla puede ser considerada **ilegal** si al menos un estado inicial quiescente, permanece sin cambio (condición quiescente). Esta restricción a la regla esta especificada esencialmente para los extremos con valor de 1. Segundo, la regla puede ser de **reflexión simétrica**, es decir que dos reglas generan idénticos valores, como por ejemplo 100 y 001; 110 y 011, etc. Esta restricción genera 32 posibles reglas **legales** de la forma $a_1 a_2 a_3 a_1 a_2 a_3 a_1 0$. Entonces definimos que una regla es considerada **ilegal** si viola la reflexión simétrica y/o si viola la condición quiescente [8].

REGLA 90 → 11011010	
V C _t V	C _{t+1}
(0,0,0)	0
(0,0,1)	1
(0,1,0)	0
(0,1,1)	1
(1,0,0)	1
(1,0,1)	0
(1,1,0)	1
(1,1,1)	1

Tabla 2. Regla de Wolfram

Ejemplos:

- i. La regla $90 \rightarrow 11011010$ es una regla *legal*, ya que es de la forma $a_1 a_2 a_3 a_1 a_2 a_3 a_1 0$ (Figura 7.a)
- ii. La regla $146 \rightarrow 10010110$ es una regla *legal*, ya que es de la forma $a_1 a_2 a_3 a_1 a_2 a_3 a_1 0$
- iii. La regla $2 \rightarrow 00000010$ es una regla *ilegal*, ya que viola la *reflexión simétrica* (Figura 7.b)
- iv. La regla $1 \rightarrow 00000001$ es una regla *ilegal*, ya que viola la *condición quiescente*

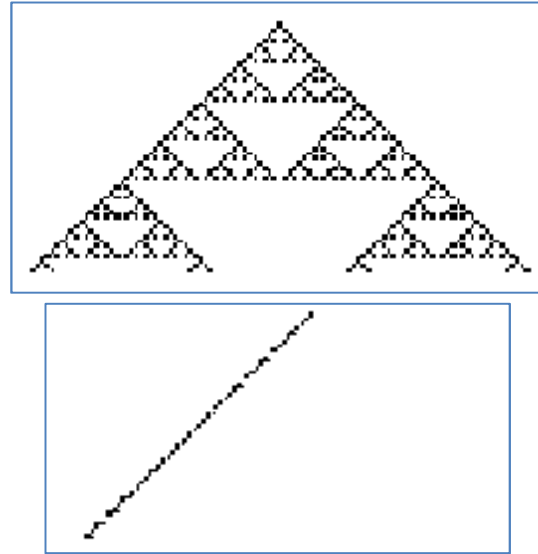


Figura 7. AC edén unitario 50 generaciones. a) Regla 90 b) Regla 2

3.4.4 Juego de la Vida de Conway

Para los AC $d = 2, L = 30 \times 30$, $N(1) = 9 \{Moore\}, S = \{0,1\}$ definimos la función de transición en términos del “Juego de la vida” o **GOL** (por sus siglas en ingles de “*Game of Life*”). Dicho AC ha sido extensivamente explorado y se han encontrado un gran número de patrones extraordinarios. El **GOL** es más una simulación donde puedes alterar los parámetros pero no puedes alterar la salida directamente, esto se hace con las condiciones de la simulación [1]. El “juego” es “jugado” en una región cuadrículada de dos dimensiones. Cada célula puede estar encendida (1) o apagada (0). Cada célula tiene ocho vecinos adyacentes (vecindad de Moore) a los lados y en las esquinas del cuadrado (bordes periódicos). La regla de la vida se puede expresar simplemente (en términos de la manera que afecta el comportamiento de la célula de una generación a la siguiente) como sigue:

- Si una célula está apagada (muerta) y tiene 3 vecinos “vivos” (de ocho), se convertirá en “viva” en la próxima generación.
- Si una célula está encendida (viva) y tiene 2 o 3 vecinos vivos, sobrevive, de otra manera muere en la siguiente generación.

La función de transición se denomina comúnmente $f(S23/B3)$, que significa que la célula *viva sobrevive* (“survive”) si tiene dos o tres vecinos

vivos y *nace* (“born”) si tiene 3 vecinos vivos. Estas reglas específicas fueron seleccionadas por el matemático J.H. Conway para garantizar que el AC esté en la frontera entre crecimiento ilimitado y la monotonía. Se probó que este comportamiento caótico es impredecible y que se puede utilizar para construir una Máquina de Turing universal y aún un constructor universal [1].

John Horton Conway, matemático británico en el colegio Gonville and Caius de la Universidad de Cambridge, a finales de los 60’s estaba trabajando con algunas ideas para un autómata celular simple. Las primeras ideas para un autómata celular fueron pensadas por Ulam. John Von Neumann usó esta idea para crear un autómata celular complejo, que podría producir patrones auto-reproducibles no triviales. La máquina de John Von Neumann tiene 29 estados, sin embargo Conway estaba buscando algo más simple pero interesante [1]. Al inicio de 1970 Conway y sus estudiantes jugaron con diferentes reglas, hasta que finalmente llegaron a la regla “*nacen si 3/sobreviven si 2 o 3*”. [2].

El GOL fue publicado en la revista Scientific American en Octubre de 1970 y posteriores artículos mostraban únicamente diferentes patrones que se descubrieron con otras reglas (1974-1988). El GOL es utilizado para el estudio de sistemas dinámicos y la simulación de sistemas complejos.

Consideremos el siguiente patrón de inicio, donde las celdas vacías representan el estado “off” (muertas) y las celdas llenas representan el estado “on” (vivas) (Figura 8). Aplicando la regla de Conway (S23/B3) la Figura 9 muestra el número de vecindades con las que cuenta cada celda.

Figura 8. Configuración inicial del GOL

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	2	3	3	2	1	0
0	1	1	2	2	1	1	0
0	1	2	3	3	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9. Vecindades del edén

Las celdas “vivas” pueden sobrevivir cuando tienen 2 o 3 celdas vecinas “vivas”. Las celdas centrales tienen exactamente 2 vecinos “vivos” por lo tanto “sobreviven”, las celdas que solo tienen un vecino “vivo” “morirán” de soledad. Las celdas vacías o “muertas” necesitan exactamente 3 vecinos “vivos” para pasar del estado “muerto” al estado “vivo”, en éste caso, 4 celdas pasarán de estar “muertas” a “vivas”. El resto de las celdas permanecerán “apagadas” ya que solo tienen 1 o 2 celdas vecinas “vivas” y no es lo suficiente para “vivir” (Figura 10).

0	0	1	2	2	1	0	0
0	0	2	3	3	2	0	0
0	0	3	5	5	3	0	0
0	0	2	3	3	2	0	0
0	0	1	2	2	1	0	0

Figura 10. Evolución del GOL en la primera generación

Para la siguiente generación podemos apreciar que 4 celdas “sobrevivirán” debido a que cuentan con 3 vecinos, las otras dos “morirán” de “inanición”. También podemos ver que 2 celdas “vacías” tienen 3 vecinos, por lo tanto pasarán del estado “muertas” a “vivas”. El resto de las celdas permanecerán apagadas (Figura 11).

0	0	1	2	2	1	0	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	1	2	5	5	2	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	0	1	2	2	1	0	0

Figura 11. Evolución del GOL en la segunda generación

Ahora tenemos que ninguna celda tiene tres vecinos, por lo tanto ninguna celda llegará a vivir. Todas las celdas “vivas” tienen exactamente 2 vecinos “vivo” por lo tanto todas ellas sobrevivirán. Entonces tenemos un patrón estable, que permanece vivo y que no cambiará en las siguientes generaciones.

El GOL no se limita a las reglas S23/B3. Otras variaciones con respecto al número de vecindades, o el número de celdas vecinas necesarias para que una celda pueda vivir, morir o sobrevivir, podrán generar combinaciones que muestran un comportamiento “vivo” a través del tiempo (Figura 12).

4. Aplicaciones de los autómatas Celulares

El desarrollo de AC ha encontrado aplicaciones específicas en varios campos de las ciencias. Física: termodinámica e hidrodinámica de partículas; Química: reacciones catalíticas y comportamiento de gases; Matemáticas: solución de ecuaciones diferenciales parciales, comportamiento de sistemas no lineales; Biología: estudios del comportamiento de microorganismos y macro organismos; Ecología: simulación de gases contaminantes comportamiento del fuego; Medicina: simulación de epidemias y estudios de fármacos; Economía: simulación del comportamientos económicos y tendencias financieras; Administración Pública: crecimiento de ciudades y control de tráfico; Psicología: comportamiento delictivo; etc.

Dentro de la ciencia computacional los autómatas celulares también se aplican sobre diferentes ramas de investigación: Criptografía, Teoría de la Computación, Simulación, Algoritmos genéticos, Paralelismo, Teoría del Caos y Fractales.

5. Conclusiones

Los autómatas celulares son estructuras ideales para construir modelos computacionales de sistemas dinámicos gracias a su capacidad de dotar a los elementos que forman el sistema, con una serie de propiedades, inducidas por su propia naturaleza, y mostrar la complejidad de todo el sistema. Los elementos que forman al autómata celular (espacio, conjunto de estados, vecindad y reglas de transición) fueron explicados con detalle, mostrando las características de cada uno de ellos.

Las propiedades de los autómatas celulares son parte importante del modelado computacional, las cuales afectan el comportamiento del sistema. Es importante mencionar que las condiciones en los bordes, el estado inicial y las reglas de transición, son elementos esenciales para mostrar la evolución a través del tiempo del autómata.

6. Referencias

- [1] Eppstein David; Searching for Spaceships; ACM Computing Research Repository A1/000/4003 July 2000
- [2] Espericueta Rafael (1997). “Cellular Automata Dinamics”. Bakersfield Collage, Math Department
- [3] Gaylor Richard J., Wellin Paul R. 1995.”*Computer Simulations with Mathematica, Explorations in Complex Physical and Biological Systems*”. Springer-Verlag TELOS
- [4] Gaylor Richard J., Nishidate Kasue (1996). “*Modeling Nature: Cellular Automata Simulations with Mathematica*”. Springer TELOS
- [5] Hopcroft John E., D. Ullman Jeffrey. (1997). “*Introducción a la Teoría de Autómatas, Lenguajes y Computación*”; CECSA
- [6] Russell Stuart, Norvig Peter (2010). “*Inteligencia artificial. Un enfoque moderno*”. Prentice Hall Hispanoamericana.
- [7] Toffoli Tommaso, Margolus Norman. (1991). “*Cellular Automata Machines a New Environment for Modeling*”; MIT Press.
- [8] Wolfram Stephen (1994). “*Cellular Automata and Complexity, Collected Papers*” Addison-Wesley

Estado del Arte de las Interfaces Cerebrales

Fernández Fraga Santiago Miguel, Rangel Mondragón Jaime
Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

*En los últimos años se han desarrollado tecnologías en el campo de la inteligencia artificial que permitan pasar por alto los canales de comunicación convencionales entre el cerebro de un usuario y una computadora (como los músculos o el habla). Las **interfaz cerebro computadora** (Brain Computer Interface, BCI) monitorean la actividad cerebral del usuario y traducen sus intenciones en órdenes sin activar ningún músculo o nervio periférico [10]. Los sistemas BCI permiten controlar dispositivos electrónicos y/o mecánicos por medio de las ondas cerebrales. Los sistemas BCI han demostrado su aplicabilidad en varios contextos: la conducción de un robot o silla de ruedas, prótesis de funcionamiento, la selección de cartas de un teclado virtual, navegación en Internet o en realidades virtuales, el control de juegos de computadora, y algunos otros. Éste tipo de sistemas es una forma natural para aumentar las capacidades humanas al proporcionar un nuevo enlace de interacción con el mundo exterior y es especialmente relevante como una ayuda para las personas con discapacidad. El presente artículo pretende mostrar una introducción a los sistemas BCI para describir de manera general las bases tecnológicas de su funcionamiento.*

Palabras claves: Interfaz Cerebro Computadora, Interfaz Cerebro Máquina, Sistemas BCI, BCI, BMI, ICC,

1. Introducción

1.1 Proceso Eléctrico de las Neuronas

El cerebro humano está formado por células especializadas llamadas neuronas. Las neuronas se componen de un cuerpo celular, un núcleo, las dendritas y un axón [4] (Figura 1).

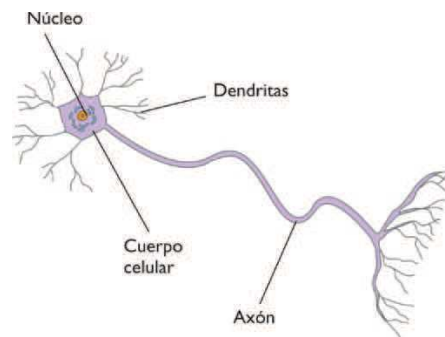


Figura 1. Componentes de la neurona

Las neuronas son células eléctricamente excitables, procesan y transmiten información vía señales químicas y eléctricas. Las señales eléctricas se generan por cambios en la carga eléctrica de la membrana de la neurona que cubre a toda la célula. Las neuronas tienen un potencial eléctrico en reposo, el cual es la diferencia de potencial entre el interior de la célula y el espacio extracelular. El potencial en reposo fluctúa como resultado de los impulsos que llegan de otras neuronas a través de las sinapsis. La sinapsis es una unión funcional intercelular especializada entre neuronas, donde se lleva a cabo la transmisión del impulso nervioso, el cual se inicia con una descarga química que origina una corriente eléctrica en la membrana de la célula. La membrana de la célula contiene canales iónicos donde iones de sodio (Na⁺), potasio (K⁺), y cloruro (Cl⁻) y Calcio (Ca²⁺) se concentran durante los procesos químicos en la célula. La concentración de iones crea diferencias de potencial en la membrana. Los cambios en la tensión en la membrana generan potenciales post-sinápticos los cuales causan el flujo eléctrico a lo largo de la membrana y las dendritas.

Cuando la diferencia de potencial es sumada en la zona de activación del axón alcanza el rango de los -43 mV, se dispara el axón mediante la generación de un potencial de acción en los +30 mV que va a lo largo del axón para

liberar los transmisores en el final de la misma (Figura 2). Cuando la diferencia de potencial es sumada y está por debajo de éste umbral, el axón descansa [6].

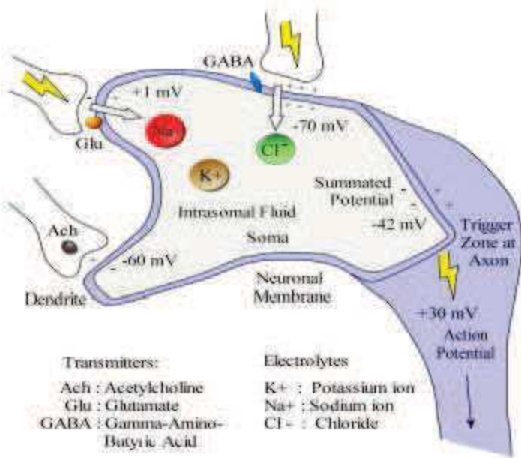


Figura 2. Resumen de la generación de potenciales post-sinápticos.

A pesar del hecho de que la mayor parte de las corrientes eléctricas permanecen dentro de la corteza cerebral, una fracción pequeña penetra en el cuero cabelludo, lo que provoca que diferentes partes del cuero cabelludo tengan diferentes potenciales eléctricos. Estas diferencias, varían en amplitudes de 10-100 μ V las cuales son detectadas por electrodos. Existen diferentes métodos para registrar la actividad cerebral con base en las condiciones del estado (vigilia, sueño, etc.):

- Electroencefalograma (EEG)
- Electroencefalografía (ECoG)
- Magnetoencefalografía (MEG)
- Electromiografía (EMG)
- Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)
- Tomografía por emisión de positrones (Positron Emission Tomography, PET)
- Imágenes de resonancia magnética funcional (funcional Magnetic Resonance Imaging, fMRI).

La ECoG es una técnica invasiva, es decir, requiere de una intervención para la colocación de electrodos en la superficie cortical (2.2 Ω m). Por su parte, las técnicas MEG, PET NIRS y fMRI requieren de instalaciones y equipos de mayor costo. La EMG se relaciona con la contracción de los músculos y patrones de onda única. EEG es una técnica sencilla, no invasiva, portátil y de

bajo costo; por ello, el método más empleado para el registro de la actividad cerebral en sistemas BCI. El presente trabajo se enfocará en el uso de la tecnología EEG.

1.2 Tecnología de Electroencefalograma (EEG)

Existen diferentes tipos de neuronas: sensitivas, motoras e interneuronas, y hay alrededor de 20 tipos principales de picos que generan actividad eléctrica cerebral. La mayoría de estos picos son patrones periódicos. Este hecho hace que sea razonable descomponer las señales del EEG en un conjunto de frecuencias armónicas, las cuales se describirán más adelante.

Mediante la observación de las diferencias entre las señales eléctricas procedentes de los diferentes lugares en el cuero cabelludo, se puede monitorear la actividad eléctrica cerebral y ver qué partes del cerebro son eléctricamente activas durante diferentes tipos de actividades, y qué tan alto es el potencial eléctrico de la actividad.

El EEG lee potenciales post-sinápticos, que son relativamente continuos (un potencial persiste hasta 100 ms). Los potenciales de acción son muy breves (1 ms) y su aportación eléctrica es pequeña, por lo que no se puede realizar un seguimiento de estos en el EEG [6].

Por medio de varios electrodos colocados en partes estratégicas del cuero cabelludo, podemos leer las diferencias de potenciales que existen entre ellos. Por lo general, hay uno o varios electrodos de referencia, que se colocan en las zonas más estables de actividad eléctrica, como la nariz o los oídos (Figura 3).

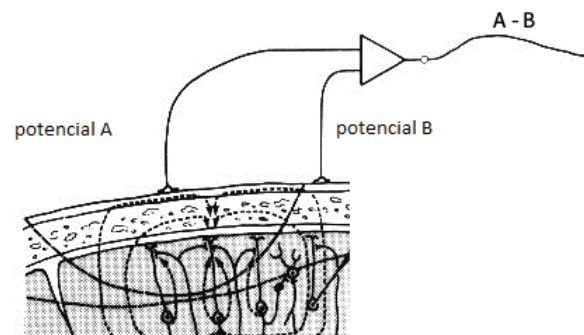


Figura 3. Dos electrodos en las zonas del cuero cabelludo con diferentes potenciales eléctricos producen la señal.

1.3 Señal EEG

Una señal de EEG se compone de una serie de potenciales eléctricos (μV) que fluctúan a través del tiempo en diferentes canales. Cada canal representa un electrodo colocado en el cuero cabelludo. Cada equipo EEG tiene una cierta velocidad de muestreo a cuantificar, la cual indica el número de cambios por segundo que una señal de salida puede tener (Figura 4).

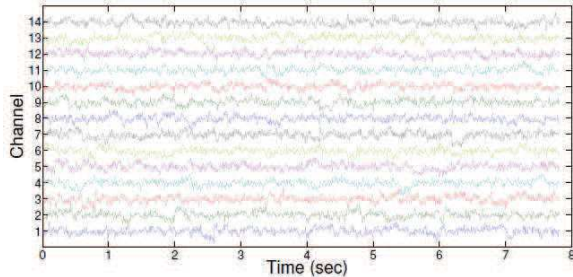


Figura 4. Conjunto de señales EEG, 14 canales durante un muestro de 8 seg.

Las neuronas se disparan periódicamente y, dependiendo del tipo de actividad, la periodicidad del disparo cambia. Cuando la región del cerebro está implicada en un cierto tipo de actividad, todas las neuronas en esa región cambian con la misma periodicidad y esas fluctuaciones conjuntas se presentan en la señal [6]. De acuerdo a la frecuencia, las ondas cerebrales se clasifican en varios grupos (Figura 5), las cuales corresponden a ciertas actividades en específico (Tabla 1).

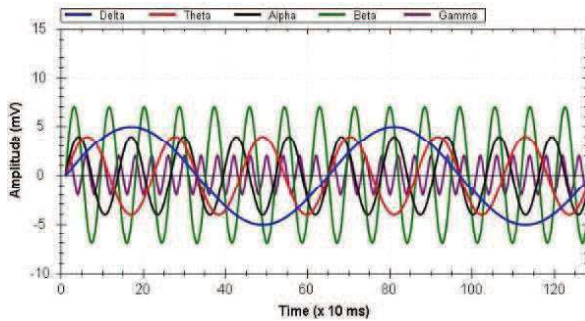


Figura 5. Las 5 bandas de frecuencia principales y su relación entre sí.

Nombre	Rango de frecuencia (Hz)	Estado	Tipo de Actividad
Delta (δ)	Hasta 4	Subconsciente	<ul style="list-style-type: none"> Onda lenta del sueño en adultos Actividad cerebral Bebés Tareas de atención continua
Theta (θ)	4-8	Subconsciente	<ul style="list-style-type: none"> La actividad cerebral de los niños pequeños Somnolencia o excitación Marcha en vacío Reprimir una respuesta o acción
Alpha (α)	8-13	Subconsciente	<ul style="list-style-type: none"> Relajación al despertar Los ojos están cerrados Inhibición de las áreas de la corteza que no están en uso, desempeña un papel activo en la coordinación de la red y de la comunicación
Mu (μ)	8-13	Consciente	<ul style="list-style-type: none"> Aparece en las neuronas en reposo responsables de la actividad motora
Betta (β)	13-30	Consciente	<ul style="list-style-type: none"> Estado de alerta Activo, el pensamiento ansioso, concentración Trabajar
Gamma (γ)	30-100+	Consciente	<ul style="list-style-type: none"> Procesamiento sensorial Cross-modal (percepción que combina dos sentidos diferentes, como el sonido y la vista) Aparece durante la memoria a corto plazo, reconocimiento de objetos, sonidos o sensaciones táctiles Estado de stress y confusión

Tabla 1. Rangos de frecuencia básicos y tipos de actividades correspondientes.

Para poder captar todas estas señales se utiliza una maya de electrodos basada en el Sistema Internacional de Sociedades de Electroencefalografía 10-20 (Figura 6). Las marcas de referencia son A1 (nación) A2 (inión) el resto de los electrodos se identifican por una letra que indica la zona sobre la cual se obtiene la actividad eléctrica: “F” (lóbulo frontal), “P” (lóbulo parietal), “T” (lóbulo temporal) “O” (lóbulo occipital), “C” (lóbulo central), “Fp” (polo frontal). El número se utiliza para identificar el hemisferio cerebral, los electrodos ubicados en el lado izquierdo se denotan con números impares y los del lado derecho con números pares. El sufijo “Z” indica la línea central del cerebro. La Figura 7 muestra la relación entre las diferentes zonas del cerebro y las distintas zonas de captación de señales [15].

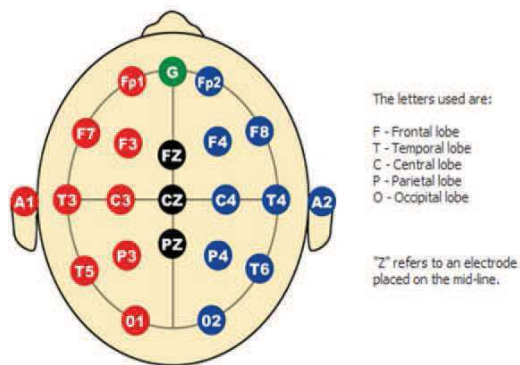


Figura 6. Colocación de electrodos basada en el SISE 10-20

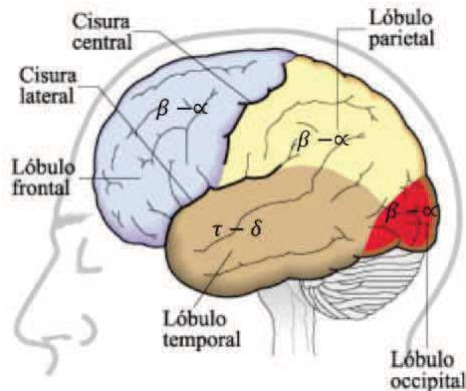


Figura 7 Relación zonas cerebrales y las zonas de captación de señales

La interpretación del EEG, comúnmente, se basa en el cálculo de los valores de amplitud y medidas de valores pico en los registros en los potenciales relacionados con eventos (ERP), que se obtiene en condiciones de ausencia y de excitación externa de la persona, con lo cual, las fuentes corticales de los valores ERP se asumen de naturaleza diferente a la actividad espontánea del EEG. La identificación de las fuentes biológicas, comúnmente se realiza mediante el empleo de diferentes técnicas de procesamiento digital de señales incluyendo análisis de tiempo-frecuencia, técnicas de descomposición lineal y no lineal.

2. BCI (Brain Computer Interface)

Una Interface Computadora Cerebro (BCI), también conocida como Interface Cerebro Máquina (BMI) o Interface Cerebro Computadora (ICC), es un sistema que traduce la actividad

electrofisiológica o la tasa metabólica de un sistema nervioso orgánico en señales que pueden ser medibles por un dispositivo electromecánico, es decir que tiene por objeto proporcionar un canal de comunicación no-muscular para el envío de comandos al mundo exterior utilizando la actividad eléctrica del cerebro, la cual al ser medible puede ser procesada, por lo cual permite la interacción entre el cerebro humano y una computadora. Entre las diversas aplicaciones de los sistemas BCI la más importante es la capacidad para controlar dispositivos externos por medio de la actividad eléctrica del cerebro [16].

2.1 Antecedentes Históricos

El origen de las tecnologías BCI nació con el descubrimiento de la naturaleza eléctrica del cerebro (Richard Caton 1875). Hans Berger (1924) consiguió registrar la actividad cerebral mediante la electroencefalografía, siendo primero en registrar un EEG de un cerebro humano. Berger consiguió clasificar las diferentes ondas cerebrales, por ello las ondas Alfa (8-12Hz) también se denominan ondas Berger [13].

En 1969 Fetz del Centro de Investigación de Primates Regional y el Departamento de Fisiología y Biofísica de la Universidad de Washington Escuela de Medicina en Seattle, mostraron por primera vez que los monos podían aprender a controlar un brazo robot por medio de la actividad neuronal.

En 1970 se inicia la investigación de los primeros dispositivos BCI en la Universidad de California (UCLA) con una beca de la National Science Foundation y un contrato con DARPA.

En 1980, Apostolos Georgopoulos en la Universidad Johns Hopkins encontró una relación matemática entre las respuestas eléctricas de las neuronas de monos macacos rhesus y de un motor; en la misma época Lawrence Farwell y Emanuel Donchin desarrollaron una interfaz cerebro-computadora basada en señales de EEG.

En los 90's se ha producido un rápido desarrollo en sistemas BCI los cuales han sido capaces de captar señales complejas de córtex cerebral mediante la grabación del conjunto de las señales neuronales y el uso de éstas para controlar dispositivos externos. Grupos de investigación destacados: Richard Andersen, John Donoghue, Phillip Kennedy, Yang Dan, Miguel Nicolelis y Andrew Schwartz. El campo de investigación de

los sistemas BCI durante la época de los 90's se ha centrado principalmente en fines médicos, como la implantación de prótesis neuronales para poder recuperar la audición, vista o movilidad dañadas en un individuo.

En la primera década del siglo XXI la investigación además de fines médicos, se centró también en la industria de los videojuegos y se introdujeron en el mercado las primeras interfaces cerebro computadora no invasivas. Jessica Bayliss en el 2000 de la Universidad de Rochester mostró que los voluntarios que llevan cascos de realidad virtual podrían controlar elementos en un mundo virtual con lecturas de las ondas cerebrales P300. Posteriormente Bin He y colaboradores demostró la capacidad de una BCU basada en EEG para controlar el vuelo de un helicóptero virtual en el espacio de 3 dimensiones. En la segunda mitad de la década del siglo XXI surgen empresas como Mindball, NeuroSky y Mattel dedicadas al desarrollo de aplicaciones relacionadas con juegos y empresas como Guger Technologies, Emotiv systems que han desarrollado modelos básicos de BCI como plataformas de desarrollo.

2.2 Características

Las tecnologías BCI, basada en sistemas de inteligencia artificial, implica el uso de dispositivos alámbricos y/o inalámbricos, que detectan las ondas cerebrales tanto en el nivel consciente como en el no consciente. Esta tecnología de procesamiento neuronal hace posible que las computadoras puedan interactuar directamente con el cerebro humano.

Los estados cerebrales son el resultado de diferentes patrones de interacción neural. Estos patrones conducen a las ondas que se caracterizan por diferentes amplitudes y frecuencias. El cerebro humano presenta actividad eléctrica debido a dos causas. La primera es interna, esto es, debido a su funcionamiento involuntario como el control de la respiración, digestión etc. y por voluntad del individuo, al mover su cuerpo, hablar o pensar, etc. La segunda causa de la actividad cerebral es la aparición de estímulos externos, a través de algún sentido corporal.; solo estos últimos son parte del desarrollo del presente trabajo.

Los sistemas BCI se pueden clasificar de acuerdo a su implementación:

Sistemas Invasivos: Es decir, son implantados directamente en el cerebro y su principal

aplicación es en el área de prótesis para devolver el movimiento a alguna extremidad.

Sistemas No Invasivos: La adquisición de las señales se realiza empleando electrodos, colocados en la superficie del cuero cabelludo.

Los sistemas BCI se pueden clasificar de acuerdo a la adquisición de las señales en:

Sistemas BCI Endógenos: o sistemas basados en ritmos cerebrales, dependen de la capacidad del usuario para controlar su actividad electrofisiológica, como puede ser la amplitud del EEG en una banda de frecuencia específica sobre un área concreta de la corteza cerebral. Podemos clasificar a los sistemas endógenos en sistemas BCI basados en imágenes motoras (ritmos sensoriomotores) o en sistemas BCI basados en potenciales corticales lentos (SCP). Los sistemas endógenos requieren de un período de entrenamiento intensivo.

Un BCI basado en imágenes motoras o ritmos sensoriomotores. Se basa en un paradigma de dos o más clases de imágenes motoras (MI) (movimiento de la mano derecha o izquierda, de los pies, de la lengua, etc.) u otras tareas cerebrales (rotación de un cubo, realización de cálculos aritméticos, etc.). Este tipo de tareas mentales producen cambios en la amplitud de los ritmos sensoriomotores μ y β , registrados sobre la zona somato sensorial y motora de la corteza cerebral (Figura 6). Estos ritmos presentan variaciones tanto para la ejecución de un movimiento real como para la imaginación de un movimiento o la preparación al mismo. Un BCI basado en SCP implica cambios lentos de voltaje generados sobre la corteza cerebral, con una duración variable entre 0.5 y 10 segundos. Se asocian típicamente con el movimiento y otras funciones que implican una activación cortical. Se ha demostrado que las personas pueden aprender a controlar estos potenciales [3].

Sistemas BCI Exógenos: Son sistemas basados en potenciales relacionados con eventos (ERP) dependen de la actividad electrofisiológica evocada por estímulos externos y no necesitan de una etapa intensiva de entrenamiento. Podemos clasificar a los sistemas BCI exógenos en sistemas basados en potenciales por eventos P300, basados en potenciales por eventos visuales (VEP), basado en potenciales por eventos visuales de estado

estable (SSVEP) o sistemas basados en potenciales por eventos auditivos (AEP).

Los sistemas BCI basados en P300. Hacen referencia a un pico de amplitud que aparece en el EEG aproximadamente unos 300 ms después de haberse producido un estímulo auditivo o visual poco frecuente, de ahí su nombre P300. Habitualmente, se presenta a la persona un conjunto de estímulos de los que solo unos pocos tienen relación con la intención de la persona. De esta forma, los estímulos de interés, al ser no frecuentes y estar mezclados con otros estímulos mucho más comunes, provocan la aparición de un potencial P300 en la actividad cerebral de la persona. Dicho potencial se observa principalmente en las zonas central y parietal de la corteza cerebral (Figura 7).

Los sistemas BCI basados en VEP y SSVEP se detectan en el EEG registrado sobre la zona visual de la corteza cerebral tras haberse aplicado un estímulo visual al usuario. Estos potenciales se hacen estables si la tasa de presentación del estímulo visual está por encima de 6 Hz. Cuando la persona enfoca su mirada en una imagen que parpadea a una frecuencia determinada, es posible detectar dicha frecuencia analizando el espectro de la señal EEG, ya que aumenta la amplitud del SSVEP en la frecuencia de la imagen parpadeante y en su segundo y tercer armónico (Figura 6).

Los sistemas BCI basados en AEP se detectan en el EEG registrado sobre la zona auditiva de la corteza cerebral presentando al usuario fuentes de sonidos a diferentes frecuencias, el usuario se concentra en alguno de ellos, genera un potencial de la misma frecuencia que el estímulo (Figura 6). El presente trabajo se enfoca en los sistemas P300 y SSVEP.

2.3 LF-ASD (Low-Frequency Asynchronous Switch Design)

El LF-ASD es una tecnología desarrollada para trabajar directamente con las interfaces BCI como un control asíncrono de las aplicaciones. El LF-ASD funciona como ABS (Asynchronous Brain Switch), un interruptor asíncrono que se activa sólo cuando un usuario tiene la intención de control IC (Intentional Control) y mantiene una salida de estado inactivo cuando el usuario no genera la señal con significado para controlar el dispositivo NC (No Control), es decir, pueden

estar inactivo, pensando en un problema o realizar alguna otra acción (Figura 8).

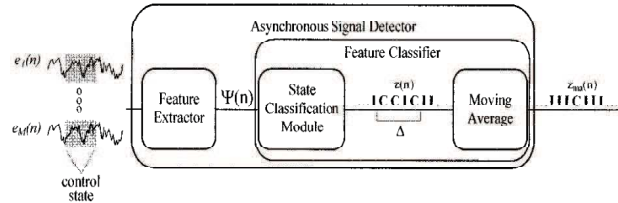


Figura 8. Componentes de un LF-ASD propuesto por Mason S. G. y Birch G. E. (2000).

3. Modelo Funcional BCI

Las funciones básicas de los sistemas BCI consisten en medir la actividad cerebral, procesarla para obtener características de interés, y, una vez obtenidas interactuar con el entorno de la forma deseada por el usuario. Modularmente lo podemos representar en: módulo de adquisición de las señales de la actividad cerebral; módulo de procesamiento de las señales el cual se encarga de recolectar la señal resultante, de medir la actividad cerebral y aplicar filtros (análisis de señales) para decodificar el proceso neurofisiológico que refleja la intención del usuario; y por último la aplicación, módulo encargado de materializar la interacción del usuario con el entorno (Figura 9).

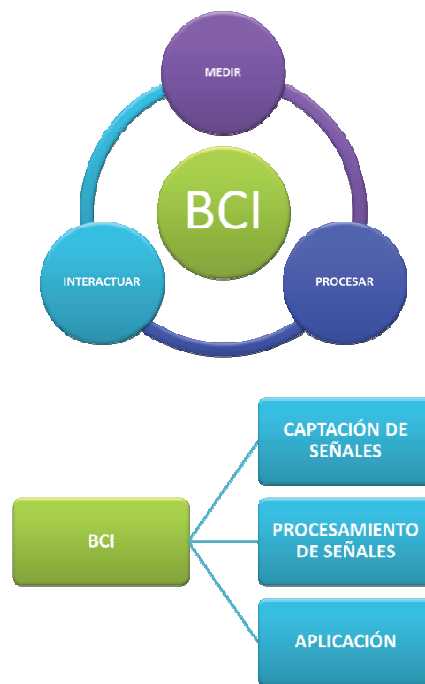


Figura 9. Diagrama de bloques de los sistemas BCI

El procesamiento de señales es una parte importante del diseño de una BCI, ya que se necesita en la extracción de la información significativa de la señal del cerebro. Un factor esencial para el éxito del funcionamiento de los sistemas BCI son los métodos utilizados para procesar las señales del cerebro. Analizar una señal consiste en aplicar un algoritmo que extrae información en forma de parámetros, que resultan útiles para describirla, o conocer algún aspecto de ella. Mason and Birch [8] propusieron un modelo funcional de un sistema BCI basado en ERP (Figura 10, Tabla 2).

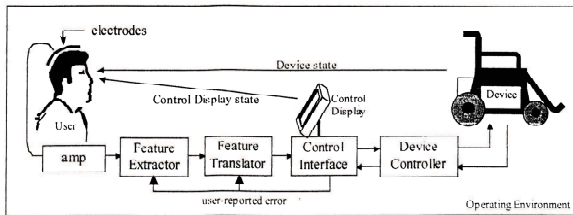


Figura 10. Modelo funcional de los Sistemas BCI Mason y Birch (2003)

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN FUNCIONAL
Usuario (User)	Es la persona que controla el dispositivo en el sistema BCI
Electrodos (Electrodes)	Conciertan los estados cerebrales del usuario en señales eléctricas
Amp	Funciona como amplificador y filtro pase-banda para las señales eléctricas provenientes del cerebro del usuario
Extracción de características (feature extraction)	Transforma las señales amplificadas en características de valor que corresponden al subyacente mecanismo neurológico seleccionado para el control por parte del usuario
Traducción de características (feature Translator)	Convierte la características en un vector en control de señales lógicas
Control Interface	Traduce las señales de control en señales de control simétricas que son apropiadas para un dispositivo en particular
Dispositivo de control (Device Controller)	Dispositivo de control

Tabla 2. Definición funcional de un Sistema BCI (Mason y Birch 2003)

Bashashati, Fatourehchi, Ward y Birch (2007) realizan un estudio donde se complementan las etapas Generador de Características y Traductor de Características, propuestas por Mason y Birch [8],[9] (Figura 11, Tabla 3).

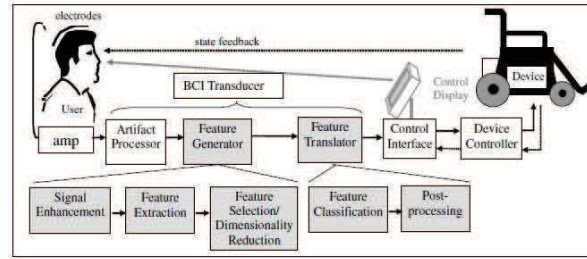


Figura 11. Modelo funcional de los Sistemas BCI [1].

ITEM	COMPONENTE	SUBCOMPONENTE	DESCRIPCIÓN FUNCIONAL
BCI Transducer	Artefact Processor		Remueve los artefactos de la señal de entrada
	Generador de características (Feature Generator)		Transforma las señales resultantes en valores de características que corresponden con el mecanismo neurológico subyacente empleado por el usuario para el control
		Pre-Procesamiento (Signal Enhancement)	Proceso de filtrado y mejoramiento de las señales emitidas por el EEG y donde se eliminan algunos de los posibles artefactos que se encuentran superpuestos a la señal de interés (parpadeo, movimiento de los ojos, electrocardiograma, movimientos musculares, etc.)
		Extracción de características (Feature Extraction)	Genera el vector de características formado por las señales seleccionadas
		Selección de características / Reducción de dimensionalidad (Feature Selection / Dimensionality Reduction)	Selecciona y reduce el número de características y/o canales
		Traductor de características (Feature Translator)	Traduce las características en señales lógicas de control de salida, señales de dos estados
		Clasificación de características (Feature Classification)	Las características seleccionadas las convierte a señales de control
		Post-procesamiento (Post-processing)	Incrementa el desempeño de las señales seleccionadas y reduce el número de errores

Tabla 3. Taxonomía del diagrama de la etapa Transducer de los sistemas BCI

El Modelo funcional BCI de Mason y Birch [8] requiere de muchas etapas en las cuales la señal generada por el EEG recibe muchas transformaciones, la mayoría de las investigaciones se han centrado en desarrollo de técnicas y metodologías para mejorar el desempeño en cada una de ellas [2].

Investigaciones recientes se han basado en el modelo simplificado de Moore (2003) para el desarrollo de aplicaciones en tiempo real (Figura 12). Éste modelo se centra en dos etapas, lo cual permite que el conjunto de procesamiento de señales requeridas sea menor y por lo tanto aplicaciones más rápidas.

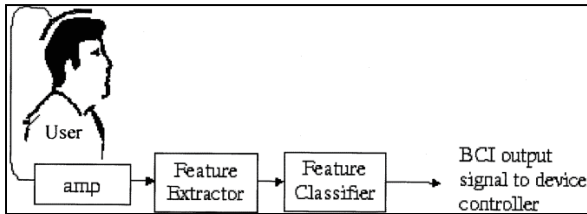


Figura 12. Modelo funcional BCI simplificado Moore (2003)

En los sistemas BCI, se requiere primeramente determinar los mecanismos neurológicos o procesos empleados por un usuario BCI para generar las señales de control, estas señales de control son las fuentes electrofisiológicas. Los BCI actuales las dividen en siete categorías principales, esta investigación se centrará en las actividades electrofisiológicas P300 y SSVEP (Tabla 4, [2]).

ACTIVIDADES ELECTROFISIOLÓGICAS
Actividad Sensomotora:
a) Ritmos cerebrales (μ, β, γ)
b) Potenciales Relacionados con Movimientos (MRP)
c) Potenciales Relacionados con Eventos (ERP)
Potenciales Corticales Lentos (SCP)
P300 (pico positivo generado 300ms después de recibir un estímulo)
Potenciales por eventos visuales (VEP)
Potenciales por eventos visuales de estado estable (SSVEP)
Respuesta a Actividades Mentales
Celdas de Actividad Neuronal (ANC)
Neuromecanismos Múltiples (MN)

Tabla 4. Actividades electrofisiológicas usados en los Sistemas BCI

El procesamiento de señales es la parte más importante en el desarrollo de los sistemas BCI. Se han desarrollado diferentes metodologías y/o

técnicas con base a las etapas funcionales del modelo propuesto por Bashashati et al [1].

Para la etapa *pre-procesamiento* tenemos SL (Surface Laplacian), ICA (Independent Component Analysis), Filtro de Kalman, Car (Common Average Referencing), CSP (Common Spatial Patterns).

Para la etapa de *extracción de características* se han desarrollado las metodologías de Cross-Correlation, TRF (Time-frequency representation), SDA (Stepwise Discriminant analysis) para señales P300, y SP (Spectral Parameters) y Cross-Correlation para SSVEP.

En la etapa de *selección/reducción de dimensionalidad* GA (Genetic Algorithm), PCA (Principal Component Analysis), DSLVQ (Distinctive Sensitive Learning Vector Quantization), SVM (Support Vector Machine), SDA (Stepwise Discriminant Analysis).

Metodologías basadas en Redes Neuronales, lógica difusa, Variaciones del filtro de Kalman, regresiones lineales, no lineales y cuadráticas para la etapa de *clasificación de características*. Finalmente para la etapa de *post-procesamiento* los métodos ERN (Event-Related Negativity) NEC (Nased Error Correction), SA-UK (Successive averaging unknown output state), HGA (Hybrid-Binary Genetic Algorithm) (Bashashati et al 2007).

4 Sistemas BCI Híbridos

Investigaciones recientes han demostrado que se puede mejorar el desempeño de los sistemas BCI convencionales. Los sistemas *BCI Híbridos* (HBCI) son una combinación de diferentes señales o canales de información y tienen capacidad para proporcionar de forma simultánea o secuencialmente múltiples comandos de control. Por ejemplo, B. Z. Allison et al (2010) demostró que la combinación de múltiples señales del cerebro, puede mejorar la exactitud de un BCI, en especial la de los BCI utilizados para personas ciegas. Jinyi Long et al (2010) presentaron un sistema HBCI para el control de un cursor 2-D de forma continua [7].

Los sistemas HBCI, como cualquier BCI, deben cumplir con cuatro criterios para funcionar como BCI [12]:

1. Directo: El sistema debe basarse en la actividad registrada directamente del cerebro.
2. El control intencional: Al menos una señal del cerebro grabable, que puede ser intencional modulada, debe proporcionar la entrada al BCI (potenciales eléctricos, campos magnéticos o cambios hemodinámicos).
3. Procesamiento en tiempo real: El procesamiento de la señal debe ocurrir en línea y obtener una comunicación o señal de control.
4. Retroalimentación: la persona debe obtener información sobre el éxito o el fracaso de su(s) esfuerzos de comunicación o control.

Los sistemas HBCI mejoran el rendimiento general del sistema y reducen la tasa de falsos positivos (FPR) durante los periodos de reposo, por ejemplo en los estado estacionarios de los potenciales SSVEP.

Los sistemas HBCI pueden tener más de una entrada por lo que las entradas se procesan típicamente simultáneamente (Figura 13 B, C) o dos sistemas operan secuencialmente, mediante el cual el primer sistema puede actuar como un "interruptor cerebral" (Figura 13 A, D, E) o como un "selector" (Figura 13 F, G). Hay otros tipos de BCI secuenciales, lo que podría ir más allá de estos conceptos conmutador/ selector. Utilizamos los términos "simultáneo" y "secuencial" para referirse a estos dos tipos de BCI híbridos. En ambos casos, como en cualquier BCI, al menos una de las señales de entrada debe ser una señal grabada directamente desde el cerebro [12].

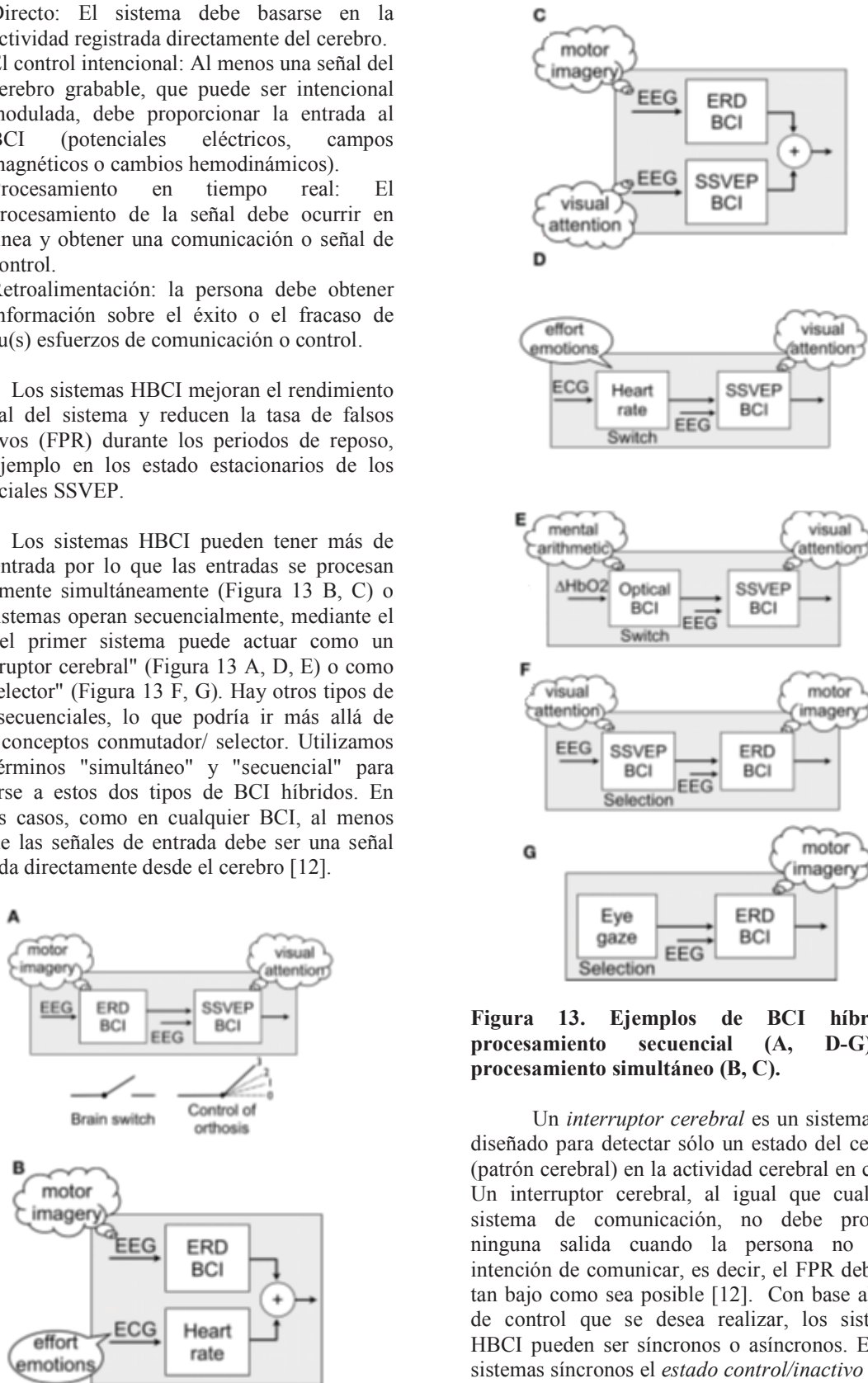


Figura 13. Ejemplos de BCI híbridos: procesamiento secuencial (A, D-G) y procesamiento simultáneo (B, C).

Un *interruptor cerebral* es un sistema BCI diseñado para detectar sólo un estado del cerebro (patrón cerebral) en la actividad cerebral en curso. Un interruptor cerebral, al igual que cualquier sistema de comunicación, no debe producir ninguna salida cuando la persona no tiene intención de comunicar, es decir, el FPR debe ser tan bajo como sea posible [12]. Con base al tipo de control que se desea realizar, los sistemas HBCI pueden ser síncronos o asíncronos. En los sistemas síncronos el *estado control/inactivo* no es necesario, sin embargo en los sistemas asíncronos

el problema importante es distinguir el control y estados de inactividad rápidamente y con precisión sobre la base de señales de EEG en proceso. Para éstos últimos la tasa de verdaderos positivos (TPR) en el estado de control y a la FPR durante el estado de reposo son las herramientas para medir su desempeño (Li Yuanqing et al 2013).

Trabajos recientes ha validado el nuevo enfoque de los HBCI para disminuir el FPR con el uso de dos o más patrones cerebrales: B.Z. Allison et al (2010), Pfurtscheller et al (2010), Yuanqing Li et al (2010, 2012) con patrones MI-SSVEP; Jinyi Long et al (2012) ritmos cerebrales β/μ -P300; B. Z. Allison et al (2010), R. Panicker et al (2011), E. Yin et al (2013), y Yuanqing Li et al (2013) con patrones cerebrales P300-SSVEP. Los HBCI pueden alcanzar metas específicas con más eficacia que los sistemas BCI convencionales (Li Yuanqing et al 2013).

4. Futuro y Retos de los sistemas BCI

Los sistemas BCI es una tecnología que permite controlar dispositivos electrónicos y/o mecánicos por medio de las ondas cerebrales. El cerebro genera señales eléctricas a través de las conexiones neuronales, esas señales eléctricas pueden ser detectadas por equipos especializados y pueden ser identificadas, y medidas para posteriormente manipularlas desde el exterior para controlar algún dispositivo.

Un BCI puede proporcionar una nueva forma de comunicación para usuarios especiales que no se pueden comunicar a través de vías normales. Un sistema BCI puede enviar comandos, controlados por la actividad cerebral y que se distingue por el procesamiento de señales EEG [14]. Los sistemas BCI han demostrado su aplicabilidad en varios contextos: la conducción de un robot o silla de ruedas, prótesis de funcionamiento, la selección de cartas de un teclado virtual, navegación en Internet o en realidades virtuales, el control de los juegos de computadora, y algunos otros. Este tipo de sistemas es una forma natural para aumentar las capacidades humanas al proporcionar un nuevo enlace de interacción con el mundo exterior y es especialmente relevante como una ayuda para las personas con discapacidad. El principio central de un sistema BCI es la capacidad de distinguir los diferentes patrones de actividad cerebral, cada uno asociado a una intención particular o a una tarea [10].

Se han desarrollado sistemas BCI basados en los diferentes patrones de actividad cerebral generados por el EEG, la mayoría de las investigaciones se han centrado en los sistemas BCI basados en actividades sensomotoras y SCP [1]. Los sistemas BCI basados en actividades P300 y SSVEP tienen la ventaja de tener una mayor precisión y una mayor tasa de transferencia de información (ITR). Además requieren canales de EEG cortos y menor tiempo de entrenamiento. Sin embargo, al igual que otras modalidades de BCI, las técnicas más recientes de BCI basados en SSVEP también se enfrentan a algunos problemas que les impiden ser aceptados por la mayoría de las investigaciones [14].

Los elementos principales para la selección las actividades sensomotoras para el diseño de sistemas BCI son el ITR (Tabla 5) y el tiempo de entrenamiento requerido (Figura 15).

Señales Electrofisiológicas	Entrenamiento	ITR bits/min
Ritmos Sensomotores	SI	3-35
SCP	SI	5-12
P300	NO	20-25
SSVEP	NO	66-100

Tabla 5. Relación de las señales electrofisiológicas y su ITR

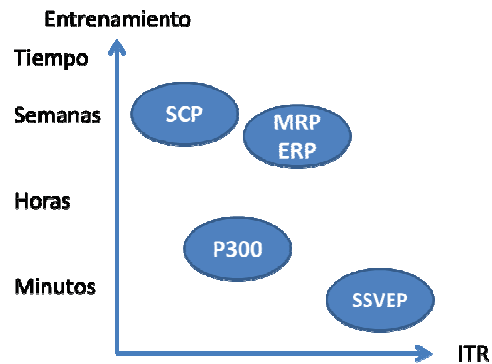


Figura 15. Comparativa general de los diferentes patrones de actividad cerebral con respecto al tiempo de entrenamiento y a su ITR.

Los sistemas BCI ofrecen a sus usuarios nuevos canales de comunicación y de control sin ninguna intervención de los nervios periféricos y los músculos. Por lo tanto, muchas investigaciones se centran en la creación de aplicaciones BCI, con la esperanza de que esta

tecnología pudiera ser útil para las personas con discapacidades motoras severas. El campo de las aplicaciones BCI se ha desarrollado gracias a los avances significativos en el campo de la BCI basado en EEG. Las señales de EEG son utilizadas por la mayoría de las aplicaciones BCI, ya que ofrecen una calidad de señal aceptable que combina un bajo costo y accesibilidad de uso. El desarrollo de aplicaciones BCI, permitirá el acceso a aplicaciones tecnológicas a personas con discapacidad parcial o total o para proyectos de especializados con base a la demanda del mercado [11].

Las principales poblaciones objetivo para las aplicaciones BCI se dividen en tres clases. El primer grupo CLIS (Complete Locked-In State) incluye a personas que han perdido todo el control motor, que se encuentran en fase terminal de Esclerosis Lateral Amiotrófica (ALS) o sufren de parálisis cerebral severa. El segundo grupo LIS (Locked-In State) comprende a personas que están casi completamente paralizadas pero con el movimiento voluntario residual, como el movimiento de los ojos, parpadeo de los ojos o contracciones nerviosas con el labio. El tercer grupo de usuarios potenciales incluye personas con capacidades sanas y los que tienen el control neuromuscular, sobre todo de habla y/o control de la mano. Los sistemas BCI tienen poco que ofrecer al tercer grupo, ya que puede enviar la misma información mucho más rápida y fácilmente a través de otras interfaces [11].

A pesar de esto, los sistemas BCI se utilizan cada vez más por personas sanas en *neuromarketing* y en los videojuegos como una herramienta para revelar la información afectiva de los usuarios, que no pueden ser reportados tan fácilmente a través de interfaces convencionales. Del mismo modo los sistemas BCI se pueden utilizar para algunas personas que sufren de trastornos neurológicos como la esquizofrenia o la depresión. El nivel de deterioro de la población objetivo potencial está relacionado con el rendimiento de un sistema BCI. Kübler, A. and Birbaumer, N. (2008) informaron de una fuerte correlación entre el deterioro físico y el rendimiento BCI. Personas con CLIS no pudieron controlar un sistema BCI.

La regulación cerebral de contribuciones voluntarias para la comunicación sólo es posible en pacientes LIS. Sin embargo, teniendo en cuenta sólo los pacientes LIS, esta relación entre

deterioro físico y el rendimiento BCI desaparecieron [11] (Figura 16).

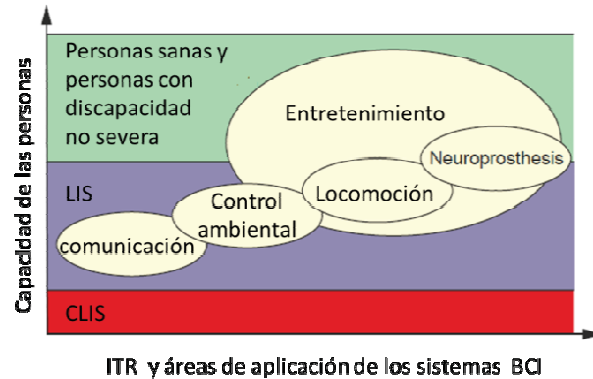


Figura 16. Relación entre las áreas de aplicación de los sistemas BCI, y la capacidad de las personas. Eje horizontal: la taza de transferencia de información podría estar en relación con el control de las aplicaciones. Eje Vertical: grado de discapacidad de las personas.

Independientemente del grupo de personas objetivos, el desarrollo de aplicaciones tiende a centrarse en aquellas que requieren menor tiempo en la interpretación de la intención de la persona y la ejecución del sistema de control (aplicaciones en tiempo real). Por ello se requieren sistemas BCI más rápidos, con una tasa de error menor y de un desempeño más eficiente.

5. Conclusiones

Los sistemas BCI es una tecnología que permite controlar dispositivos electrónicos y/o mecánicos por medio de las señales eléctricas generadas por el cerebro las cuales pueden ser detectadas, identificadas y medidas por equipos especializados para posteriormente manipularlas desde el exterior. Los sistemas BCI ofrecen a sus usuarios nuevos canales de comunicación y de control sin ninguna intervención de los nervios periféricos y los músculos. Por lo tanto, muchas investigaciones se centran en la creación de aplicaciones BCI, con la esperanza de que esta tecnología pudiera ser útil para las personas con discapacidades motoras severas. El desarrollo de aplicaciones BCI, permitirá el acceso a aplicaciones tecnológicas a personas con discapacidad parcial o total o para proyectos de especializados con base a la demanda del mercado.

El reto de los sistemas BCI se centra en el desarrollo de aplicaciones que requieren menor tiempo en la interpretación de la intención de la persona y la ejecución del sistema de control. Por ello se requieren sistemas BCI más rápidos, con una tasa de error menor y de un desempeño más eficiente.

6. Referencias

- [1] Bashashati Ali (2007). *Towards Development of a 3-State Self-Paced Brain Computer Interface System*. Tesis Doctorado The University of British Columbia
- [2] Bashashati Ali, Fatoureh Mehrdad, Ward Rabab K. and Birch Gary E. (2007). *A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals*. Journal of Neural Engineering 4, R32–R57.
- [3] Cervantes, G. S., Martínez, N. H. M., & Pérez, M. A. R. *Interfaz Cerebro Computadora para el Posicionamiento de Un Robot Virtual*.
- [4] De la Torre Abaitua J. (2012). *Procesado de Señales EEG para un Interfaz Cerebro-Máquina (BCI)*. Tesis licenciatura Universidad Carlos III de Madrid, España.
- [5] Haider Hussein Alwasiti, Ishak Aris and Adznan Jantan (2010). *Brain Computer Interface Design and Applications: Challenges and Future*. World Applied Sciences Journal 11 (7) p.819-825.
- [6] Kuzovkin I. (2013). *Adaptive Interactive Learning: a Novel Approach to Training Brain-Computer Interface Systems*. Tesis (MCC) University of Tartu Faculty of Mathematics and Computer Science Institute of Computer Science
- [7] Long Jinyi, Li Yuanqing, Wang Hongtao, Yu Tianyou, Pan Jiahui, and Li Feng (2012). *Hybrid Brain Computer Interface to Control the Direction and Speed of a Simulated or Real Wheelchair*. Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 20, No. 5
- [8] Mason S. G. and Birch G. E. (2000). *A Brain-Controlled Switch for Asynchronous Control Applications*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 47, No. 10
- [9] Mason Steven G. and Birch Gary E. (2003). *A General Framework for Brain-Computer. Interface Design*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 11, No. 1
- [10] Millán J.d.R., Rupp R., Müller-Putz G.R., Murray-Smith R., Giugliemma C., Tangermann M., Vidaurre C., Cincotti F., Kübler, A., Leeb R., Neuper C., Müller K.R., and Mattia D. (2010). *Combining Brain-Computer Interfaces and Assistive Technologies: State-of-the-Art and Challenges* Frontiers in Neuroscience, Vol 4, pp.161.
- [11] Nicolas-Alonso L.F, and Gomez-Gil J. (2012). *Brain Computer Interfaces, a Review*. Sensors 12, p.1211-1279.
- [12] Pfurtscheller Gert, Allison Brendan Z., Brunner Clemens, Bauernfeind Gunther, Solis-Escalante Teodoro, Scherer Reinhold, Zander Thorsten O., Mueller-Putz Gernot, (2010). *The hybrid BCI*. Frontiers in Neuroscience.
- [13] Sanei S. and Chambers J. (2007). *EEG Signal Processing*. John Wiley & Sons, Ltd
- [14] Setare Amiri, Reza Fazel-Rezai, and Vahid Asadpour (2013). *A Review of Hybrid Brain-Computer Interface Systems*. Hindawi Publishing Corporation, Advances in Human-Computer Interaction., Article ID 187024
- [15] Schalk G. and J. Mellinger J. (2010). *A Practical Guide to Brain-Computer Interfacing with BCI2000*, Springer-Verlag London Limited
- [16] Wolpaw J.R., Birbaumer N., Heetderks W.J., McFarland D.J., Peckham P.H., Schalk G., Donchin E., Quatrano L.A., Robinson C.J., and Vaughan T.M. (2000). *Brain-Computer Interface Technology: A Review of the First International Meeting*. IEEE Transactions On Rehabilitation Engineering, Vol. 8, No. 2.

Aspectos Fundamentales del Control Inteligente

Gorrostieta-Hurtado Efen¹, Aguado-Behar Alberto.

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática¹
efrengorrostieta@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se presentan las características básicas de los sistemas de control inteligente, aplicado en diferentes configuraciones. Una de las disciplinas que ha desarrollado mucho en la última década es la inteligencia artificial, en la actualidad existe varias técnicas que permiten resolver diferentes aspectos de interés. En su foma mas sencilla las redes neuronales son los elementos que nos permite tener aprendizaje, el caso de los algoritmos genéticos nos permite realizar una optimización. Entonces estas características son utilizadas en el diseño de los sistemas de control. Uno de los sistemas más común es la de la lógica difusa.

Palabras clave: sistemas de control, redes neuronales, sistemas inteligente.

1. Introducción

Un Sistema de control es aquel que nos permite que un sistema específico tenga un comportamiento específico, previamente planeado y deseado a pesar de las distintas condiciones en las que se encuentre inmerso el sistema. Usualmente es importante conocer las características propias del sistema a controlar principalmente las condiciones de estabilidad, controlabilidad y observabilidad, dependiendo las técnicas de control que se desean trabajar.

En la caso de desarrollar un sistema de control inteligente, generalmente la ley de control utilizada por el sistema que se quiere controlar utiliza algunas de las técnicas de inteligencia artificial existente, el sustitución de técnicas matemáticas, las cuales por lo

regular quedan determinadas por el diseño y la implementación del controlador.

En general, el objetivo de un sistema de control automático es encontrar un dispositivo externo o un algoritmo al sistema dinámico a controlar para que nos proporcione una señal adecuada que influya en la salida del sistema y se consiga las características o el comportamiento deseado. En esta parte del algoritmo es donde tiene lugar el concepto de Control Inteligente, que es precisamente cuando se utiliza alguna técnica del ámbito de la Inteligencia Artificial. A continuación se enuncian las técnicas más utilizadas de la Inteligencia Artificial:

Control neuronal.

Control difuso.

Control neuro-difuso.

Anfis.

Algoritmos genéticos

SVMs

La aplicaciones de los sistemas inteligentes ha tenido una muy buena respuestas en esta área debido a que gracias a sus características de adaptabilidad podemos de cierta forma compensar muchas de las variables complejas que se presentan en cierto sistemas como por ejemplo la no linealidad del sistema, o la incertidumbre de los parámetros externos al sistema. En este sentido la aplicación en los sistemas mecatronicos son muy útiles.

Al realizar una investigación documental sobre el control inteligente y sus aplicaciones, se pudo determinar que existe una variedad considerable de algoritmos. De ellos, una cantidad considerable utiliza métodos basado en redes neuronales. Las redes neuronales constituyen una de las áreas de la

inteligencia artificial que ha despertado mayor interés en los últimos años lo que ha permitido un sin número de trabajos de investigación y aplicaciones. La razón de esta preferencia, posiblemente se deba a que las redes neuronales nos permiten resolver problemas complicados en donde la solución por otros métodos convencionales resulta extremadamente difícil, o simplemente no es posible. Las redes neuronales nacen como un intento por tratar de reproducir la actividad de las células nerviosas humanas, una de las cualidades más sobresaliente de las redes neuronales es que ellas son capaces de aprender con sus respectivas limitaciones. La forma de trabajar con uno de estos tipos es presentarle una serie de ejemplos, a partir de los cuales ella aprende las relaciones principales que están implícitas en la base de datos de entrenamiento.

De forma general, y procurando ser lo más descriptivo posible, las aplicaciones de las redes neuronales en los sistemas de control las podemos agrupar en dos tipos: métodos indirectos y métodos directos.

Los métodos indirectos son aquellos en los que se requiere generalmente una identificación del proceso a controlar utilizando un modelo neuronal, el cual sirve entonces como base para calcular los parámetros del controlador. La identificación del modelo se puede hacer fuera de línea, en línea o combinando las dos estrategias. El camino que nos permite dicha identificación, nos lleva a diseñar un experimento de identificación o entrenamiento del modelo neuronal, utilizando señales de prueba adecuadas y a partir de determinado momento, cuando los errores de predicción del modelo se encuentran por debajo de determinado límite, se comienza a controlar en lazo cerrado [1]. Aquí de nuevo surgen dos alternativas, se continúa el entrenamiento en lazo cerrado tratándose entonces de un esquema adaptativo, o se detiene éste y estamos entonces en el caso de un controlador con parámetros constantes.

La experiencia muestra que la primera de las dos alternativas resulta mejor en la mayoría de los casos, pero desde luego, exige un volumen de cálculo considerablemente mayor, que puede ser inadmisibles en tiempo real si se trata de una red de dimensiones grandes.

Por otra parte, los métodos directos de control basados en redes neuronales obvian la etapa intermedia de identificar un modelo y se orientan en ajustar directamente los parámetros del controlador neuronal, es decir, los coeficientes de peso de las

conexiones de la red, a partir del comportamiento que muestra el error de regulación.

2. Control simple mediante el modelo inverso

El modelo neuronal inverso puede utilizarse ventajosamente para realizar un tipo de controlador muy simple como el que mostramos a continuación tomado del trabajo de [2]. Este controlador, aunque se basa en un razonamiento heurístico ha demostrado ser efectivo en varias aplicaciones, tal como se reporta en el trabajo citado.

La idea básica consiste en entrenar un modelo neuronal inverso de tres capas, con la estructura:

$$u(k-d) = H(u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-m), y(k-d), y(k-d-1), \dots, y(k-d-m), y(k)) \quad (1)$$

donde d es el retardo puro en el sistema y m, n determinan el orden supuesto del proceso dinámico a controlar.

La composición de los vectores de entrada y salida para la red inversa en la etapa de entrenamiento es la siguiente:

$$X_s = \left[\begin{array}{c} (u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-m), y(k-d), y(k-d-1), \dots) \\ y(k-d-m), y(k) \end{array} \right] \quad (2)$$

$$Y_s = u(k-d) \quad (3)$$

En la fase de control, se utilizan entonces los siguientes vectores:

$$X_c = \left[(u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n), y(k), y(k-1), \dots, y(k-n), y_c(k-d)) \right] \quad (4)$$

$$Y_c = u(k) \quad (5)$$

Nótese que en la fase de entrenamiento se supone que el control en cada etapa de tiempo deberá ser una función de la historia pasada de las entradas y salidas así como del estado actual del proceso caracterizado por la salida en la etapa k .

En la fase de control se sustituyen los valores futuros de la salida del proceso, por valores futuros o predicciones del valor deseado o referencia. En muchos casos prácticos es posible considerar valores pequeños para m y n , por ejemplo, $m=1$ y $n=2$, tal como se ejemplifica en el trabajo citado de [2]. En este caso el vector de entrada se reduce a:

$$X_e = [u(k-1), y(k-1), y(k), y_d(k+d)] \quad (6)$$

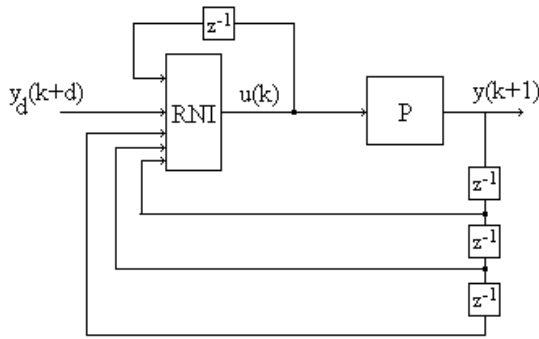


Figura 1 Control Inverso Neuronal.

3. Controlador basado en el Modelo Interno.

En la figura se muestra la estructura conocida como Controlador de Modelo Interno ampliamente divulgada durante los años 80.

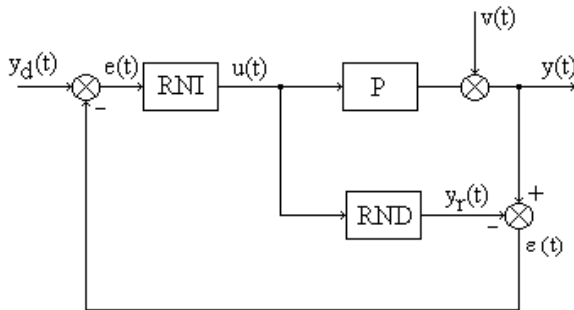


Figura 2 Control Basado en Modelo

Introduciendo determinadas suposiciones, el esquema dado en la figura 8.8 tendrá un comportamiento superior al simple controlador en lazo abierto, sobre todo teniendo en cuenta su relativa inmunidad a las perturbaciones que afectan a la salida, representadas por la variable $v(t)$, como veremos a continuación.

Sean $g(u)$ y $g^{-1}(y)$ las funciones generadas por el modelo neuronal directo y el inverso, respectivamente. La salida del proceso P viene dada por:

donde $f(\cdot)$ es una función no-lineal que se supone inversible. Tenemos que:

$$u(t) = g^{-1}(e(t)) \quad (7)$$

donde:

$$e(t) = y_d(t) - \varepsilon(t) \quad (8)$$

y también:

$$\varepsilon(t) = y(t) - y_r(t) \quad (9)$$

donde $y_r(t)$ es la salida de la RND, es decir:

$$y_r(t) = g(u(t)) \quad (10)$$

4. Controlador neuronal combinado con un PID

En este epígrafe se propone un esquema de control que combina el uso de una red neuronal inversa con un regulador PID auto-ajutable que se encarga de llevar el error estacionario a cero. La salida de cada regulador está afectada por un coeficiente de peso que permite determinar para cada caso concreto las proporciones en que actúan el regulador neuronal y el regulador PID.

Numerosas simulaciones realizadas con este esquema ilustran sus posibilidades prácticas en procesos fuertemente no lineales. En todos los casos se hace evidente que el regulador neuronal asume la tarea principal de acercar rápidamente la salida del proceso al valor de referencia, compensando al mismo tiempo las no linealidades del proceso. El regulador PID auto-ajutable se encarga entonces de llevar a cero el error estacionario.

Posteriormente, se analiza la forma en que deben seleccionarse los coeficientes de peso respectivos, así como un parámetro del PID auto-ajutable que permite establecer el compromiso requerido entre velocidad de respuesta y sobre-cresta en el proceso de regulación.

En la figura 3 se muestra la estructura del esquema de control que se propone. Como puede apreciarse, en el mismo aparecen una Red Neuronal Inversa (RNI) y un PID auto-ajutable actuando en paralelo. Las salidas de ambos son afectadas por los coeficientes kn

y k_p respectivamente, los cuales deben ajustarse experimentalmente. Hemos comprobado, no obstante, que en la mayoría de los casos k_p puede hacerse igual a 1. Por otra parte, k_n debe seleccionarse utilizando el criterio de que la salida del proceso controlado se mantenga siempre por debajo del valor de referencia, cuando el regulador neuronal actúa sólo, es decir, para $k_p=0$. A continuación describiremos en detalle algunas características de la RNI y del PID autoajutable

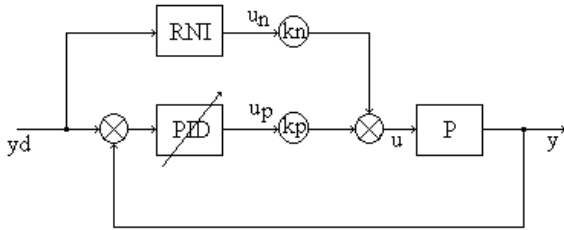


Figura 3 Control PID Neuronal.

5. Control neuronal a partir del conocimiento a priori de la estructura del sistema a controlar

La idea de utilizar las redes neuronales en el control de sistemas se basa en que estas constituyen un aproximador universal de prácticamente cualquier modelo no-lineal. No obstante, si se dispone de algún conocimiento a priori, al menos de la estructura del modelo que describe al sistema a controlar, esta información puede ser utilizada ventajosamente para lograr controladores neuronales con un buen desempeño, que puedan presentar ventajas en cuanto a los requerimientos del entrenamiento previo. En la discusión que sigue, nos basamos fundamentalmente en los resultados de [3].

Consideremos como una muestra, un proceso que se describe mediante la expresión:

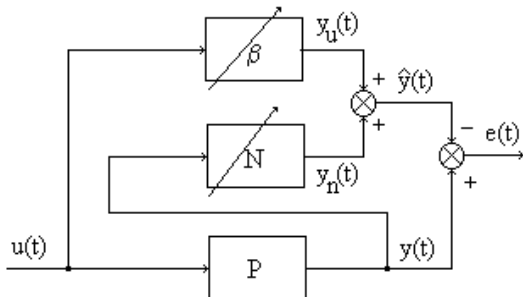


Figura 4 Sistema de control neuronal a Priori

6. Conclusiones

En las aplicaciones de sistemas de control las técnicas convencionales de inteligencia artificial han resultado ser un medio adecuado para controlar sistemas altamente no lineales. Sin embargo, existen áreas del conocimiento que muestran interesantes retos para desarrollar nuevas alternativas de identificación de procesos. Buena parte de dichas aplicaciones están ampliamente relacionadas con el desarrollo de controladores para sistemas robóticos y máquinas especiales. Por otro lado, se sabe que las aplicaciones de sistemas de control de tipo híbrido, por ejemplo: neuro fuzzy, neuro genético y otros, han demostrado nuevas y novedosas posibilidades de control de sistemas sumamente complejos. Queda abierta la posibilidad que en los siguientes años veamos nuevos esquemas de control con una mayor integración de técnicas como las descritas en este trabajo.

Referencias

- [1] Alberto Aguado Behar, Temas selectos de Control, Instituto de Cibernética, Matemáticas y Física, Cuba 2000.
- [2] Diron J.L Cabassud M, Le Lanin M.V, Casamtta G, Design of a Neural Controller by inverse Modelling Computer Chemical Engineering, Vol 19, pp 797-802, 1995.
- [3] Narendra K.S Parthasaraty K, Identifications and Control of dynamical Systems using Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 1 (1), pp 4-27, 1990.

Desarrollo de Proyectos Mecatrónicos

Vargas-Soto J.E., Pedraza-Ortega J.C., Ramos-Arreguín J.M., López-Vallejo Lilia

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática
emilio@mecatronica.net

Resumen

El presente trabajo presenta una propuesta asociada a la administración de proyectos en el área de ingeniería mecatrónica, la cual es presentada como un proceso de información y estrategia para dirigir cualquier sistema o negocio en su lucha por la sobrevivencia, la reproducción y la convivencia [1]. Se efectúa una reflexión sobre el proceso de enseñanza tradicional de proyectos de ingeniería en el área de sistemas electromecánicos. Es una realidad que bajo la sombra de cualquier producto existen líneas de producción y tecnología que los ingenieros diseñan para hacer posible dichos productos, desde el concepto hasta el mercado. Especial mención se refiere al enfoque multidisciplinario llamado "Mecatrónica". Los ingenieros mecatrónicos son educados para aplicar métodos y tecnología desde un punto de vista integral, utilizando la ingeniería mecánica, la electrónica y los sistemas computacionales. Un ingeniero con una visión integral y experiencia estará en muy buenas condiciones para desarrollar soluciones originales con una buena perspectiva para hacer nuevos negocios [2].

Palabras clave: Mecatrónica, manufactura.

1. Introducción

Hoy en día, es fundamental que las empresas muestran una dinámica a los cambios del mercado, lo que les permite asegurar clientes y por consiguiente su propia existencia. Esta situación se presenta en el contexto local, regional, nacional e internacional. Para responder a dichos cambios, sin duda existen diferentes factores que tienen grados de influencia en las decisiones que permiten a las empresas adecuarse a las nuevas condiciones del mercado, no es nuestro interés profundizar en un análisis extenso de dichos factores, pero si destacar algunos de ellos que tienen

una relación directa con la operación de los recursos que posibilitan la creación de productos con alto valor tecnológico a corto plazo.

Tomando en cuenta que los productos son conceptualizados, diseñados, construidos y probados por personas, es importante efectuar una reflexión sobre el proceso de enseñanza tradicional de la ingeniería mecatrónica, la electrónica y los sistemas computacionales. El capital humano que tiene una formación tecnológica, pero además con una visión que le permita analizar nuevas posibilidades de uso de las máquinas y/o procesos, sin duda estará en una posición favorable para desarrollar soluciones originales y una amplia posibilidad de hacer nuevos negocios.

Como complemento a estos conocimientos, en ocasiones los estudiantes de carreras tecnológicas reciben también clases de algunas disciplinas de áreas diferentes a la Ingeniería como: humanidades, administración o filosofía. No obstante, la integración de dichas asignaturas dentro de su ejercicio profesional en ocasiones no están del todo asimilada por los estudiantes, quienes por su inexperiencia y falta de juicio profesional aún no desarrollado desmeritan los contenidos de dichas asignaturas. El resultado bajo este enfoque de enseñanza es un egresado con un gran conocimiento técnico pero con escasa sensibilidad para administrar de forma exitosa un proyecto de corte tecnológico. De aquí la importancia de este trabajo, que intenta también proponer un nuevo enfoque en la enseñanza de la ingeniería mecatrónica.

2. Aspectos de docencia tradicional.

Si analizamos la enseñanza de la ingeniería en las últimas dos décadas, debemos referirnos a los programas académicos tradicionales, los cuales están basados esencialmente en la enseñanza de la ingeniería bajo un proceso secuencial. Durante los primeros años, los estudiantes aprenden acerca de las matemáticas, la física, la electricidad, electrónica y algunos tópicos relacionados con su programa

específico de ingeniería. En los siguientes años, desarrollan cursos sobre diseño, manufactura o producción como base de su educación. Al final, algunas asignaturas de tipo integrador son desarrolladas por el estudiante: proyectos, pruebas, control, administración, entre otras. En donde se pretenden lograr habilidades que le serán de utilidad en su trabajo futuro. El resultado es un profesional con un limitado enfoque para visualizar oportunidades, y soluciones tecnológicas en términos interdisciplinarios [3]. En la última década, algunas Universidades han reportado cambios en su proceso educativo. Algunos de estos cambios incluyen experimentación, proyectos académicos e investigaciones de tipo industrial, así como participación en competencias, entre otras. El objetivo de estas acciones fue mejorar la educación de los estudiantes con la clara idea de que los estudiantes “pongan las manos” en la realización de proyectos reales y útiles [4], [5] y [6].

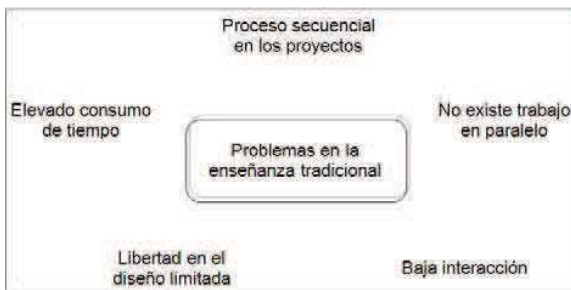


Fig 1. Algunos problemas en la enseñanza tradicional de la Ingeniería Mecatrónica.

3. Propuesta a la Enseñanza de la Administración de Proyectos

Primeramente se introduce el concepto de saga. La Real Académica de la Lengua Española define saga como un relato novelesco que abarca las vicisitudes de dos o más generaciones de una familia [7]. En este artículo se aprovechará este concepto y se redefinirá que una saga es un relato de un fenómeno que abarca los sucesos de sus componentes y los muestra de forma secuencial para facilitar la administración de un proyecto de tipo mecatrónico. En algunos fenómenos la saga funciona en ciclos: el estado de tensión crece, toca el clímax (del suceso), decrece, entra en recesión, cambia de dirección, avanza, retrocede, se desliza, explota [1]. La Fig. 2 ilustra el comportamiento de la saga para lograr objetivos estratégicos, con base el lograr objetivos específicos en un periodo de tiempo determinado.

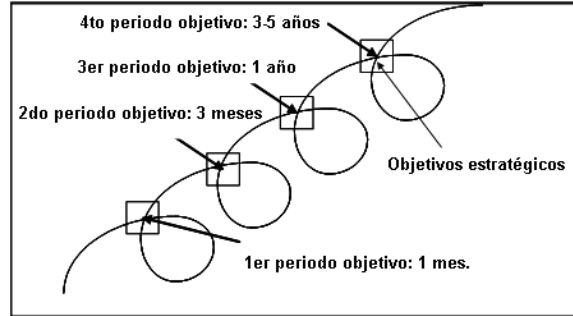


Fig. 2. Representación gráfica de la saga

Bajo este enfoque, los autores proponen una representación gráfica que permita enseñar a estudiantes de ingeniería la forma en cómo se puede administrar un proyecto de ingeniería mecatrónica, propiciando la consecución de objetivos específicos de tal forma que facilite su comprensión y aplicación de manera práctica. La Fig. 3 muestra las sagas que se proponen en este trabajo para lograr la administración del proyecto mecatrónico. La saga 1 se refiere al Tema, esto es el asunto de análisis que da origen al proyecto mecatrónico. La saga 2. Se refiere a la colecta de datos, es decir: el proceso de levantamiento de datos del fenómeno a estudiar. La saga 3, denominada Procesamiento de información, se orienta principalmente al tratamiento de los datos mediante técnicas y métodos que los organicen y presenten – a los mismos datos o los resultados de operarlos – de manera útil y comprensible. La saga 4, denominada: Diagnóstico, tiene como propósito emitir una calificación del fenómeno analizado a través de la información generada. La saga 5, llamada: Alternativas de solución, es un proceso creativo de; a) Definición de criterios de selección y la escala de evaluación de cada uno de dichos criterios, y b) Propuesta de diferentes alternativas que satisfagan la posible necesidad generada por el fenómeno. La saga 6, denominada: Decisión, se orienta en lograr una calificación de cada alternativa con base en los criterios y las escalas definidas para su comparación y la elección de aquella alternativa que sea encontrada como la más conveniente. La saga 7, llamada: Planeación, es un proceso mediante el que se desarrolla la estrategia a seguir para lograr la visión propuesta por la alternativa seleccionada. La saga 8, definida como: Implementación y administración, se refiere a la ejecución del plan definido para realizar el proyecto. La saga 9, denominada: Supervisión, se enfoca a la verificación del logro de los hitos establecidos en el plan mediante la medición del logro de la estrategia y la identificación y definición de las posibles desviaciones encontradas. Finalmente la saga 10, llamada: Retroalimentación, no es otra cosa sino en análisis de la información del avance y logro de la

estrategia y sus desviaciones, a fin de dar inicio a un nuevo ciclo.



Fig.3. Representación gráfica de la saga para Administrar Proyectos de tipo Mecatrónico

4. Metodología de Desarrollo.

Como parte del conocimiento necesario para administrar las actividades asociadas al desarrollo de proyectos mecatrónicos, en este trabajo se presenta una metodología que los autores han utilizado con éxito para gestionar las actividades de desarrollo de proyectos de éste tipo. Esto ha permitido lograr reducciones considerables de tiempo de desarrollo del proyecto, así como facilitar la interacción entre los participantes del trabajo. El método utilizado se ha aplicado anteriormente para desarrollar las máquinas industriales, así como diversos proyecto de investigación [8], [9] y [10]. Sin embargo, por la naturaleza de los proyectos industriales, estos presentan características diferentes a proyectos académicos, principalmente en tiempo y aplicación.

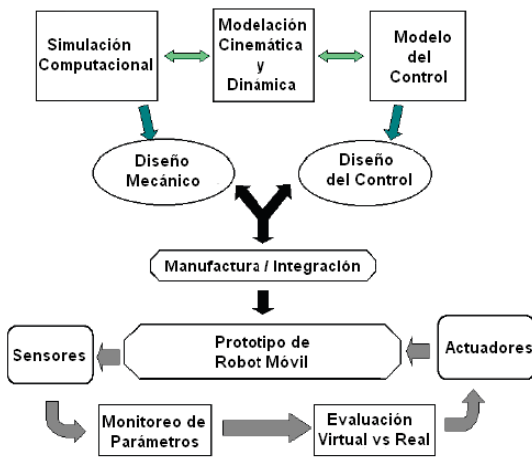


Fig. 4. Mapa conceptual del proceso de desarrollo del proyecto mecatrónico.

El proyecto industrial requiere una interacción rápida y dinámica orientada para reducir el tiempo del proyecto y para conseguir resultados inmediatos. La Fig. 4 demuestra un mapa conceptual del método utilizado.

Una vez conceptualizado el diseño del prototipo, se recomienda dividir actividades por grupos de trabajo. Dependiendo del tipo de proyecto, perfil de participantes del proyecto y número de integrantes se podrán formar tantos equipos como se requiera. Sin embargo, se recomienda la formación de un equipo dedicado a la modelación y simulación de las ecuaciones matemáticas del sistema a desarrollar, otro equipo para realizar el diseño mecánico y otro equipo para realizar el diseño del sistema de control.

Como se podrá observar de la Fig. 4, el método consiste primero en determinar las ecuaciones de la física que modelan el comportamiento cinemático de estructura del robot o máquina mecatrónica, a fin de evaluar la disposición y sus dimensiones. El modelo de la cinemática una vez obtenido, pasa a ser evaluado en simulación a fin de asegurar su definición. De esta forma se evalúan los parámetros cinemáticos y las dimensiones del robot mediante simulación computacional. De esta forma se determinan las características funcionales y dimensionales del prototipo. El paso siguiente de esta metodología consiste para en diseñar y construir los sistemas que componen al robot. En esta parte, por lo general, es posible también realizar el diseño del control. Durante la fabricación y ensamble se determinan principalmente la necesidad de efectuar algunos cambios en los diseños originales, por lo que es común modificar algunos parámetros y dimensiones de los componentes del prototipo de robot o máquina mecatrónica. Dichos cambios pueden ser ocasionado, entre otros factores por las características de los materiales utilizados, las condiciones de trabajo, la fricción o condiciones inerciales no consideradas en el modelo. Se recomienda, para mejorar los modelos físicos analizar dichos cambios mediante simulación computacional con programas especializados. Así mismo, es importante documentar cualquier cambio en el prototipo.

Una vez lograda la primera versión del prototipo de robot el paso siguiente de la metodología consiste en evaluar el comportamiento real del robot y comparar su funcionamiento con los modelos matemáticos. Esta última tarea tiene como finalidad modificar y mejorar los modelos usados para diseñar el robot y de esta forma conseguir un mejor entendimiento del comportamiento real que presentan este tipo de máquinas.

5. Propuesta de Cambios en Programas Académicos.

El incremento impacto de la tecnología y la dinámica del mercado global nos muestra una gran oportunidad para incorporar nuevas estrategias de enseñanza en los programas académicos de Ingeniería Mecatrónica o carreras afines a Robótica. La interacción sinérgica entre varias disciplinas de la Ingeniería son necesarias para encontrar la técnica con los cambios tecnológicos que se presentan en el futuro. En este contexto, merece especial consideración la “Mecatrónica”, ya que su fundamento se basa en la combinación sinérgica de la ingeniería mecánica, la electrónica y los sistemas computacionales. Por otra parte, recientemente una educación con visión integral que provee habilidades de negocios a estudiantes de ingeniería ha mostrado buenos resultados en corto tiempo. En esta nueva forma de enseñanza, estudiantes y profesores crean nuevos potenciales negocios con la intención de colocar en el mercado nuevos productos con valor tecnológico. Pocas Universidades en el mundo han adoptado esta nueva estrategia en sus procesos educativos [11] y [12].

La renovación de los programas académicos de ingeniería en la Universidad Anáhuac México Sur ha adoptado este enfoque a partir de los últimos dos años. Específicamente el programa de Ingeniería Mecatrónica ha sido renovado tomando en cuenta un importante componente de enseñanza hacia la administración de proyectos de ingeniería, sin olvidar los aspectos técnicos de la profesión. Así mismo se han considerado asignaturas asociadas con la formación humana y ética del ingeniero, como un elemento fundamental que todo profesionista debe aprender.



Fig. 5. Modelo educativo de visión integral.

La Fig. 5 muestra de forma esquemática los aspectos de enseñanza que el ingeniero mecatrónico se encuentra desarrollando bajo este enfoque integrador.

La visión de enseñar ingeniería mecatrónica considerando una formación interdisciplinaria no es una nueva idea.

Existen diferentes Universidades que han desarrollado métodos didácticos con buenos resultados [13] y [14]. La Ingeniería Mecatrónica presenta excelentes condiciones para propiciar en los estudiantes el desarrollo de habilidades de diseño, control, manufactura y negocios. Los robots son un ejemplo esencial como máquinas mecatrónicas, pero también pueden ser procesos industriales altamente automatizados, o incluso un servicio puede ser considerado como un producto mecatrónico. En los últimos tres años, se han desarrollado diversos proyectos de corte mecatrónico por alumnos que anteriormente no habían sido formados con esta metodología, ni tampoco habían desarrollado cursos en donde se les enseñaran algunas áreas del conocimiento como:

- Requerimientos del Mercado
- Desarrollo de producción
- Administración de proyectos
- Cadena de suministros
- Valores humanos y éticos
- Financiamiento de proyectos

La idea ha sido desarrollar proyectos con un claro enfoque hacia lograr beneficios reales. Los proyectos de la vida real inducen a los estudiantes a formular y resolver problemas en equipo, a diseñar estrategias de solución y pulir una visión de comercialización de sus proyectos.

5. Resultados.

Diversos proyectos de tipo académico que han sido realizados siguiendo las metodologías aquí expuestas. Tanto a nivel licenciatura como postgrado. Durante los últimos tres años se ha notado un desarrollo creciente de los estudiantes. Sobre todo la interacción de alumnos de semestres avanzados de licenciatura con alumnos de los primeros semestres fomenta el desarrollo del juicio profesional y la concesión de una seriedad en el trabajo profesional. Algunos de los trabajos han sido presentados en congresos nacionales e internacionales por los propios alumnos, lo que les motiva para lograr una formación más completa que les permita afrontar con éxito su desarrollo profesional.

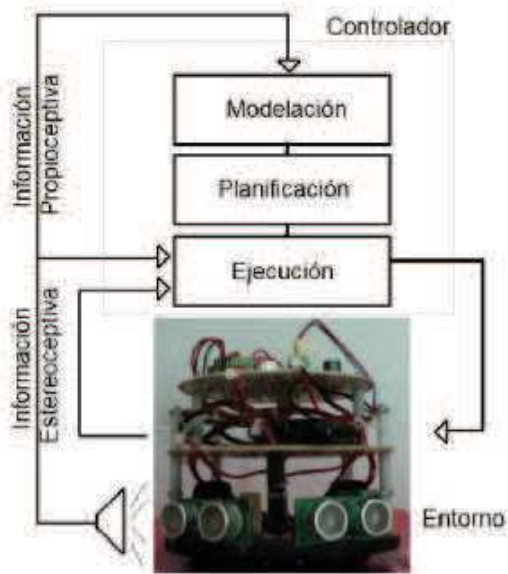


Fig. 6. Sistema híbrido de control inteligente aplicado a un robot móvil [15].

7. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una propuesta que permita la Administración de proyectos de tipo electrónico basado en sagas. Así mismo mostrado una metodología que facilita el desarrollo de proyectos mecatrónicos. Se ha realizado una reflexión sobre la enseñanza de la ingeniería mecatrónica, y se ha propuesto un modelo educativo considerando tres pilares considerados esenciales: a) Aprendizaje Técnico; b) Aprendizaje del mercado y c) Aprendizaje emprendedor. Finalmente, se han comentado los resultados obtenidos y se ilustrado algunos proyectos realizados en los últimos dos años.

REFERENCES

[1] De Gregori Waldemart, "Capital Intelectual" Ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
[2] Vargas-Soto E. , "Teaching Mechatronics with Real Projects and Integral Vision", Clute Institute for Academic Research, Proc. of the Teaching and Learning Conference, ISSN 1539-8757, Salzburg, Austria, Junio 23-26, 2008.
[3] Ann Greeneval, "Olin Collegue Back Traditional Engineering Education", Boston Business Journal, January 24, 2003.
[4] Sylvie Ursulet and Denis Gillet, "Introducing flexibility in traditional engineering education by providing dedicated on-line experimentation and tutoring resources", International Conference on Engineering Education 2002.
[5] Gillet, D., Latchman, H.A., Salzmann, Ch. and Crisalle, O.D., "Hands-On Laboratory

Experiments in Flexible and Distance Learning", Journal of Engineering Education, 2001.

- [6] Drews, P., and Starke, G , "Welding in the Century of Information Technology", Welding World. Vol. 34, 1994.
[7] <http://www.rae.es/rae.html> (28/10/2008). Real Academia Española.
[8] Vargas E., Reynoso G., Villarreal L, Mier R., "Diseño de un Robot Industrial para Aplicaciones de Limpieza en Subestaciones Eléctricas", Memorias del 3er. Congreso Mexicano de Robótica, Asociación Mexicana de Robótica. Septiembre 2001, Querétaro.
[9] Gorrostieta E., y Vargas E. , "Locomoción Libre para un Robot de Seis Patas", 3er. WSEAS Conferencia internacional sobre el proceso de señal, la robótica y la automatización, ISPRA 2004, ISBN 960-8052-95-5, del 13 al 15 de febrero, Salzburg, Austria. 2004.
[10] Vargas E, Rodríguez W., "Diseño de Mecatrónico de una máquina automática para manipular la hoja de la cartulina", Memorias del International Congress on Mechatronics and Robotics, MECH&ROB 2004, IEEE, Centro Europeo de Mechatronica, ISBN 3-938153-30-X, Del 13 al 15 de septiembre de 2004, Alemania.
[11] Sankai, Y. , "Leading Edge of Cybernics: Robot Suit HAL", SICEICASE, 2006. International Joint Conference Volume , Issue , 2006.
[12] "MIT Media Laboratory. inventing a better future", The Media Lab at a Glance, <http://www.media.mit.edu> , 2008.
[13] D.R. Woods, J.E. Stice, and A. Rugarcia, "The Future of Engineering Education: II. Teaching Methods that Work", Felder, R.M., Chemical Engineering Education. 2000.
[14] Eric Asa, "Incorporating a Real World Project into an Engineering Course", 9th International Conference on Engineering Education, 2006.
[15] Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo, Marco Antonio González Aguirre, Artemio Sotomayor Olmedo, Efrén Gorrostieta Hurtado, Jesús Carlos Pedraza Ortega, José Emilio Vargas Soto and Saúl Tovar Arriaga, "Desarrollo de un Sistema de Navegación para Robots Móviles Mediante Diferentes Patrones de Comportamientos", VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2010) , IEEE sección Morelos, pp. 407-312. ISBN: 978-607-95255-2-1, Noviembre 24-26, 2010. Cuernavaca Morelos, México.

Memorias del VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

José Emilio Vargas Soto

ISBN: 978-607-95347-9-0

