

Advances in Control and Intelligent Agents

Research in Computing Science

Series Editorial Board

Editors-in-Chief:

Grigori Sidorov (Mexico)
Gerhard Ritter (USA)
Jean Serra (France)
Ulises Cortés (Spain)

Associate Editors:

Jesús Angulo (France)
Jihad El-Sana (Israel)
Alexander Gelbukh (Mexico)
Ioannis Kakadiaris (USA)
Petros Maragos (Greece)
Julian Padget (UK)
Mateo Valero (Spain)

Editorial Coordination:

Alejandra Ramos Porras

Research in Computing Science es una publicación trimestral, de circulación internacional, editada por el Centro de Investigación en Computación del IPN, para dar a conocer los avances de investigación científica y desarrollo tecnológico de la comunidad científica internacional. **Volumen 135**, noviembre 2017. Tiraje: 500 ejemplares. *Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título* No. : 04-2005-121611550100-102, expedido por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. *Certificado de Licitud de Título* No. 12897, *Certificado de licitud de Contenido* No. 10470, expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de sus respectivos autores. Queda prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio, sin el permiso expreso del editor, excepto para uso personal o de estudio haciendo cita explícita en la primera página de cada documento. Impreso en la Ciudad de México, en los Talleres Gráficos del IPN – Dirección de Publicaciones, Tres Guerras 27, Centro Histórico, México, D.F. Distribuida por el Centro de Investigación en Computación, Av. Juan de Dios Bátiz S/N, Esq. Av. Miguel Othón de Mendizábal, Col. Nueva Industrial Vallejo, C.P. 07738, México, D.F. Tel. 57 29 60 00, ext. 56571.

Editor responsable: *Grigori Sidorov, RFC SIGR651028L69*

Research in Computing Science is published by the Center for Computing Research of IPN. **Volume 135**, November 2017. Printing 500. The authors are responsible for the contents of their articles. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without prior permission of Centre for Computing Research. Printed in Mexico City, in the IPN Graphic Workshop – Publication Office.

Volume 135

Advances in Control and Intelligent Agents

Hiram Eredin Ponce Espinosa (ed.)



Instituto Politécnico Nacional
“La Técnica al Servicio de la Patria”



Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación
México 2017

ISSN: 1870-4069

Copyright © Instituto Politécnico Nacional 2017

Instituto Politécnico Nacional (IPN)
Centro de Investigación en Computación (CIC)
Av. Juan de Dios Bátiz s/n esq. M. Othón de Mendizábal
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, Zacatenco
07738, México D.F., México

<http://www.rcs.cic.ipn.mx>

<http://www.ipn.mx>

<http://www.cic.ipn.mx>

The editors and the publisher of this journal have made their best effort in preparing this special issue, but make no warranty of any kind, expressed or implied, with regard to the information contained in this volume.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored on a retrieval system or transmitted, in any form or by any means, including electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without prior permission of the Instituto Politécnico Nacional, except for personal or classroom use provided that copies bear the full citation notice provided on the first page of each paper.

Indexed in LATINDEX, DBLP and Periodica

Printing: 500

Printed in Mexico

Editorial

Este volumen de la revista “Research in Computing Science” contiene artículos relacionados a temas de control y agentes inteligentes. Los trabajos extendidos fueron cuidadosamente seleccionados por el comité editorial y revisados por lo menos por dos revisores externos considerando su originalidad científica y la calidad técnica.

El volumen contiene 15 artículos que abordan varios aspectos de los sistemas de control, así como de agentes inteligentes. Por una parte, los sistemas basados en agentes inteligentes han permitido un mayor número de procesos automatizados. Particularmente en este volumen, se trata el estado del arte de los sistemas de recomendación asociados con tareas de búsqueda y recuperación de información; así como agentes estadísticos aplicados a sistemas *e-learning* para recomendaciones eficientes a estudiantes. En este mismo sentido, otro trabajo incluido utiliza los agentes inteligentes para la clasificación de los diferentes tipos de aprendizaje mediante el empleo de modelos de inferencia difusa.

Por otra parte, el volumen incluye trabajos relacionados con el diseño e implementación de sistemas de control inteligente. Entre los artículos publicados en este número se presentan investigaciones sobre el diseño de controladores basados en sistemas inmunes artificiales aplicados al agarre de objetos en robótica, un sistema de seguimiento de personas automático por medio de robots aéreos no tripulados, el uso de controladores de rechazo activo de perturbaciones para el desempeño de tareas de equilibrio en robots humanoides, así como métodos de navegación en robots humanoides usando redes de Petri y lógica difusa. Los sistemas de control inteligente también son aplicados en técnicas de integración domótica, así como en invernaderos hidropónicos; mientras que se emplean técnicas de visión por computadora en robótica móvil. Desde el punto de vista de análisis y diseño, se incluyen artículos sobre estudios de pérdidas en semiconductores por control difuso de velocidad en motores, se comparan diferentes estrategias de controladores clásicos, no lineales e inteligentes para el problema de regularización; se describen reguladores-estabilizadores implementados mediante controladores neuro-difusos en multi-máquinas y se aplican controladores PID mediante algoritmos genéticos en la regulación de voltaje en sistemas multicélulas. Finalmente, se incluye un trabajo sobre ecuaciones inversas de filtros para la reconstrucción perfecta, que son útiles en técnicas empleadas en los sistemas de control, entre otros.

El proceso de revisión y selección de artículos se llevó a cabo usando el sistema libremente disponible EasyChair (www.easychair.org).

Hiram Ponce
Editor Invitado
Universidad Panamericana, México
Noviembre 2017

Table of Contents

	Page
Aplicación web e-learning multiplataforma para recolección de datos de usuarios y retroalimentación automática basada en técnicas estadísticas	9
<i>Samuel Montiel Santos, Luis Ángel Reyes Hernández, Asdrúbal López-Chau, Beatriz Alejandra Olivares Zepahua, Celia Romero Torres</i>	
Estado del arte en los sistemas de recomendación	25
<i>Oscar Escamilla González, Sergio Marcellin Jacques</i>	
Modelo de inferencia difuso para clasificación de estilos de aprendizaje con base en el Test de Honey-Alonso	41
<i>Alvaro de Reza Estrada, Sandra Silvia Roblero Aguilar, Héctor Rafael Orozco Aguirre, Saturnino Job Morales Escobar</i>	
Sistemas inmunes artificiales aplicados a la robótica: agarre de objetos	55
<i>Daniel Ramirez, Jesús Ortiz, Pedro Ponce, Arturo Molina</i>	
Seguimiento autónomo de personas con un robot aéreo no tripulado	71
<i>Fabiola Guevara Soriano, Antonio Alfredo Reyes Montero, Abraham Sánchez López</i>	
Integración de técnicas de inteligencia artificial en ambiente domótico	85
<i>Georgina Resendíz, Enrique Mendéz, Ana Luisa Sanchez, Fernando Gudiño</i>	
Controladores inteligentes para invernadero hidropónico	99
<i>Pedro Ponce, Arturo Molina, Omar Mata</i>	
Análisis de pérdidas en semiconductores de potencia generadas por controladores difusos de velocidad en motores de CD sin escobillas	115
<i>Manuel García-López, Antonio Rosales, Pedro Ponce-Cruz, Arturo Molina, Jose J. Rodriguez Rivas</i>	
Sintonización de controladores PID por medio de un algoritmo genético con fertilización in vitro aplicado a un convertidor multicelular	129
<i>J. F. García-Mejía, A. A. Flores-Fuentes, J. C. Ambriz-Polo, L. A. González-Escobar, C. E. Torres-Reyes, E. E. Granda Gutiérrez</i>	

Visión por computadora en un robot móvil tipo oruga	145
<i>Uriel González Escalona, Elsa Rubio Espino, Juan Humberto Sossa Azuel</i>	
Control con rechazo activo de perturbaciones para el equilibrio de robots humanoides.....	159
<i>S.M. Orozco-Soto, J.M. Ibarra-Zannatha</i>	
Comparación experimental de controladores PID clásico, PID no lineal y PID difuso para el caso de regulación	173
<i>Luis Fidel Cerecero Natale, Eduardo Campos Mercado, Julio Cesar Ramos Fernández, Marco Antonio Marquéz Vera, Irvin Arlin Chan Ac</i>	
Desempeño de un regulador-estabilizador neurodifuso en un sistema multimáquinas	189
<i>Jacob Efrain Diaz Lavariega, David Romero Romero</i>	
Navegación jerárquica de un robot humanoide usando redes de Petri y lógica difusa.....	207
<i>Federico Furlán Colón, Elsa Rubio Espino, Juan Humberto Sossa Azuela, Víctor Hugo Ponce Ponce</i>	
Ecuaciones inversas de filtros de reconstrucción perfecta	221
<i>Oscar Herrera-Alcántara, María del Carmen E. Macías-Sánchez, Miguel González-Mendoza</i>	

Aplicación web e-learning multiplataforma para recolección de datos de usuarios y retroalimentación automática basada en técnicas estadísticas

Samuel Montiel Santos¹, Luis Ángel Reyes Hernández¹, Asdrúbal López-Chau²,
Beatriz Alejandra Olivares Zepahua¹, Celia Romero Torres¹

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba,
Orizaba, Veracruz, México

² Universidad Autónoma del Estado de México,
Zumpango, Estado de México, México

smontiels@outlook.com, l_r_h01@hotmail.com, alchau@uaemex.mx,
bolivares@ito-depi.edu.mx, cromerotorres@hotmail.com

Resumen. Las generaciones actuales de jóvenes conviven en entornos donde es común la presencia de dispositivos electrónicos conectados a Internet. Entre las diferentes aplicaciones disponibles se encuentran las de e-learning. Sin embargo, un aspecto poco abordado, es la utilización de técnicas estadísticas, aprendizaje automático y minería de datos para retroalimentar tanto a discentes y profesores para mejorar su desempeño académico o su función docente. En este artículo, se propone una arquitectura escalable para aplicaciones e-learning para dispositivos móviles, con capacidad de ofrecer retroalimentación automática a los usuarios basadas en la interacción con el sistema y las calificaciones obtenidas. La arquitectura propuesta permite incorporar diversas técnicas, incluyendo las de inteligencia artificial, para mejorar la calidad de la retroalimentación. Para demostrar la viabilidad del enfoque, se desarrolló un prototipo de aplicación que permite identificar posibles dificultades académicas y emitir recomendaciones a discentes de nivel licenciatura usando técnicas estadísticas.

Palabras clave: aplicación móvil, e-learning, arquitectura.

Cross-platform E-learning Application for User Data Collection and Feedback

Abstract. Current generations of young people coexist in environments where electronic devices connected to the Internet are common. Among the different

applications available are e-learning. However, one aspect that is little discussed in the literature is the use of statistical techniques, machine learning and data mining to feed both students and teachers to improve their academic performance or their teaching function. In this article, we propose a scalable architecture for e-learning applications for mobile devices, capable of offering automatic feedback to users based on interaction with the system, and the scores obtained. The proposed architecture allows to incorporate diverse techniques, including those of artificial intelligence, to improve the quality of the feedback. To demonstrate the feasibility of the approach, a prototype application was developed to identify possible academic difficulties and to issue recommendations to undergraduate students using statistical techniques.

Keywords: mobile app, e-learning, architecture.

1. Introducción

Hoy en día existen una gran cantidad de aplicaciones móviles y cada día se suman muchas más, donde gran parte se dirige hacia el público joven, dado que son los mayores consumidores de estos contenidos. Por esta razón, se crean en su mayoría aplicaciones enfocadas a temas de entretenimiento y diversión. Aunado a lo anterior, una persona promedio gasta mensualmente 35 horas en el uso de dispositivos móviles y 9% de esas horas son para videojuegos y actividades no propias del estudio [1], por lo que no existen suficientes canales que ofrezcan apoyo a la difusión o mejora del aprendizaje. Debido a la inclusión de los dispositivos móviles en la actualidad, una gran cantidad de personas tienen la posibilidad de acceso a ellos, por lo que actualmente se cuentan con 2,600 millones de suscriptores de este tipo de medios electrónicos [2]. Aprovechando lo anterior, en este artículo se propone la utilización de teléfonos inteligentes con fines académicos. Específicamente, se propone la arquitectura de una aplicación e-learning para retroalimentar a usuarios, tanto docentes como discentes.

La arquitectura escalable presentada en este artículo se basa en el concepto de sistemas e-learning, que hacen uso de las redes y las tecnologías multimedia, permitiendo el acceso al conocimiento y a los recursos remotos para el desarrollo de toda la sociedad, por lo que se centra en la importancia de la utilización de aplicaciones móviles en el ámbito de la educación a nivel licenciatura, y en la necesidad de desarrollar nuevas herramientas que permitan la transmisión de conocimientos de manera diferente, así como también sirvan de apoyo a los métodos de enseñanza que se utilizan actualmente.

En este sentido, una parte de la arquitectura propuesta contempla una aplicación móvil e-learning, que sea utilizada en grupos de discentes guiados por su profesor para la aplicación de evaluaciones de ciertos temas. Esto con el fin de que los jóvenes que se encuentran cursando actualmente el grado de licenciatura se apoyen en herramientas que sirvan de soporte para un mejoramiento continuo a comparación con las generaciones anteriores que estaban en condiciones diferentes en tecnología, dado que hoy en día las

personas se encuentran mejor comunicadas y comparten constantemente gran cantidad de información.

La arquitectura mostrada se basa en el patrón arquitectónico de software Modelo-Vista-Controlador el cual separa los datos y la lógica de negocio de la interfaz de usuario. Para que de esta manera se aprecie de manera fácil y sencilla la forma de interacción entre los distintos módulos solicitando peticiones y recibiendo respuestas para cada uno de ellos. De igual forma la arquitectura cuenta con un módulo basado en machine-learning, el cual es una disciplina científica del ámbito de la Inteligencia Artificial que crea sistemas que aprenden automáticamente, en este contexto quiere decir identificar ciertos patrones a través de la información disponible, este módulo se agregó para el análisis de datos y la retroalimentación de los discentes basado en las calificaciones obtenidas en sus evaluaciones.

Para una mejor explicación del objeto de estudio, el presente artículo se encuentra estructurado de la siguiente forma: La Sección 2 muestra el estado del arte de los artículos relacionados con el tema de investigación, la Sección 3 describe la arquitectura de la aplicación, la Sección 4 muestra los resultados y finalmente, las conclusiones y el trabajo a futuro se describen en la Sección 5.

2. Trabajos relacionados

Las nuevas tecnologías y la globalización brindan un cambio rápido en todos los aspectos de la vida humana. Entre ellos el incremento del interés por los dispositivos móviles y su uso para la enseñanza y la investigación. Es por ello que M. Isidora et al. [3] propusieron utilizar paquetes de software para examinar el modo de actuar que tienen los discentes sobre este tipo de nuevas técnicas de enseñanza, ofreciendo mejoras durante el proceso de aprendizaje y haciendo atractivo el modo de enseñanza, tratando de obtener satisfacción durante el proceso de educación.

Hoy en día existen varios sistemas operativos móviles que son muy populares a nivel mundial, tales como Android e iOS, entre otros más, y esto representa un inconveniente para el desarrollo de aplicaciones debido a los diferentes lenguajes de programación y a sus distintos modos de funcionamientos. Es por ello que D. Haryadi [4] desarrolló una aplicación híbrida (diferentes sistemas operativos) e-learning que ayuda a los discentes a obtener información de ciertos cursos que se imparten, esta aplicación se ejecuta dentro de un contenedor nativo en cada dispositivo móvil, utilizando HTML5, JavaScript y CSS.

En este trabajo se desarrolló una aplicación móvil e-learning que permitiera familiarizarse con el pensamiento y lenguaje legal de una manera eficiente, la cual se basó en un escenario hipotético, haciendo que los discentes completaran ciertas tareas y lograran metas de aprendizaje utilizando análisis, investigación jurídica y casos de estrategia, V. Bouki et al. [5] describieron que la gamification (ludificación) fomenta la motivación del

aprendizaje, esto mediante un enfoque educativo para motivar a los discentes a aprender mediante el uso de videojuegos en ambientes de enseñanza.

J. López, A. Cerezo y J. Menéndez [6] desarrollaron una aplicación experimental utilizando Java para dispositivos con sistema operativo móvil Android para la preparación de un examen para obtener la acreditación para guía turístico adaptando los contenidos pertinentes a dicha aplicación, como una simulación del examen para facilitar el conocimiento.

L. Flores, D. Almario y J. López [7] desarrollaron una herramienta que ayude a los discentes a entender cómo funcionan los sistemas dinámicos. Por lo que se diseñó y desarrolló una aplicación para el sistema operativo móvil Android que representa matemáticamente este sistema, y para ello se implementó un modelo diferencial de ecuaciones utilizando el método numérico de Runge-Kutta.

M. Chacon y C. Garita [8] desarrollaron una aplicación que permitió abordar el tema de m-learning como una nueva modalidad de aprendizaje y tomar ventaja de la creciente utilización de celulares inteligentes y tabletas electrónicas. En particular, la aplicación representó la primera aplicación dirigida a discentes con el objetivo de brindar acceso a la información general sobre cursos.

Los dispositivos móviles tales como teléfonos, tabletas y laptops, actualmente se venden a un precio económico y se obtienen de varias maneras accesibles por lo que J. Hou, K. Zhang X. Yang [9] exploraron integrar la tecnología m-learning en los cursos en línea que se utilizan en la Escuela de Educación Continua de la Universidad de Pekín lo que proporcionó a los discentes un modo de aprendizaje combinado, en donde ellos pudieron acceder a cualquiera de los cursos disponibles a través de laptop, teléfonos móviles o tabletas sin ningún problema.

Se desarrolló una aplicación móvil llamada CyberAware por parte de F. Giannakas et al. [10] destinada a la educación y la conciencia de la seguridad cibernética, fomentando factores educativos, con el objetivo de familiarizar a los discentes con las tecnologías de seguridad cibernética fundamentales que se necesitan al estar conectados a Internet y mantener la protección continua contra el malware, los ataques cibernéticos, y el spam.

A. Sarasa y L. Sierra [11] desarrollaron una aplicación móvil Android que permitió a los discentes interactuar con todas las actividades disponibles en la institución a través de la aplicación. Además el usuario profesor era el responsable de configurar y gestionar las actividades propuestas y aceptar si así lo deseaba a los discentes interesados en los cursos que imparte y de esta manera facilitar la gestión necesaria para todas aquellas actividades realizadas en todos los niveles de la Universidad.

Reconociendo el enorme potencial de las aplicaciones de Android, H. Lye y S. Yean [12] desarrollaron una aplicación móvil para simular y comparar la implementación de los tres métodos de Black Scholes sobre una plataforma móvil, con el objetivo de animar a los discentes de ingeniería financiera para explorar el mundo de los Modelos de Black-Scholes y aprender más sobre el riesgo de los instrumentos financieros.

La Universidad de Hong Kong cuenta con un LMS (Learning Management System, Sistema de gestión del aprendizaje) que se accede de manera Web, pero también desarrolló una aplicación móvil denominada “HKU Space Soul” con el objetivo de trasladar a los discentes a una plataforma móvil, facilitando con esto la mejora continua del aprendizaje. Como resultado, el total de número de accesos al LMS vía aplicación móvil aumentó, mientras que el número de accesos desde el navegador Web disminuyó. Por lo que P. Hung, J. Lam y C. Wong en [13] mostraron la importancia de ofrecer nuevos servicios tecnológicos a los profesores y discentes, debido a que el uso de la tecnología educativa móvil mejora las experiencias de aprendizaje.

Hoy en día hay gran número de universidades trabajan en el desarrollo de laboratorios virtuales y remotos. Es por ello que S. Martin et al. en [14] desarrollaron una arquitectura para el apoyo a la creación de aplicaciones m-learning que consuman la información alojada en su LMS. Permitiendo a los discentes el acceso a los contenidos y servicios en cualquier momento, en cualquier lugar y en cualquier tipo de dispositivo. Como resultado final se logró generar una clasificación de los diferentes tipos de aplicaciones que proporcionan experiencia de aprendizaje y los detalles específicos necesarios del diseño del middleware propuesto.

En [15] se presentó un enfoque para evaluar y predecir el nivel de competencia del discente cuando se utiliza una determinada estrategia de enseñanza. Utilizando una de las técnicas del machine-learning, en particular, el uso de circuitos lógicos/redes para dicha predicción. El modelo matemático de los circuitos lógicos se utiliza para evaluar el nivel de competencia. Proponen también un método para sintetizar el Circuito lógico resultante que predice la efectividad del proceso de enseñanza cuando dos estrategias se combinan. Los resultados preliminares experimentales demuestran la escalabilidad esperada y la aplicabilidad del enfoque propuesto.

En [16] se propone un método de predicción de deserción para cursos de e-learning, basado en tres técnicas populares de machine-learning y datos detallados de los discentes. Las técnicas de aprendizaje mecánico utilizadas son las redes neuronales feed-forward, las máquinas vectoriales de apoyo y el conjunto probabilístico simplificado ARTMAP (Teoría de la Resonancia Adaptativa). El método se examinó en términos de precisión general, sensibilidad y precisión y sus resultados fueron altos, lo que indica que el esquema era preciso tanto en la identificación correcta de los abandonos como en evitar las clasificaciones erróneas más completas.

Por otra parte, en [17] se construyó un sistema de evaluación de la gestión de los discentes a través de la tecnología JSP (Java Server Pages), realizando un análisis en profundidad para el marco de evaluación reciente y el procesamiento de datos no estructurados y Datos semi-estructurados. Por otro lado, considerando la complejidad de la información para la gestión estudiantil y la subjetividad de las mediciones, se propuso un algoritmo basado en la Red Neural Artificial (ANN Artificial Neural Network) con el objetivo de construir un modelo integrado inteligente a través de la tecnología de minería

de datos. Al evaluar un conjunto de datos de gestión recogidos de una escuela politécnica se mostró la efectividad del algoritmo propuesto.

En la Tabla 1 se muestra una breve comparación entre algunos trabajos antes descritos y este artículo.

Tabla 1. Análisis Comparativo del estado del arte.

Trabajo	Manejo de Estadística	A. Android	A. iOS	A. Web	G. Varios temas
[3]	Sí	No	No	No	Sí
[4]	No	Sí	Sí	Sí	No
[5]	No	No	Sí	No	No
[6]	No	Sí	No	No	No
[7]	No	Sí	No	No	No
[8]	No	Sí	No	No	Sí
[9]	No	No	No	No	Sí
[10]	Sí	Sí	Sí	Sí	No
[11]	Sí	Sí	No	Sí	Sí
[12]	No	Sí	No	No	No
[13]	No	No	Sí	Sí	Sí
[14]	No	No	No	No	Sí
Propuesta	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Como se logra apreciar en la Tabla 1, ningún artículo menciona la posibilidad de manejo de técnicas estadísticas para generar retroalimentación tanto a docentes como a discentes. Por lo que se concluye que se puede utilizar esa carencia a favor del proyecto ocupando un módulo Generador de Feedback (retroalimentación) para el análisis de patrones utilizando la información que se genere al utilizar dicho proyecto.

3. Arquitectura propuesta

La arquitectura del sistema propuesto se basó en el patrón arquitectónico de software Modelo-Vista-Controlador, dicho patrón se utilizó en dos ocasiones dado que, se contempló una aplicación Web y móvil.

Como se mencionó en el párrafo anterior, se consideró una aplicación Web, dicha aplicación se encuentra construida sobre el marco de trabajo Java Server Faces para hacer uso de todas las ventajas que tienen sus herramientas al construir aplicaciones Web.

Por otra parte la aplicación móvil se propone su desarrollo de forma híbrida utilizando el marco de trabajo PhoneGap el cual hace uso de HTML5, JavaScript y CSS para su realización. Su funcionamiento es similar a una página Web dentro del navegador y la interfaz gráfica de usuario se desarrollará con componentes HTML, también permite que el código JavaScript emita llamadas al sistema nativo, por ejemplo para acceder a la libreta de

direcciones o al sistema de cámara. De esta manera se crea un único proyecto y PhoneGap se encarga de empaquetarlo para diferentes sistemas operativos móviles.

En la Figura 1 se muestra la arquitectura para el sistema propuesto. Cabe mencionar que el discente no podrá acceder al módulo Generador de Feedback en la aplicación Web, solamente a los resultados almacenados en la BD que se obtendrán de dicho módulo y se empleará PhoneGap para el empaquetado de la aplicación móvil.

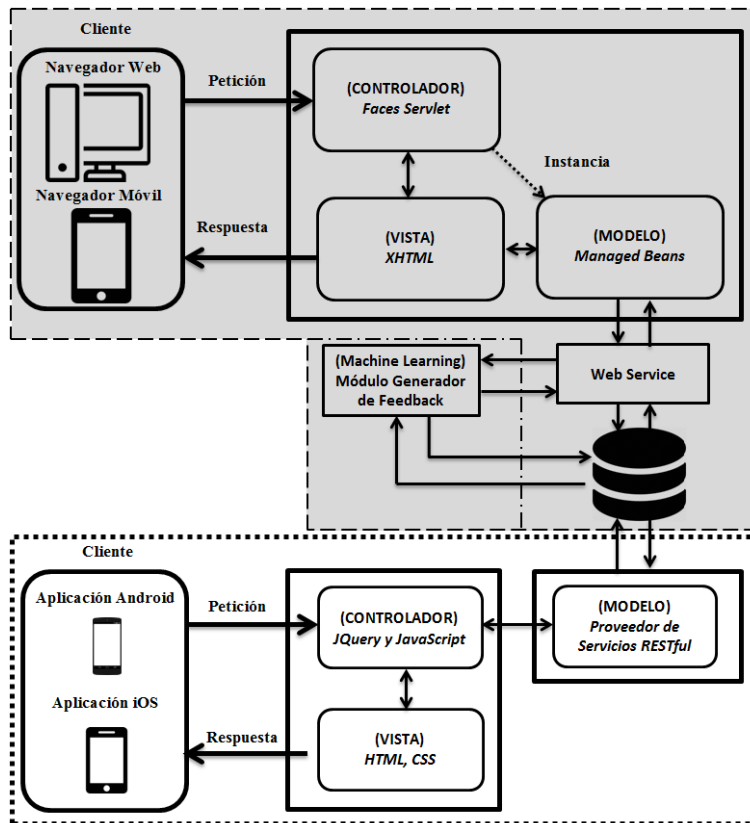


Fig. 1. Patrón arquitectónico MVC aplicado en el sistema propuesto.

3.1. Modelo-vista-controlador para la plataforma Web

Como se mencionó en el párrafo anterior, se contempla una aplicación Web, dicha aplicación está construida sobre el marco de trabajo Java Server Faces.

A continuación se ofrece una descripción de la figura 1 explicando la sección remarcada en color gris.

3.1.1. Descripciones

- **Cliente:** Los clientes para esta parte de la arquitectura fueron pensados para ser un navegador Web convencional o un navegador Web móvil, ambos realizan peticiones de manera independiente al marco de trabajo Java Server Faces solicitando la información que necesiten, el marco recibe las peticiones y las procesa de manera adecuada arrojando un resultado satisfactorio o en su defecto alguna página de error.
- **Controlador:** Dado que la arquitectura contempla el marco de trabajo Java Server Faces, el componente Faces Servlet funge como controlador recibiendo las peticiones del cliente, el controlador tiene el trabajo de ser el intermediario entre el modelo y la vista, por lo que si el cliente necesita cierta información, el controlador deberá solicitar al modelo dichos datos, instanciando a los JavaBeans necesarios para el proceso y al mismo tiempo preparando la vista para el despliegue de información como respuesta hacia el cliente.
- **Modelo:** Los beans administrados tienen la tarea de acceder a la información donde quiera que se encuentre sin que el controlador se entere. En este caso el controlador crea instancias del JavaBean necesario para obtener alguna información, de esa manera el JavaBean procede a realizar peticiones al servicio Web basado en tecnología SOAP, este a su vez realiza una petición a la base de datos gestionada en PostgreSQL donde se encuentra almacenada la información, se procesa y se proyecta en la vista para el cliente.
- **Vista:** La vista son todas aquellas páginas que se despliegan hacia el cliente, desde solicitudes de información, peticiones de otras páginas, errores, etc.

3.1.2. Web Service y datos

El servicio Web SOAP se aloja en un servidor de aplicaciones GlassFish a la espera de peticiones por parte del bean administrado, éste contiene todos los diferentes métodos necesarios para cubrir todas las solicitudes que se realicen. Los datos son gestionados por PostgreSQL, donde es almacenada la información.

3.2. Modelo-vista-controlador para la plataforma Móvil

Como se mencionó en el punto tres, se contempló una aplicación móvil, dicha aplicación es híbrida por lo que está construida bajo HTML5, JavaScript y CSS.

A continuación se ofrece una descripción de la figura 1 explicando la sección que no está remarcada con color.

3.2.1. Descripciones

- **Cliente:** El cliente es la propia aplicación móvil, dicha aplicación se compone por páginas HTML5 empaquetadas por el marco de trabajo PhoneGap. La aplicación realiza peticiones por medio del protocolo HTTP solicitando la información que se necesite, procesando de manera adecuada los datos arrojando un resultado satisfactorio o en su defecto alguna página de error.
- **Controlador:** JQuery y JavaScript fungen como controlador para esta parte, recibiendo las peticiones del cliente. El controlador tiene el trabajo de ser el intermediario entre el modelo y la vista, por lo que si el cliente necesita cierta información, el controlador deberá solicitar al modelo dichos datos para el proceso y a la vez preparando la vista para el despliegue de información como respuesta hacia el cliente.
- **Modelo:** Como modelo se tiene el proveedor de servicios RESTful, estos tienen la tarea de acceder a la información sin que el controlador se entere. En este caso el controlador solicita información al modelo, éste realiza peticiones a la base de datos gestionada en PostgreSQL donde se encuentra almacenada la información, se procesa y se proyecta en la vista para el cliente.
- **Vista:** La vista son todas aquellas páginas que se despliegan hacia el cliente, desde solicitudes de información, peticiones a otros enlaces, errores, etc. y que son páginas HTML que se encuentran contenidas como aplicación móvil.

3.3. Módulo generador de Feedback

Uno de los módulos principales de la arquitectura propuesta es el denominado Generador de Feedback. Éste se encarga de identificar las dificultades que el discente presenta, usando como entrada los datos recolectados de la interacción del usuario con el sistema, así como las respuestas propias y las de otros usuarios, para ello el acceso al módulo estará disponible únicamente en la interfaz del profesor con el nombre de gráficos el cual desplegará la información pertinente. El módulo tiene la capacidad de agregar herramientas estadísticas o de inteligencia artificial para generar las retroalimentaciones.

Para lograr su cometido, el módulo Generador de Feedback requiere que se almacenen en la base de datos los siguientes datos de cada usuario:

1. Identificador único de usuario (discente y profesor).
2. Tiempos de interacción del usuario con el sistema.
3. Cambios en el estado de la aplicación: Minimizar, Cambio de aplicación, Cerrado de aplicación, Maximizar.

Además, como cualquier otro sistema e-learning que incorpore evaluación, se necesita almacenar los datos relacionados con las preguntas y respuestas. En nuestra propuesta

actual, se consideran preguntas con respuesta de opción múltiple. Los datos a almacenar son los siguientes:

4. Identificador pregunta.
5. Tema(s) y/o subtema(s) relacionados(s).
6. Pregunta.
7. Respuesta correcta.
8. Distractores.
9. Recomendación tema.
10. Recomendación subtema.
11. Recomendación pregunta.

La relación entre usuarios y preguntas se implementa en otra tabla que contiene los siguientes datos:

12. Identificador usuario.
13. Identificador pregunta.
14. Número de reintentos.
15. Respuesta elegida.

Para probar el módulo propuesto, se implementó una biblioteca propia para cálculos estadísticos en el módulo Generador de Feedback. La estrategia utilizada para generar recomendaciones, toma como base el uso de pruebas de hipótesis (inferencia estadística) para decidir si falla en cada pregunta tiene una dependencia estadísticamente significativa con cierto tema o subtemas relacionados. La prueba de hipótesis elegida para la implementación es la prueba exacta de Fisher, debido a que al inicio los datos recolectados son pocos, y las tablas de frecuencias esperadas contienen valores menores a cinco.

Partiendo del concepto de tutor inteligente, el cual “es un sistema de software que utiliza sistemas inteligentes para asistir al discente que requiere de un tutorizado uno a uno y lo guía en su aprendizaje, adicionalmente posee una representación del conocimiento y una interface que permite la interacción con los discentes para que puedan acceder al mismo” [18].

Para probar el módulo Feedback se propone tomar en cuenta el test exacto de Fisher que es un contraste de hipótesis muy interesante por sus muchas aplicaciones y porque da un útil escenario para aprender la lógica interna de un contraste de hipótesis. Se aplicará en las siguientes situaciones: 1) en la comparación de dos grupos respecto a una variable dicotómica que fue el caso de los géneros de un grupo de 15 discentes. 2) En la valoración de la relación de dos variables cualitativas dicotómicas en temas a evaluar de una materia en específico. Y se procederá a calcular su respectivo porcentaje como en el ejemplo propuesto con datos sintéticos.

Tabla 2. Propuesta del método de Fisher aplicado al grupo “A”.

Género	Tema A	Tema B	Total
Mujer	2	4	6
Hombre	8	1	9
Totales	10	5	15

Valor-p: 0.0450

Tabla 3. Propuesta del método de Fisher aplicado al grupo “B”.

Género	Tema A	Tema B	Total
Mujer	3	3	6
Hombre	7	2	9
Totales	10	5	15

Valor-p: 0.2398

Tabla 4. Propuesta del método de Fisher aplicado al grupo “C”.

Género	Tema A	Tema B	Total
Mujer	1	5	6
Hombre	9	0	9
Totales	10	5	15

Valor-p: 0.0020

En el ejemplo propuesto se encuentra una dependencia estadísticamente significativa entre las variables analizadas, el sistema elige la retroalimentación para estudiar la sección, pregunta, tema para el discente. Para el profesor, el sistema realiza la retroalimentación basada en las frecuencias de preguntas correctamente e incorrectamente contestadas, indicándole además sobre cuáles temas se encuentran relacionados y cuáles son los más difíciles para los discentes.

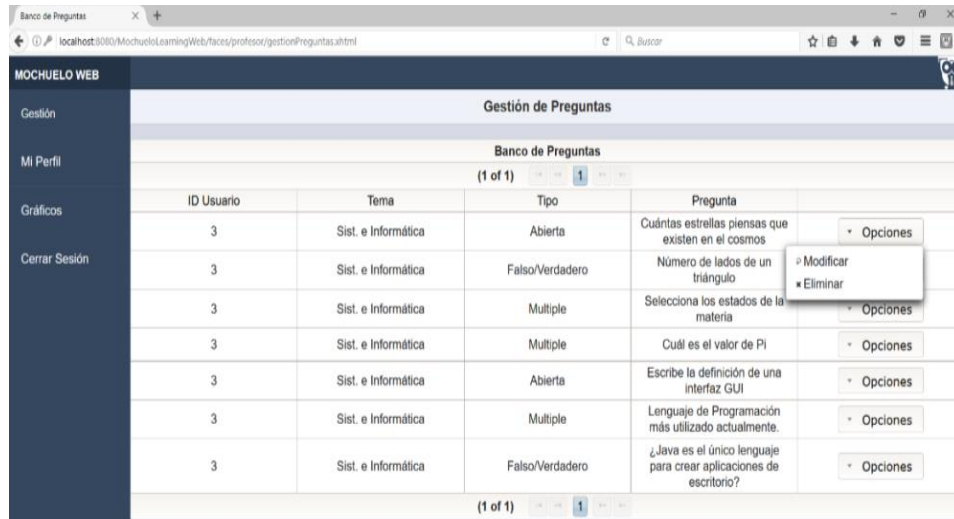
Por lo que la interpretación habitual, es que se encuentra dependencia estadística significativa entre las dos variables, si el valor-p es menor a 0.05. Como puede verse, para el caso de la Tabla 2 y Tabla 4 se encontró dependencia, mientras que para la Tabla 3 no hay dependencia. La retroalimentación en este caso de estudio preliminar y se encuentra en proceso de implementación para la aplicación.

4. Resultados

Se muestran algunas pantallas que se han desarrollado para mostrar el estado actual del proyecto, y con ello se espera que la arquitectura propuesta y el módulo de Feedback

muestren los datos estadísticos de un discente para su futura manipulación en un test de Fisher.

En la Figura 2 se muestra una pantalla donde se despliegan algunas preguntas que forman parte del banco de reactivos para crear evaluaciones.



ID Usuario	Tema	Tipo	Pregunta	Opciones
3	Sist. e Informática	Abierta	Cuántas estrellas piensas que existen en el cosmos	• Opciones
3	Sist. e Informática	Falso/Verdadero	Número de lados de un triángulo	• Opciones
3	Sist. e Informática	Multiple	Selecciona los estados de la materia	• Opciones
3	Sist. e Informática	Multiple	Cuál es el valor de Pi	• Opciones
3	Sist. e Informática	Abierta	Escribe la definición de una interfaz GUI	• Opciones
3	Sist. e Informática	Multiple	Lenguaje de Programación más utilizado actualmente.	• Opciones
3	Sist. e Informática	Falso/Verdadero	¿Java es el único lenguaje para crear aplicaciones de escritorio?	• Opciones

Fig. 2. Interfaz de usuario para revisar el banco de preguntas.

En la Figura 3 se despliegan algunos datos dentro de la aplicación móvil.

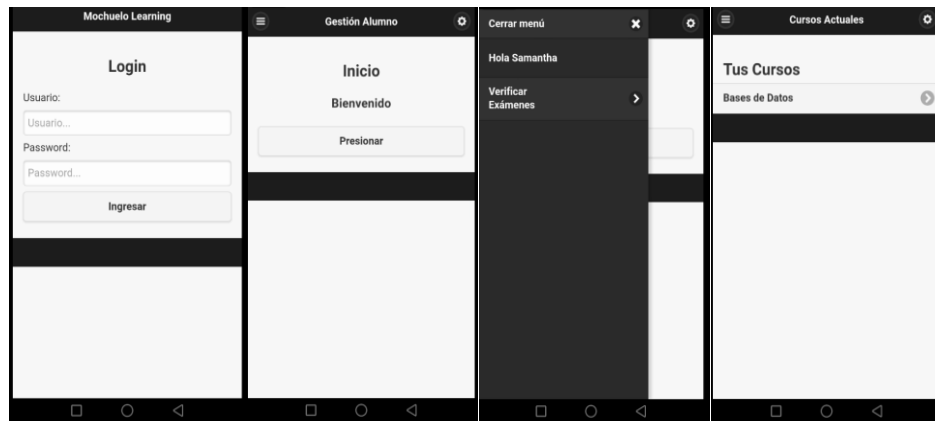


Fig. 3. Consulta de datos en la aplicación móvil.

En la Figura 4 se muestra una pantalla con dos gráficas generadas.

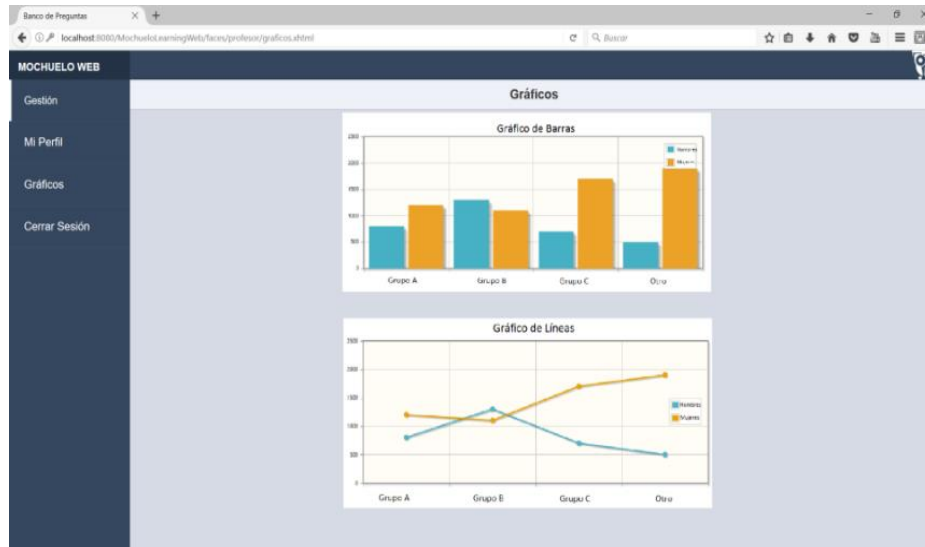


Fig. 4. Gráficas generadas a partir de algunos datos obtenidos.

5. Conclusiones

En este artículo presenté una arquitectura escalable de una propuesta de un sistema e-learning el cual contiene una aplicación Web y una aplicación móvil, para que se utilicen como apoyo en distintas clases asumiendo los nuevos retos de hoy en día y de esta manera ofrecer cierta retroalimentación basada en el módulo Feedback el cual propondrá información tomada de las calificaciones evaluadas y con esto proporcionar herramientas nuevas empleando la tecnología actual. También se describió de qué forma está compuesta la arquitectura para llevar a cabo este proyecto.

El desarrollar aplicaciones móviles híbridas para el fortalecimiento de formas complementarias de enseñanza es una solución potencial para el mejoramiento continuo del aprendizaje en discentes que cursan sus estudios universitarios o de cualquier nivel superior, además de que el uso de aplicaciones móviles se encuentra en uno de sus puntos más altos, al ser los jóvenes los mayores consumidores de este tipo de medios masivos de comunicación, debido a que día a día se generan miles de aplicaciones disponibles sobre cualquier tema, discusión, materia o interés.

Actualmente, se sigue trabajando en el desarrollo del sistema, principalmente en la implementación de los algoritmos pertinentes del módulo de Feedback como lo es la prueba de Fisher, por lo cual aún no es posible medir el impacto de satisfacción a discentes y maestros.

Agradecimientos. Los autores agradecen muy gratamente al Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo para realizar este trabajo.

Referencias

1. Nielsen: The Digital Consumer Report 2014 Nielsen (2014)
2. Sobre penetración actual de dispositivos móviles. Disponible en: <http://www.broadbandcommission.org/Documents/reports/bb-annualreport2014.pdf>.
3. Isidora, M.: The effects of the intended behavior of students in the use of m-learning. *Computers in Human Behavior*, Volume 51, Part A, Serbia, pp. 207–215 (2015)
4. Haryadi, D., Joanne, L., Winsen: Mobile learning application based on hybrid mobile application technology running on Android smartphone and Blackberry. In: *ICT (Information and Communications Technology) for Smart Society (ICISS)*, 2013 International Conference on, Jakarta, Indonesia (2013)
5. Bouki, V., Economou, D., Kathrani, P.: Gamification and legal education: A game based application for teaching university law students. In: *Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, 2014 International Conference on, Thessaloniki, Greece (2014)
6. López, J., Cerezo, A., Menéndez, J.: Usage of mobile devices as collaborative tools for education and preparation of official exams. In: *International Symposium Consumer Electronics (ISCE)*, 2015 IEEE International Symposium on, Madrid, Spain (2015)
7. Flores, L., Almario, D., López, J.: Development of an Android App as a learning tool of dynamic systems and automatic control. In: *Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*, 2014 III International Congress of, Cartagena de Indias, Colombia (2014)
8. Chacon, M., Garita, C.: Mobile Course: Development of a mobile app to access university courses information. In: *Computing Conference (CLEI) Conferencia Latinoamericana en Informática*, 2013 XXXIX Latin American, Vargas, Venezuela (2013)
9. Hou, J., Zhang, K., Yang, X.: m-learning Course Development and Practice Based on Tutor-Directed Online Teaching. In: *Educational Innovation through Technology (EITT)*, 2014 International Conference of, Queensland, Australia (2014)
10. Giannakas, F., Kambourakis, G., Gritzalis, S.: CyberAware: A mobile game-based app for cybersecurity education and awareness. In: *Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, 2015 International Conference on, Thessaloniki, Greece (2015)
11. Sarasa, A., Sierra, L.: An app for managing unregulated teaching activities. In: *Computers in Education (SIIE) Simposio Internacional de Informática Educativa*, 2014, International Symposium on, La Rioja, Spain (2014)
12. Lye, H., Yean, S.: Learning Black Scholes option pricing the fun way via mobile apps. In: *Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)* 2013 IEEE International Conference on, Kuta, Indonesia (2014)
13. Hung, P., Lam, J., Wong, C.: A Study on Using Learning Management System with Mobile App. In: *Educational Technology (ISET)*, 2015 International Symposium on, Wuhan, China (2015)

14. Martin, S., Gil, R., Cristobal, E.: Middleware for the Development of Context-Aware Applications inside m-learning: Connecting e-learning to the Mobile World. In: Computing in the Global Information Technology, 2009 Fourth International Multi-Conference on, French Riviera, France (2009)
15. Kushik, N., Yevtushenko, N., Evtushenko, T.: Novel machine learning technique for predicting teaching strategy effectiveness. International Journal of Information Management, Russia (2016)
16. Lykourantzou, I.: Dropout prediction in e-learning courses through the combination of machine learning techniques. Computers & Education, Volume 53, Greece, pp. 950–965 (2009)
17. Huang, X., Zhang, G., Pan, Q.: Research of machine learning methods for student management performance evaluation. In: Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), International Conference, China (2012)
18. VanLehn, K.: Student Modelling. M. Polson. Foundations of Intelligent Tutoring systems. Hillsdale, N.J. Lawrence Erlbaum Associates, pp. 55–78 (1988)

Estado del arte en los sistemas de recomendación

Oscar Escamilla González, Sergio Marcellin Jacques

Universidad Nacional Autónoma de México,
Posgrado en Ciencias e Ingeniería en Computación, Ciudad de México,
México

{oescamil, smarcellin}@gmail.com

Resumen. Los sistemas de recomendación (*SRs*) son sistemas automatizados cuyo propósito es el filtrado de información. Los SRs están pensados para apoyar a los usuarios a encontrar *ítems* dentro de un contexto determinado como por ejemplo, películas, libros, artículos académicos, etc. El objetivo principal de los SRs es mostrar de los ítems *recomendables*, aquellos que se *estime*, sean de interés para el usuario. Dicho de otra manera, los SRs estiman el interés que el usuario podría tener sobre los ítems que este aún no ha considerado. Con las estimaciones hechas, el SRs genera un ranking de ítems y le muestra al usuario los ítems que se encuentran en las posiciones más altas de éste. El objetivo de este trabajo es presentar el “*estado del arte*” de los SRs exponiendo distintas técnicas con las que se ataca el problema de estimar la relevancia de los ítems para un usuario determinado.

Palabras clave: sistemas de recomendación, filtrado colaborativo basado en confianza, basado en contenido, filtrado colaborativo, basado en modelos, sistemas de recomendación híbridos.

State of the Art of Recommendation Systems

Abstract. Recommender Systems (RS) are automatic systems which purpose is filtering information. The RS are designed to help users to find *items* within a specific context, for example: movies, books, research articles, etc. Their main objective is to show users *recommendable items* those items that RS estimates will be of interest for the user. In other words, the RS estimate the posible interest a user may have on items that have not been considered by the user. Then, with the estimations made, the RS creates a ranking of items and shows the best ranked items to the user. The main purpose of this job is to present the “*state of the art*” of the RS, exposing different techniques used to tackle the problem of estimating the relevance of items for a certain user.

Keywords: recommender systems, thrust collaborative filtering, content base filtering, model based recommender system, collaborative filtering, hybrid recommender system.

1. Introducción

Actualmente la cantidad de información a la que podemos acceder por medio de la Internet excede la capacidad de una persona para poder procesarla en términos de lo que un usuario necesita encontrar. Por ejemplo, supongamos que tenemos un usuario que es un estudiante que está buscando artículos académicos relacionados con su tema de tesis. La cantidad de artículos que el usuario puede encontrar relacionados es exorbitante [12]. Aun así, por lo general sólo unos pocos artículos de este conjunto son relevantes o están acordes a las necesidades de su investigación.

Otro ejemplo típico es la adquisición de productos o servicios por medio de la Internet. La cantidad de posibles resultados al hacer una búsqueda es colosal, de tal manera que puede que los resultados que se obtengan sean servicios o productos que en realidad no se ajustan del todo a las necesidades, o en la multitud de resultados se pasen por alto algunas opciones que pudieran ser de interés. Este no es sólo un problema para los usuarios si no también para los proveedores, ya que éstos pueden perder oportunidades de ventas por el simple hecho de que el usuario no encuentre el producto que el proveedor ofrece en la multitud de opciones, a pesar de que éste sea de interés para el usuario.

Por otro lado, ante la falta de conocimiento de las alternativas o la inexperiencia, de manera natural nos apoyamos de las recomendaciones de terceros para la toma de decisiones. Pero muchas veces esta información es subjetiva o incluso puede resultar complicado encontrarla.

Por estas razones se ha vuelto necesario la construcción de herramientas automáticas o semiautomáticas que provean algún tipo de recomendación, ayudando a los usuarios a encontrar información, productos, servicios, etc. de mejor manera, filtrando la información del universo disponible logrando así un mejor uso de ella. Además, desde el punto de vista de los proveedores, se tiene un interés creciente por el desarrollo de este tipo herramientas, las cuales faciliten la vinculación entre sus productos y los usuarios que los necesitan e incluso aumenten las oportunidades de venta al recomendar productos adecuados al perfil de compra del usuario. Uno de los ejemplos más famosos de este tipo de proveedores es la compañía *Netflix*, que en 2007 [23] organizó un concurso ofreciendo un premio de 1,000,000 USD a quien pudiera implementar un sistema mejorara las predicciones en al menos en un 10 % con respecto al sistema de *Netflix*. El estudio de los SRs es relativamente nuevo y se independizó como un campo de investigación a mediados de los noventas y desde el 2007 se ha incrementado el interés por estos [10]. Como muestra de esto, los SRs son parte fundamental en importantes sitios Web entre los que destacan: Amazon, YouTube, Netflix, Yahoo, Tripadvisor, Last.fm, e IMDb.

2. Sistemas de recomendación

Los sistemas de recomendación (*SRs*) están muy relacionados con sistemas de “búsqueda o recuperación de información”, dado que ambos están pensados

para que a partir de un conjunto de datos se obtenga información relevante para el usuario [2]. Pero a su vez tienen diferencias fundamentales. Por ejemplo, en los sistemas de búsqueda se espera un uso puntual de éstos, mientras que los SRs se enfocan en usos repetidos a lo largo de tiempo. Otra diferencia es que en los sistemas de búsqueda los criterios de filtrado son expresados por el usuario de manera explícita cada vez que interactúa con él, mientras que en los SRs, estos criterios se obtienen de forma implícita del *perfil del usuario*. El hecho de que se necesite un perfil del usuario para realizar el filtrado, implica que se debe obtener y almacenar este perfil en alguna parte y esta necesidad, es otra de las diferencias con los sistemas de búsqueda. En los sistemas de búsqueda el usuario puede interactuar de forma anónima mientras que en los SR, el usuario necesita tener un perfil asociado.

Además tienen relación con la minería de datos ya que los SRs se pueden ver como un problema de estimar datos perdidos. De los ítems que el usuario aún no ha contemplado (*y por lo tanto desconocemos el nivel de interés del usuario sobre ellos*), queremos estimar el interés que el usuario puede tener sobre éstos a partir de observaciones previas o información extra y recomendar al usuario los que se estime sean de su interés, de tal manera que incluso, algunas técnicas de minería de datos se aprovechan directamente (ver sección “2.2 Basado en modelos”) en los SRs.

Así los SR son sistemas de filtrado de información y su objetivo es mostrar al usuario ítems *recomendables*, de tal manera que sean de su interés, pero que además el usuario no haya tomado en cuenta. Por ejemplo, no tiene gran impacto recomendar al usuario un producto (en este caso nuestros ítems son productos) que ya compró, dado que ya lo conoce y además suponemos que es de su agrado y por ello hizo la compra.

Para cumplir este objetivo, los SRs deben estimar de alguna manera el interés que el usuario tiene sobre cada ítem recomendable y seleccionar los de mayor interés para éste con base en las estimaciones hechas. Por lo tanto un SR debe de tener una función que dado un usuario y un ítem, pueda estimar el nivel interés de ese usuario para el ítem dado. Esto de manera más formal lo podemos definir como en [2]:

Sea U el conjunto de todos los usuarios e I el conjunto de todos los posibles ítems recomendables. Definimos $\bar{r}$ como una función que estima la utilidad de un ítem i para el usuario u , es decir:

$$\bar{r} : U \times I \rightarrow R, \text{ donde } R \text{ es conjunto ordenado.} \quad (1)$$

En general dentro de los SRs, no sólo se escoge un único ítem, sino que se crea un ranking de ítems basándose en el nivel de interés estimado y se seleccionan los n mejores ítems [2].

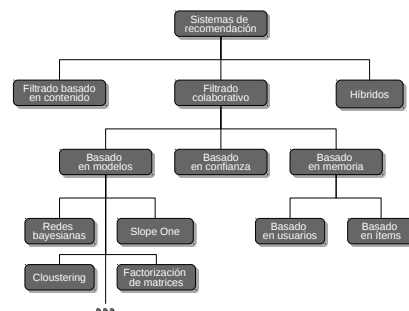


Fig. 1. Clasificación de los SRs.

Como se mencionó en párrafos anteriores, se han desarrollado varias técnicas para implementar la función $\bar{r}$, y podemos clasificar a los SR con base en la técnica seleccionada para ser usada en el SRs. En la Fig. 1 se muestran las técnicas más usadas para implementar SRs y a continuación se describen cada una de éstas.

2.1. Filtrado basado en contenido

El filtrado basado en contenido (**CBF**) recomienda ítems que estén dentro del perfil del usuario [6]. Este perfil se puede construir de manera explícita a partir de información solicitada al usuario, como por ejemplo usando formularios donde el usuario expresa preferencias o de manera implícita, extrayendo información de los ítems a los que el usuario ha mostrado interés anteriormente.

Este tipo de SRs depende mucho del contexto ya que se requiere que los ítems tengan un conjunto de atributos (también llamados *metadatos*) que lo describan. Estos atributos son especificados manualmente o se obtienen analizando información complementaria, como *tags*, comentarios, descripciones textuales o contenido multimedia, como imágenes, audio o video por ejemplo. Por otro lado, se necesita que el formato del perfil del usuario se pueda relacionar con los atributos de los ítems de tal manera que permita obtener una estimación del interés que el usuario puede tener sobre cada ítem.

La Fig. 2 muestra de manera general el proceso de los SR usando CBF, donde los pasos son **1)** extraer los atributos de los ítems, **2)** comparar éstos con el perfil del usuario y **3)** recomendar aquellos ítems que encajen mejor con el perfil del usuario[4].

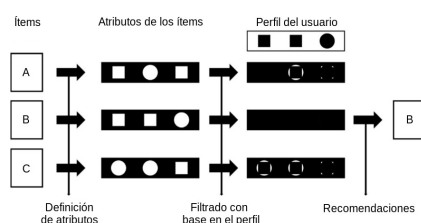


Fig. 2. Esquema general del filtrado basado en contenido.

Esta técnica es la que mejores resultados genera en las estimaciones, ya que se tiene información precisa tanto del perfil del usuario como de los ítems, pero a su vez es de las más difíciles de implementar. Por un lado está el trabajo de dar mantenimiento a la información de los ítems, ya que esto puede requerir de personas especializadas en el contexto o de una investigación extra y esto multiplica-

do por la cantidad de ítems que se registren en el sistema. Por otro lado, no todos los usuarios están dispuestos a llenar un perfil con sus preferencias o no se requiere de un análisis extra para definir qué actividad del usuario conviene registrar para construir su perfil de manera implícita.

2.2. Filtrado colaborativo

El filtrado colaborativo (**CF**) es el conjunto de técnicas más populares para desarrollar SRs [2]. En este conjunto de técnicas se intenta hacer la estimación

y recomendaciones con base en el comportamiento o en las calificaciones que los usuarios hacen sobre los ítems.

Algunas estas técnicas suponen que las opiniones de otros usuarios pueden ser utilizadas para poder estimar de manera las preferencias del usuario al cual se quieren hacer recomendaciones. La idea intuitiva de esto es que si un conjunto de usuarios está en cierta medida de acuerdo en el nivel de interés que tienen sobre un conjunto de ítems, entonces deberían coincidir en la misma medida en sus preferencias [9], es decir existe una relación entre los gustos de los usuarios y que encontrando esta relación se puede estimar el nivel de interés de un usuario sobre cada ítem.

La principal diferencia entre CBF y CF es que en este último no se requiere información o *metadatos* de los ítems, además de que los perfiles del usuario se reducen a tripletas del estilo (*usuario, ítem, calificación*), donde *calificación* es un valor que refleja el nivel de interés del usuario, sobre un ítem dado. Los mecanismos que se usan para obtener esta calificación son muy variados, desde situaciones donde el usuario califica explícitamente un ítem como en *Facebook*, donde el usuario determina si una publicación le gusta, o sitios donde se le otorga una calificación numérica como *Amazon*, donde los usuarios pueden otorgar estrellas a los productos.

Dado que los perfiles de usuario son tripletas, de manera natural se pueden representar de forma matricial, donde los usuarios son las filas, los ítems las columnas y cada entrada de la matriz es la calificación correspondiente. En caso de que un usuario aún no produzca su respectiva calificación sobre un ítem tendremos un hueco en la matriz, tal y como se muestra en el ejemplo de la Fig. 3.

	A	B	C	D
u_1	3	2	2	1
u_2	3	1	2	5
u_3	$\emptyset$	5	$\emptyset$	2
u_4	5	4	2	4
u_5	2	3	4	2

Fig. 3. Matriz de calificaciones.

Basado en memoria La técnica de CF basado en memoria utiliza algoritmos que trabajan con el conjunto completo de tripletas para estimar el nivel de interés de un usuario sobre un ítem dado. Para realizar la estimación, se utilizan funciones de agregación, de tal modo que si tenemos una calificación desconocida ($r_{u,i} = \emptyset$) del usuario u sobre el ítem i , podemos hacer una estimación de su valor ($\bar{r}_{u,i}$) ya sea utilizando las calificaciones de otros usuarios *similares* a u (*Basado en usuarios*) que sí han calificado i . Otra opción es usando las calificaciones que el usuario u ha hecho sobre ítems similares a i (*Basado en ítems*).

Basado en usuarios Como su nombre lo indica, esta técnica hace recomendaciones utilizando funciones de agregación sobre los usuarios. Esta es la técnica más usada para el CF. La idea intuitiva de esta técnica es que si u y un grupo de usuarios calificó de manera similar a un conjunto de ítems, las calificaciones de este grupo a un ítem i , desconocido para u , deberían ser similares a la calificación que u haría a ese ítem. De tal manera que podemos estimar la calificación de u al ítem i con base en las calificaciones de este grupo de usuarios.

El algoritmo de los k -vecinos es el referente el CF basado en memoria[4]. De manera general este algoritmo consiste en:

1. Se calcula la similitud entre el usuario al cual se desea hacer recomendaciones (usuario u) y cada uno de los usuarios utilizando una función $sim(u, u')$.
2. Para cada ítem i recomendable al usuario u , se selecciona el conjunto de los k usuarios más similares (también llamados *vecinos*) a éste que han calificado a i . Con base en este conjunto se estima la calificación de i ($\bar{r}_{ui}$) utilizando una función de agregación.
3. Se recomiendan los m ítems que mejor calificación tengan con base en nuestras estimaciones.

Algunos ejemplos de estas funciones de agregación que se utilizan para el CF con base en usuarios son [4]:

$$\bar{r}_{u,i} = \frac{1}{N} \sum_{u' \in \hat{U}} r_{u',i}, \quad (2)$$

$$\bar{r}_{u,i} = c \sum_{u' \in \hat{U}} sim(u, u') \times r_{u',i}, \quad (3)$$

$$\bar{r}_{u,i} = \bar{r}_u + c \sum_{u' \in \hat{U}} sim(u, u') \times (r_{u',i} - \bar{r}_{u'}), \quad (4)$$

donde $\hat{U}$ es el conjunto de los N usuarios más similares a u que sí cuentan con calificaciones sobre i . El término $\bar{r}_u$ es el promedio de las calificaciones del usuario u y se define como:

$$\bar{r}_u = \left(\frac{1}{|I_u|} \right) \sum_{i \in I_u} r_{u,i}, \quad \text{donde } I_u = \{i \in I | r_{u,i} \neq \emptyset\}. \quad (5)$$

Aquí I se refiere al conjunto de todos los ítems. Y por último tenemos el término c que es un factor de normalización y en usualmente se toma como:

$$c = \frac{1}{\sum_{u' \in \hat{U}} |sim(u, u')|}. \quad (6)$$

El término $sim(u, u')$ se refiere una función que mide la similitud entre los usuarios u y u' . Como se puede observar esta función $sim(u_1, u_2)$ es parte fundamental para esta técnica más allá de la función de agregación que se escoja, por lo que en la literatura se puede encontrar una amplia gama de funciones para calcular la similitud entre usuario [2,4,14], las más usadas son: *correlación de Pearson (COR)*, *coseno (COS)*, *COR constreñido (CPC)*, *correlación de ranqueo de Spearman (SRC)*, *Error cuadrático medio (MAE)* [4].

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de predicciones utilizando CF basado en usuarios retomado del ejemplo propuesto en [4, p. 114]. En este caso se utilizan tres vecinos ($k = 3$) y queremos recomendar tres ítems ($m = 3$). Se utilizó el

Fig. 4. Ejemplo del algoritmo k -vecinos

promedio como función de agregación (ecuación 2) y el error cuadrático medio para calcular la similitud entre usuarios.

Para estimar las calificaciones que el usuario 4 asignaría a los ítems 1, 3, 4, 7, 8, 9 y 11, que son los ítems que este usuario aun no califica, iniciamos calculando la similitud del usuario 4 con los demás utilizando el error cuadrático medio. Por ejemplo tomemos la similitud entre los usuarios 4 y 5:

$$C_{ab} = \{5, 6, 10\}, n = |C_{ab}| = 3.$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 \text{sim}(4, 5) &= 1 - \frac{1}{n} \sum_{i \in C_{ab}} |r_{4,i} - r_{5,i}|^2 \\
 &= 1 - \frac{|r_{4,5} - r_{5,5}|^2 + \dots + |r_{4,10} - r_{5,10}|^2}{3} \\
 &= 1 - \frac{|5 - 5|^2 + |4 - 4|^2 + |5 - 5|^2}{3} = 1 - \frac{0}{3} = 1.
 \end{aligned}$$

Entonces seleccionamos a los k usuarios más cercanos, en este caso 2, 5 y 7. Con estos usuarios estimamos las calificaciones desconocidas usando la función de agregación seleccionada. Si tomamos como ejemplo el ítem 3, tendríamos que $\hat{U} = \{2, 7\}$ y por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 \bar{r}_{4,3} &= \frac{1}{2} \sum_{u' \in \hat{U}} r_{u',3} = \frac{1}{2} (r_{2,3} + r_{7,3}) \\
 &= \frac{1}{2} (1 + 1) = \frac{2}{2} = 1.
 \end{aligned}$$

Por último seleccionamos los m ítems con las estimaciones más altas para formar nuestra lista de recomendaciones, es decir, recomendamos los ítems 1, 7 y 9. Cabe destacar que no se puede calcular la similitud entre los usuarios 4 y 1 con la función de similitud seleccionada. Esto debido a que la expresión $\frac{1}{n}$ queda

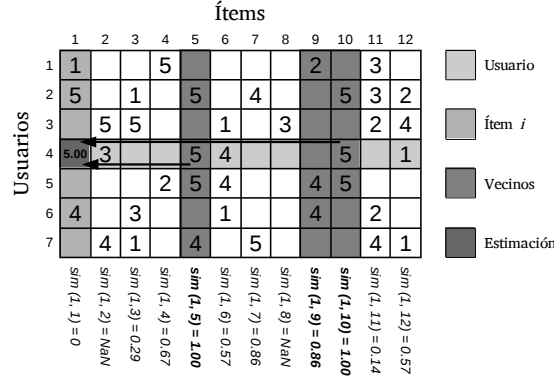


Fig. 5. Estimación para el ítem de la calificación de i ($\bar{r}_{ui}$) usando el algoritmo k -vecinos basado en ítems.

indeterminada al no existir ítems que ambos usuarios hayan calificado, por lo que el usuario 1 no se tomó en cuenta. De igual forma, no se puede estimar la calificación para el ítem 8 debido a que ninguno de los k usuarios más cercanos lo ha calificado. En muchos se calcula de antemano una matriz de similitud entre usuarios, de tal forma que cuando se desee hacer recomendaciones, solo se consulta esta, aunque esto tiene la desventaja de que cada vez que se agrega un ítem, usuario o calificación, se requiere volver a calcular la matriz de similitudes.

Basado en ítems El CF basado en ítems es casi idéntico al basado en usuarios, pero como su nombre indica, las funciones de similitud y de agregación se realizan sobre los ítems. En este caso para estimar el valor de $\bar{r}_{ui}$, en lugar de tomar los usuarios parecidos a u que han calificado i se toman los ítems más parecidos a i que el usuario u a calificado.

En este caso el proceso a seguir para recomendar ítems al usuario sería:

1. Para cada ítem i recomendable al usuario u :
 - a) Se calcula su similitud con los ítems que u ha calificado, usando una función de similitud entre ítems ($sim(i, i')$).
 - b) De los ítems que u ha calificado se seleccionan los k más similares a i y se utiliza una función de agregación para estimar la calificación del ítem i ($\bar{r}_{ui}$)
2. Se recomiendan los m ítems que mejor calificación tengan con base en nuestras estimaciones.

En el ejemplo de la Fig. 5 se puede observar la estimación de la calificación del usuario 4 al ítem 1 ($\bar{r}_{1,1}$).

De igual forma que en el CF basado en usuarios, es común que se almacene una matriz de similitud entre ítems para optimizar el tiempo de respuesta al calcular la lista de ítems recomendados.

Basado en confianza También llamados recomendaciones sociales. En esta técnica las recomendaciones se basan en la confianza entre usuarios. Es similar al filtrado colaborativo con base en usuarios pero en este caso la noción de *vecinos* y *similitud* entre usuarios es remplazada por *amigos* y *confianza* entre usuarios respectivamente. Bajo esta perspectiva, es el propio usuario quien elige a sus *vecinos*, nombrados ahora *amigos*. Y ahora se agrega una función de confianza para emular el escenario de amigos de mis amigos. Esto se basa en la idea de que las personas confían en las opiniones de sus amigos y confían en las opiniones de amigos de sus amigos en mayor o menor medida[13]. De tal manera que se puede modificar la técnica de CF con base en usuarios descrita en la sección “2.2 Basado en usuarios” y remplazar las funciones de *similitud* por una nueva función que determine la confianza entre usuarios.

De qué manera modelar la confianza y así poder determinar ésta entre dos usuarios se ha convertido en una tarea indispensable en muchas ramas de la web social, como la seguridad, la computación en nube e incluso en el ámbito de los SRs. Se han propuesto varios modelos para determinar la confianza entre usuarios e incorporarlos dentro de técnicas de SR. Algunos ejemplos de éstos modelos son: Modelo de Simon, MoleTrust, TidalTrust, Modelo de O’Donovan[22,18,11,20].

Basado en modelos A diferencia de los SRs basados en memoria, esta técnica de SR basados hacen recomendaciones construyendo previamente un modelo con base en las calificaciones de los usuarios. Se ataca el problema de las estimaciones como un problema de datos perdidos o de clasificación [15] y se utilizan algoritmos de *machine learning* como redes neuronales, redes bayesianas, clustering o incluso toman inspiración de algoritmos de otro tipo de problemas como factorización de matrices. Una ventaja de estas técnicas, es que son más rápidas al momento de estimar la relevancia de los ítems, aunque su desventaja es que al agregar nuevos datos, ya sea usuarios, ítems o calificaciones, el modelo necesita ser actualizado.

Slope One La técnica de *Slope One* [17] considera que se puede estimar una calificación desconocida a partir de una función lineal de otro valor conocido, de tal forma que tenemos:

$$\bar{r}_{ui} = f(r_{uj}) = r_{uj} + \delta_{ij}. \quad (7)$$

Por lo que el problema se reduce a encontrar δ_{ij} para cada par de ítems. Formalmente, dados dos vectores $v = (v_1, \dots, v_n)$ y $w = (w_1, \dots, w_n)$, buscamos una función $f(x) = x + \delta$ para predecir w a partir de v minimizando la expresión $\sum_{i=1}^n (v_i + \delta - w_i)^2$. Derivando la expresión con respecto a δ , igualando a cero y despejando tenemos que $\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - v_i)$. Por lo tanto δ es el promedio de la diferencia de cada entrada.

Ahora para encontrar δ_{ij} necesitamos un conjunto de usuarios $\hat{U}_{ij}$ tal que éstos hayan calificado ambos ítems (los ítems i y j) y calculamos el promedio de las diferencias:

$$\delta_{ij} = \frac{1}{|\hat{U}_{ij}|} \sum_{u \in \hat{U}_{ij}} (r_{uj} - r_{ui}). \quad (8)$$

Dado que ya tenemos un estimador de $\bar{r}_{uj}$ dado r_{ui} podemos sacar la estimación promedio usando el conjunto (R_u) de todos los ítems que ha calificado el usuario u :

$$\bar{r}_{uj} = \frac{1}{|R_u|} \sum_{i \in R_u} (r_{ui} + \delta_{ij}). \quad (9)$$

Redes Bayesianas Al igual que en los SRs basados en memoria los SRs que utilizan modelos basados en redes bayesianas estiman el valor de calificación $\bar{r}_{ui}$ como una función de agregación de las calificaciones que se tienen de otros usuarios, pero en este caso se hace una suma ponderada por un factor de probabilidad [8].

Clustering La técnica de *clustering* o *k-medias* divide el conjunto de usuarios en k subconjuntos de tal manera que los elementos de cada conjunto estén lo más cerca posible en relación a una medida de distancia dada. Cada conjunto C_j (*clouster* C_j) está definido por N_j elementos y un centroide λ_j . Este centroide λ_j es un punto donde se minimiza la suma de las distancias de éste con todos los elementos que pertenecen al clouster C_j [21].

Trasladándolo a los SRs, si tomamos elemento x_n como las calificaciones del usuario n sobre el conjunto de ítems, se puede usar esta técnica para determinar el cluster C_j al que pertenece el usuario y tomar los valores λ_j para estimar los valores para los ítems que el usuario no a calificado.

Factorización de matrices La idea detrás de esta técnica es que existen factores latentes que pueden explicar por qué un usuario le da cierta calificación a un ítem dado. En caso de hablar de películas, estos factores pueden ser el genero, los actores, la historia etc. de tal manera que la calificación que el usuario u da a un ítem i tomando en cuenta estos f factores, se puede expresar como:

$$r_{ui} = q_i p_u^T, \quad (10)$$

donde q_i y p_u son vectores en $\mathbb{R}^f$ donde cada entrada se refiere a cada uno de estos factores latentes. En el caso de q_i , cada elemento refleja el grado de apego al factor dado y cada elemento de p_u refleja la relevancia de ese factor para los gustos del usuario.

Si hacemos esto para cada usuario y cada ítem, se puede construir una matriz R de tal forma que:

$$R = QP^T, \quad (11)$$

donde cada fila de Q corresponde a cada uno de los vectores q_i y las filas de P son cada uno de los vectores p_u . Entonces el problema se convierte en tratar de estimar las matrices Q y P tomando como base la matriz de calificaciones usando por ejemplo *descomposición en valores singulares* (SVD) [3, p. 44].

2.3. Sistemas de recomendación híbridos

Los SRs híbridos combinan varias técnicas de SR para mejorar las recomendaciones y mitigar los problemas particulares que presenta cada una de ellas.

La idea principal de esta aproximación es combinar distintas técnicas de SR de tal manera que preserven las virtudes de cada una y que las desventajas de una técnica particular pueden ser mitigadas con las propiedades de las otras [14,13].

Existen varias aproximaciones para combinar diferentes técnicas de SR, como ejemplo de las comúnmente usadas tenemos las siguientes técnicas:

Híbridación ponderada En esta técnica de hibridación se combinan las estimaciones de dos o más SRs utilizando una combinación lineal entre ellas de tal forma que se puede ponderar la importancia o relevancia que tendrán las estimaciones hechas por cada SR que se están combinando al asignar distintos pesos (coeficientes) a cada uno de ellas [13]. De tal manera que tendríamos:

$$\bar{r}_{hui} = \sum_{j \in \widehat{SR}} \alpha_j \bar{r}_{jui}, \quad (12)$$

donde:

- $\bar{r}_{hui}$ Es la estimación final de nuestro SR híbrido,
- $\bar{r}_{jui}$ Es la estimación del SR j del conjunto de SRs que estamos combinando ($\widehat{SR}$),
- α_j Es el factor de ponderación para el SR j . De tal forma que:
 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$ y $0 < \alpha_j < 1 \ \forall j \in \widehat{SR}$.

Híbridación en cascada La técnica de hibridación en cascada consiste en filtrar los ítems de manera escalonada. Como se muestra en la Fig. 6, se toma uno de los SRs (SR_1) de los que se desea combinar y se calcula un conjunto de ítems candidatos usando las estimaciones de éste. Se vuelve a filtrar el conjunto anterior con la siguiente técnica de SR elegida (SR_2) y se recomienda el conjunto de ítems resultante (SR_h).

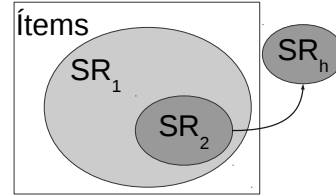


Fig. 6. Hibridación en cascada.

Híbridación por selección En este caso, se calcula la estimación de cada uno de los sistemas de recomendación a combinar y con base en un conjunto de condiciones se selecciona el valor para la estimación global [5]. De tal manera que tenemos:

$$\bar{r}_{hui} = \begin{cases} \bar{r}_{1ui} & \text{si } \text{cond}_1(\bar{r}_{1ui}, \dots, \bar{r}_{nui}), \\ \bar{r}_{2ui} & \text{si } \text{cond}_2(\bar{r}_{1ui}, \dots, \bar{r}_{nui}), \\ \vdots & \\ \bar{r}_{nui} & \text{si } \text{cond}_n(\bar{r}_{1ui}, \dots, \bar{r}_{nui}), \end{cases} \quad (13)$$

donde $cond_j(\bar{r}_{1ui}, \dots, \bar{r}_{nui})$ es la condición que debe cumplirse para seleccionar la estimación del SR j ($\bar{r}_{jui}$). Esta notación es para generalizar la estructura y a pesar de que indicamos que se utilizan todas las estimaciones para calcular la condición, puede ser que éstas sólo involucren algunas de las estimaciones, como por ejemplo:

$$\overline{r}_{hui} = \begin{cases} \overline{r}_{1ui} & \text{si } \overline{r}_{1ui} \neq null, \\ \overline{r}_{2ui} & \text{si } \overline{r}_{1ui} = null. \end{cases} \quad (14)$$

Hibridación por mezcla Esta técnica de hibridación mezcla las recomendaciones de varios SRs en una lista de recomendaciones global. Trabaja sobre los rankings generados a partir de las estimaciones del nivel de interés del usuario sobre los ítems recomendables.

Supongamos que queremos combinar tres SRs (SR_1 , SR_2 y SR_3) y que tenemos tres ítems recomendables (A , B y C) de los cuales se obtuvieron las estimaciones que se muestra el tabla (a) para el usuario u . Al calcular los rankings tenemos los resultados como se muestra en la tabla (b) y utilizando el algoritmo de votación de Hare [3, p. 322] obtenemos como resultado el ranking de la tabla (c):

	A	B	C
SR₁	3	5	4
SR₂	2	4	3
SR₃	4	6	3

	Ranking		
SR₁	B	C	A
SR₂	B	C	A
SR₃	B	A	C

	Ranking		
SR_h	B	C	A

3. Comparación de técnicas de filtrado

Al intentar estimar el nivel de interés que el usuario puede tener sobre el conjunto de ítems recomendables, se presentan una serie de problemas colaterales que han propiciado el desarrollo de una gran variedad de técnicas para intentar subsanar uno o varios de estos. A continuación se listan los más importantes:

Serendipia La serendipia se define como la ocurrencia de un evento afortunado poco probable. Cuando el SR carece de ésta, se puede dar el caso de que a pesar de existir ítems de interés para el usuario, éstos se dejen de lado por tener muy poca similitud con los ítems por los que el o los usuarios han mostrado interés [16]. Este rasgo se considera una especie de sobre-especialización. Por ejemplo, supongamos que tenemos un sistema donde los ítems son canciones. El usuario gusta de canciones de Rock de los años 70, pero sólo ha reproducido canciones del genero Pop, por lo que el SR no recomendaría las canciones de Rock ya que el usuario no ha mostrado interés en ellas.

Arranque en frío También llamado “*cold start*”, ocurre cuando no se tiene suficiente información para generar una buena aproximación. Ya sea porque no se cuenta con un conjunto de calificaciones sobre un ítem dado o no se cuenta con información sobre los gustos del usuario. Este es un caso frecuente ya que se produce cuando un sitio es puesto en línea por primera vez o se agrega un nuevo usuario/ítem al sistema [4].

Usuarios maliciosos Se produce cuando usuarios intentan manipular el SR para que oculte/muestre ciertos ítems. Por ejemplo, un usuario podría dar una buena calificación a un libro que él mismo escribió y crear varios usuarios ficticios para votar por su libro. De esta manera, podría sesgar el SR para mostrar más a menudo dicho libro [18].

Escalabilidad Este problema se presenta cuando el volumen de los datos (número de usuario y/o número de ítems) comienza a crecer [14]. Una técnica de SR puede funcionar bien bajo un conjunto de datos limitado, pero la eficiencia y desempeño puede decaer al punto de ser no ser plausible cuando la cantidad de datos se incrementa.

Contexto del usuario En muchas de las técnicas utilizadas por los SRs se utiliza la calificación de otros usuarios sobre un ítem dado para estimar el nivel de interés que el usuario objetivo tiene sobre éste. Se busca los usuarios *similares*, entendiendo similar como que ha demostrado apreciaciones similares en varios ítems, pero dentro de esta similitud no se toma en cuenta el trasfondo de la calificación. Por ejemplo, puede que a dos usuarios les guste la misma película y que hayan asignado la misma calificación a ésta, pero mientras el primero sólo está interesado en la fotografía, el otro la considera una buena película por los actores involucrados [1].

Dificultad de implementación En muchos casos el SR resulta difícil de implementar. Por ejemplo puede requerir de un esfuerzo extra por parte de los usuarios, como es el caso del CBF, o porque se requiere de un entendimiento profundo del contexto de los ítems o de los usuarios a pesar de que en la parte computacional sea relativamente sencillo de procesar. En otro casos, la solución computacional exige herramientas y conocimientos extra, como es el caso de los SRs basados en modelos.

En la tabla 1 se desglosan brevemente los problemas comunes en SRs y si afecta o no a cada técnica descrita.

4. Otras áreas de investigación en sistemas de recomendación

Recomendaciones con base en dominios cruzados

La idea detrás de esta área de investigación es que se pueden mejorar las recomendaciones haciendo uso de la información recolectada en distintos sistemas (nombrados *dominios*), de tal modo que se pueda construir un perfil unificado y más completo del usuario juntando la información recolectada en cada sistema mejorando las recomendaciones en cada uno de ellos.

Tabla 1. Comparación de sistemas de recomendación

			Serendipia	Arranque en frío	Usuarios maliciosos	Escalabilidad	Contexto del usuario	Dificultad al implementar
Basado en contenido			N	N	N	N	N	S
Filtrado colaborativo	Basado en memoria	Usuarios	S	S	S	S	S	N
		Ítems	S	S	S	S	S	N
	Basado en confianza		N	S	N	S	S	M
	Basado en Modelos	Red bayesiana	S	N	S	N	N	M
		Slope One	S	N	S	N	N	N
		Clustering	S	N	S	N	N	M
		Factorización de matrices	N	N	S	N	N	M
Híbridos			N	N	N	N	N	S

N = no afecta, S = sí afecta, M = un punto intermedio

Sistemas sociales de etiquetado STS (Social Tagging Systems)

Hoy en día existen muchos sitios Web que permiten al usuario publicar y compartir contenido propio, como por ejemplo: Flickr, Delicious o Youtube. Muchos de estos sitios permiten a los usuarios caracterizar sus contenidos con etiquetas (*tags*) de texto sin ninguna restricción en los términos que se utilizan. Para evitar ambigüedad y mejorar el etiquetado se busca un SR que oriente a los usuarios sobre los términos a usar, esto bajo la idea de que dos contenidos similares deberían tener etiquetas similares y que el sistema puede hacer uso de las etiquetas de otros contenidos para extraer las más relevantes para el usuario en orden de etiquetar su contenido [19].

Problemas de privacidad en SRs

Los SRs recolectan información acerca del usuario a lo largo del tiempo, de tal manera que las recomendaciones personalizadas van siendo mejores, pero esto tiene un impacto negativo en la privacidad ya que el usuario puede comenzar a sentir que el sistema sabe demasiado acerca de él y temer que gente externa pueda obtener su información sensible. Por lo que ha surgido la necesidad de crear mecanismos que mantengan la privacidad, evitando que la información sea visible para agentes maliciosos pero al mismo tiempo permita al SR hacer recomendaciones acertadas [7].

Integración de las preferencias a corto y largo plazo

Actualmente los SRs hacen recomendaciones utilizando el conjunto completo de los datos sobre los intereses del usuario que se han recolectado hasta el momento sin tomar en cuenta que éstos pueden diferir a lo largo del tiempo o que en este instante de tiempo el usuario tiene gustos particulares [10].

5. Conclusiones

Los SRs están cada vez más presentes en la vida diaria del ser humano. Las personas los usan consciente o inconscientemente para encontrar información en diferentes contextos tales como libros, música, noticias, viajes e incluso relaciones románticas. Cada vez más sistemas informáticos que ofrecen productos, servicios o simplemente información tienen inmersos algún tipo de SR para apoyar a las personas a escoger entre las innumerables alternativas que éstos ofrecen.

Los SR basados en memoria en general dan buenos resultados si se tiene suficiente información y son simples de implementar y entender; en términos de estimaciones puntuales la mejor técnica hasta el momento parece ser SVD, la cual gana el “*Netflix’s prize*” [23] en el 2009.

Alrededor del tema de SR se ha creado una comunidad de investigación creciente, que intenta innovar y solventar los muchos problemas que aún se encuentran por resolver. Para abrir nuevas líneas de investigación en esta área, la intuición por sí sola ya no es suficiente y es necesario un enfoque multidisciplinario para traer mejores herramientas que puedan ayudar a explotar el inmenso potencial de los SR en aplicaciones del mundo real.

Referencias

1. Adomavicius, G., Tuzhilin, A.: Toward the Next Generation of Recommender Systems: A Survey of the State-of-the-Art and Possible Extensions. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering* 4(6), 734–749 (2005), <http://pages.stern.nyu.edu/TILDEatuzhili/pdf/TKDE-Paper-as-Printed.pdf>
2. Amatriain, X.: Recommender Systems . Machine Learning Summer School 2014 @ CMU (July 2014), <http://www.slideshare.net/xamat/recommender-systems-machine-learning-summer-school-2014-cmu/>
3. Blum, A., Hopcroft, J., Kannan, R.: Foundations of Data Science (2015), <https://www.cs.cornell.edu/jeh/book2016June9.pdf>
4. Bobadilla, J., Ortega, F., Hernando, A., Gutiérrez, A.: Recommender systems survey. *Knowledge-Based Systems* 16(46), 109–132 (April 2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2013.03.012>
5. Burkner, R.: Hybrid Recommender Systems: Survey and Experiments. User Modeling and User-Adapted Interaction (2002), <http://josquin.cs.depaul.edu/TILDErburke/pubs/burke-umuai02.pdf>
6. Candillier, L., Jack, K., Fessant, F., Meyer, F.: Collaborative and Social Information Retrieval and Access: Techniques for Improved User Modeling (2009), https://www.researchgate.net/publication/275890626_State_of_the_Art_Recommender_System
7. Canny, J.: Collaborative Filtering with Privacy via Factor Analysis (August 2002), <https://people.eecs.berkeley.edu/~jfc/papers/02/SIGIR02.pdf>
8. Dechoux, B.: Recommender Systems Naive Bayes Networks and the Netflix Prize (January 2009), http://lemire.me/fr/documents/publications/lemiremaclachlan_sdm05.pdf
9. Ekstrand, M.D., Riedl, J.T., Konstan, J.A.: Collaborative Filtering Recommender Systems. NOW the essence of knowledge 4(2), 81–173 (2011), <http://files.grouplens.org/papers/FnTCFRecsysSurvey.pdf>

10. Francesco Ricci, L.R., Shapira, B.: Introduction to Recommender Systems Handbook (October 2010), <http://www.inf.unibz.it/~ricci/papers/intro-rec-sys-handbook.pdf>
11. Golbeck, J.A.: Computing and Applying Trust in Web-based Social Networks. Ph.D. thesis, University of Maryland at College Park (2005), https://www.researchgate.net/publication/243786854_Computing_and_Applying_Trust_in_Web-Based_Social_Networks
12. Hanani, U., Shapira, B., Shoval, P.: User Modeling and User-Adapted Interaction. Information Filtering: Overview of Issues, Research and Systems 11 (2001), <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1011196000674>
13. Haydar, C.A.: Les systèmes de recommandation à base de confiance. Ph.D. thesis, Université de Lorraine, France (September 2014), <http://docplayer.fr/storage/23/1891872/1481315000/N5fnyTd388np0He6T33jEg/1891872.pdf>
14. Isinkaye, N., Folajimi, Y., Ojokoh, B.: Recommendation systems: Principles methods and evaluation. Egyptian Informatics Journal 16(20), 262–271 (Agosto 2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.005>
15. Iván, C.G.: Exploiting the conceptual space in hybrid recommender systems: a semantic-based approach. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma de Marid, Spain (October 2008), <http://josquin.cs.depaul.edu/rburke/pubs/burke-umuai02.pdf>
16. Lakshmi, S.S., Lakshmi, T.A.: Recommendation Systems: Issues and challenges. International Journal of Computer Science and Information Technologies 5(4), 5771–5772 (2014), <http://www.ijcsit.com/docs/Volume5/vol5issue04/ijcsit20140504207.pdf>
17. Lemire, D., Maclachlan, A.: Slope One Predictors for Online Rating-Based Collaborative Filtering (February 2005), http://lemire.me/fr/documents/publications/lemiremaclachlan_sdm05.pdf
18. Massa, P., Avesani, P.: Trust-aware Collaborative Filtering for Recommender Systems. Via Sommarive 4(4), 1–17 (2005), <https://pdfs.semanticscholar.org/2512/182cf3c4d7b3df549456fbc0a77c3954.pdf>
19. Musto, C., Narducci, F., Gemmis, M.D., Lops, P., Semeraro, G.: A Tag Recommender System Exploiting User and Community Behavior (October 2009), <https://pdfs.semanticscholar.org/e50b/ebdd1ed1f3c6a1107ef6c78697c234982bed.pdf#page=40>
20. O'Donovan, J., Smyth, B.: Trust in recommender systems. Proceedings of the 10th international conference on intelligent user interfaces ACM p. 167–174 (2005), https://www.researchgate.net/profile/Barry_Smyth/publication/221608315_Trust_in_recommender_systems/links/0fcfd50f3fa6b4ec86000000.pdf
21. Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B., Kantor, P.B.: Recommender Systems Handbook, vol. 1 (2011), http://www.cs.ubbcluj.ro/TILDEgabis/DocDiplome/SistemeDeRecomandare/Recommender_systems_handbook.pdf
22. Simon, M., Lionel, M., Frédérique, L.: Recommandation sociale et locale basée sur la confiance. Document numérique pp. 33–56 (2012), https://www.researchgate.net/publication/274665784_Recommandation_sociale_et_locale_basee_sur_la_confiance
23. Wikimedia Foundation, Inc: Netflix Prize (February 2017), https://en.wikipedia.org/wiki/Netflix_Prize

Modelo de inferencia difuso para clasificación de estilos de aprendizaje con base en el Test de Honey-Alonso

Alvaro de Reza Estrada¹, Sandra Silvia Roblero Aguilar^{1,2},
Héctor Rafael Orozco Aguirre², Saturnino Job Morales Escobar²

¹ Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México,
México

² Centro Universitario UAEM Valle de México, Estado de México,
México

dealva_10@hotmail.com, ssrauaemex@hotmail.com, rafilla.orozco@gmail.com,
sjob_d@yahoo.com

Resumen. Es fundamental para las Instituciones de Educación Superior mejorar el nivel de aprovechamiento académico de sus estudiantes ofreciéndoles atención y servicios de apoyo. En el Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, México, se han implantado programas de atención personalizada preparando tutores académicos. Hasta el momento, un problema sin una solución total es la correcta identificación del estilo de aprendizaje de cada estudiante. En este artículo, se presenta un modelo que utiliza un mecanismo de inferencia difuso para clasificar los diferentes estilos de aprendizaje de acuerdo con el test de Honey-Alonso. La clasificación obtenida es con la intención de contribuir al programa de tutorías de los alumnos, y asistir a los tutores en la toma de decisiones para definir estrategias de aprendizaje con base en el estilo identificado, dando seguimiento a cada estudiante, desde su ingreso hasta la conclusión de su carrera profesional.

Palabras clave: modelo difuso, estilos de aprendizaje, test Honey-Alonso, clasificación.

Fuzzy Inference Model for Classification of Learning Styles Based on the Honey-Alonso Test

Abstract. For Higher Education Institutions is fundamental to improve their students' academic achievement level by offering them attention and support services. At the Technological Institute of Tlalnepantla, Mexico, programs of personalized attention preparing academic tutors have been implanted. So far, a problem without a total

solution is the correct identification of each student's learning style. In this article, a model that uses a fuzzy inference mechanism to classify the different learning styles according to the Honey-Alonso test is presented. The obtained classification is with the intention of contributing to the students' tutoring program, and assisting tutors in decision making to define learning strategies based on the identified style, following each student up as well, since its entrance to the conclusion of its professional career.

Keywords: fuzzy model, learning styles, Honey-Alonso test, classification.

1. Introducción

Una de las características más importantes del ser humano, es la capacidad de observar, comprender, aprender, razonar y experimentar. Lo que se traduce en el comportamiento humano, que ha llevado a muchos estudiosos del tema a adentrarse a analizar los factores que intervienen en el comportamiento. Las últimas investigaciones en la neurofisiología y en la psicología han dado como resultado un nuevo enfoque sobre cómo los seres humanos aprenden: no existe una sola forma de aprender, cada persona tiene una forma o estilo particular de establecer relación con el mundo y por lo tanto para aprender [1]. Con respecto a este enfoque, se han desarrollado modelos que aproximan una clasificación de estas distintas formas de aprendizaje.

Para apoyar el proceso de enseñanza-aprendizaje, el Instituto Tecnológico de Tlalnepantla (ITTTLA) ha implementado desde 2007, como una estrategia educativa, el programa de tutorías académicas. Uno de sus principales propósitos, es contribuir al mejoramiento del desempeño académico de los estudiantes, con la intención de superar los obstáculos que se presentan durante este proceso, como son: bajos niveles de desempeño, repetición, rezago, deserción, y baja eficiencia terminal [2].

Tabla 1. Eficiencia terminal del ITTLA por cohorte generacional 2005-2011.

Cohorte generacional	% Eficiencia terminal
2005 - 2006	21.90
2006 - 2007	14.56
2007 - 2008	19.51
2008 - 2009	24.77
2009 - 2010	22.60
2010 - 2011	16.82

Sin embargo, los resultados hasta el momento no han sido los esperados, por ello, resulta pertinente mostrar el comportamiento de la eficiencia terminal de los últimos cohortes generacionales reportados por el departamento de servicios escolares del ITTLA. En la

Tabla 1, se puede observar que la eficiencia terminal más alta que se ha alcanzado en el ITTLA es del 24.77%, valor muy bajo, si consideramos que a nivel nacional este indicador es del 50.30% [3].

Una forma de fortalecer el proceso de tutoría académica y definir estrategias dirigidas a incrementar el índice de eficiencia terminal sería identificando los estilos de aprendizaje (EAs) de los estudiantes. El test empleado en esta investigación es el de Honey-Alonso, ya que de acuerdo a la literatura y para fines de este trabajo, el diseño orientado a estudiantes con nivel universitario se ajusta, además de describir los estilos más detalladamente y de basarse en la acción de los sujetos [4].

Es por ello, que en el ITTLA se desarrolló esta investigación y en este documento se muestra un modelo que utiliza un mecanismo de inferencia difuso para clasificar los EAs de los estudiantes de nuevo ingreso con base en el Test de Honey-Alonso. La clasificación obtenida, ayudará a los expertos a la toma de decisiones para definir las estrategias de aprendizaje, así como dar seguimiento a cada uno de los alumnos desde el momento de su ingreso a la institución.

2. Trabajos relacionados

Existen trabajos referentes a EAs y lógica difusa, por ejemplo, en 2014 [5] Huayapa et al. presentaron un “modelo del estudiante basado en lógica difusa” el cual hace referencia al modelado del estudiante enfocado a sus aspectos cognitivos, utilizaron el modelo de Felder o la taxonomía de Bloom, y aplicaron lógica difusa por la naturaleza con que se maneja la incertidumbre que representa la información relativa a EA.

En 2015, el trabajo “mejoramiento de la adaptación usando lógica difusa” [6] presenta un módulo de un modelo del estudiante en un ambiente virtual de aprendizaje, con el fin de promocionar la personalización de materiales instruccionales basada en los niveles de conocimientos dinámicos y EA. Así, utilizando dos variables de entrada (nivel de conocimiento y EA) y dos variables de salida (dificultad y complejidad), y con base en el test Felder-Silverman, se traduce el nivel de conocimiento en perfiles dinámicos que refleja el avance del estudiante.

En [7] se propone una “metodología para la creación de objetos de aprendizaje adaptables al EA del estudiante” en la modalidad e-Learning. La metodología se basa en el modelo de Felder y Silverman de estilos de aprendizaje y la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial como la programación neurolingüística (PNL).

Otro trabajo publicado en 2016, es un “sistema difuso para la detección automática de EAs en ambientes de formación web” [8] que propone un modelo difuso para detectar EAs para un entorno formativo orientado a la web (ambientes virtuales de aprendizaje), con el fin de desarrollar sistemas adaptativos/personalizados a los intereses y capacidades de los estudiantes. En ese trabajo, se realizó una adaptación del test Felder-Silverman con el objetivo de definir las variables difusas.

3. Estilos de aprendizaje

Alonso, Gallego y Honey [4] hacen suya la definición que Keefe propone en 1982 [9] acerca de los EAs: éstos son rasgos cognitivos, afectivos y fisiológicos, con relativa estabilidad temporal, que indican cómo perciben, interaccionan y responden a sus ambientes quienes aprenden, por ejemplo, los estudiantes de una universidad, quienes participan en algún proceso de capacitación. Una manera más simple de decirlo es que los EAs son preferencias y tendencias altamente individualizadas, que influyen en la manera de aprender de las personas.

Se han desarrollado distintos modelos y teorías sobre EAs los cuales ofrecen un marco conceptual que permite entender los comportamientos diarios en el aula, cómo se relacionan con la forma en que están aprendiendo los alumnos y el tipo de acción que puede resultar más eficaz en un momento dado, las más conocidas son de Kolb [10] y de Honey & Mumford [11]

P. Honey y A. Mumford [11] proponen cuatro estilos de aprendizaje, que a su vez son cuatro fases de un proceso cíclico de aprendizaje basado en el modelo de Kolb, algunas de sus características se describen como sigue:

- **Activo:** las personas se implican plenamente y sin prejuicios en nuevas experiencias. Son de mente abierta y acometen con entusiasmo nuevas tareas. Les encanta vivir nuevas experiencias. La pregunta que quieren responder es el ¿Cómo?
- **Reflexivo:** les gusta considerar las experiencias y observarlas desde diferentes perspectivas. Reúnen datos, analizándolos con detenimiento antes de llegar a alguna conclusión. La pregunta que quieren responder es el ¿Por qué?
- **Teórico:** adaptan e integran las observaciones dentro de teorías lógicas y complejas. Enfocan los problemas de forma vertical escalonada, por etapas lógicas. Tienden a ser perfeccionistas. La pregunta que quieren responder es el ¿Qué?
- **Pragmático:** el punto fuerte de estas personas es la aplicación práctica de las ideas. Descubren el aspecto positivo de las nuevas ideas y aprovechan la primera oportunidad para experimentarlas. La pregunta a responder es el ¿Qué pasaría si...?

Honey y Alonso [4] proponen una variante del Test de Honey y Mumford, conocido como Cuestionario Honey-Alonso de Estilos de Aprendizaje (CHAEA), dicho test consta de 80 ítems breves y se estructura en cuatro grupos o secciones de 20 ítems correspondientes a los cuatro EAs (activo, reflexivo, teórico y pragmático). Todos los ítems están distribuidos aleatoriamente formando un solo conjunto. Al respecto, se puede decir, que este test, se ha aplicado en diferentes instituciones de nivel superior, confirmando con ello, que los resultados obtenidos dejan precedentes en la investigación pedagógica y han servido de base para otras investigaciones en países iberoamericanos [12].

4. Generalidades de la lógica difusa

En ocasiones el ser humano no cuenta con información precisa para crear modelos matemáticos convencionales, dada la vaguedad de los datos y la necesidad de modelar el razonamiento humano, de estas razones es que nace la lógica difusa.

La lógica difusa es usada para describir un sistema lógico impreciso, basado en subconjuntos difusos por medio de variables lingüísticas [13]. De tal modo, la lógica difusa se basa en reglas lingüísticas dictadas por expertos, con el fin de tratar lo difuso de manera sistemática pero no del todo cuantitativa, debido a que los elementos clave del pensamiento humano no son números, si no conceptos que pueden ser representados mediante conjuntos difusos como “alto”, “muy inteligente”, “casi verdad”.

La lógica difusa utiliza principalmente dos conceptos: graduación y granulación, siendo estos el núcleo y características principales de la lógica difusa [14], por lo que la graduación significa que a todo dato al que se le emplea es o se le permite que sea graduado, en donde las fronteras entre un estado y otro no están definidas nítidamente, por otro lado, Zadeh [15] define granulación como “el uso de palabras vistas como una forma de cuantificación difusa”, en la Fig. 1 se observa la diferencia entre cuantificación y granulación, en donde se representa la granulación por medio de etiquetas lingüísticas como: bajo, medio, o muy alto, en donde, dichas etiquetas representan un valor cuantitativo.

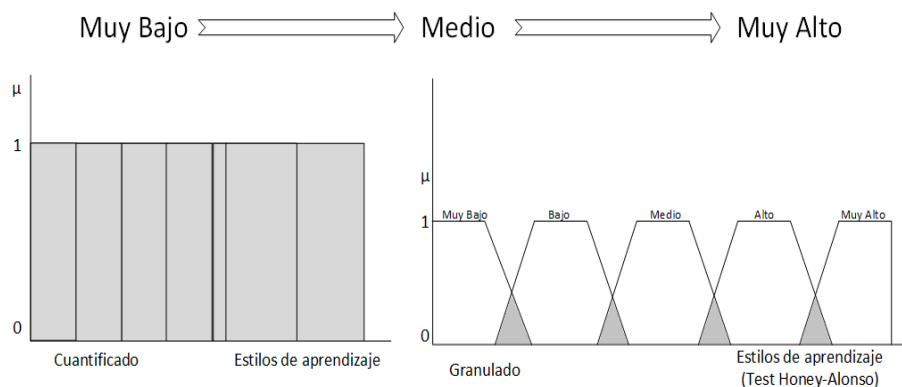


Fig. 1. Graduación y granulación en la lógica difusa.

La lógica difusa hace uso de la teoría de conjuntos difusos, con el fin de dar un grado de membresía o pertenencia a sus variables lingüísticas, lo que permite aceptar una membresía parcial a ciertos conjuntos, generalizando en cierta medida a la teoría de conjuntos clásicos [16].

Con el fin de modelar información, la inferencia difusa es el proceso de mapear variables de entrada a un espacio de salida basado en un mecanismo de lógica difusa comprendido por las reglas Si-Entonces, las funciones de pertenencia y los operadores lógicos difusos.

4.1. Funciones de pertenencia

Lofti A. Zadeh [17] define a un conjunto difuso como una clase de objetos con una continuidad de grados de pertenencia. Dicho conjunto está caracterizado por una función de pertenencia, por lo tanto, la función asigna a cada objeto un grado de pertenencia, tal grado de pertenencia se encuentra dado por los valores dentro del rango de 0 y 1.

En este sentido, los conjuntos difusos permiten trabajar con conceptos que no tienen límites claros, con transición gradual. Mientras un conjunto clásico está representado por la función $\mu_A(x) = \{0 \text{ si } x \notin A, 1 \text{ si } x \in A\}$, para los conjuntos difusos es $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, donde $\mu_A(x) = g$, si g es el grado en que x pertenece al conjunto A .

Se puede hacer uso de diferentes funciones de pertenencia, algunas de las más utilizadas a la hora de aplicar lógica difusa son: triangular, trapezoidal, gamma y la función “L”. En esta investigación se utilizó la función de pertenencia trapezoidal, toda vez que su principal ventaja es el margen de tolerancia alrededor del valor que se toma como más representativo del valor lingüístico asociado al conjunto difuso, así como el centro de gravedad del conjunto difuso.

5. Puesta en marcha del modelo difuso

Para llevar a cabo esta investigación, se consideraron 4 etapas: recopilación de datos, fusificación, generación de reglas y defusificación.

5.1. Recopilación de datos

La recopilación de los datos se dio a través de la aplicación del test Honey-Alonso a dos generaciones de estudiante de nuevo ingreso de la carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (ITIC). El número de estudiantes que contestó el test fue de 164, de los cuales 95 pertenecen a la generación agosto-diciembre 2016 y 69 pertenecen a la generación enero-junio 2017. Para lo anterior, se desarrolló una interfaz gráfica para el levantamiento de los datos, ver Fig. 2.

Los resultados de la aplicación del test se muestran en la Tabla 2, la cual representa la cantidad total de positivos obtenidos para cada EA de las respuestas de los 164 estudiantes. Es importante mencionar que ningún alumno obtuvo positivos en el rango de 0 a 5, por ello, en la tabla 2 solo se muestra a partir de la cantidad de positivos 6.

Test Honey - Alonso 1-10

- Tengo fama de decir lo que pienso claramente y sin rodeos.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Estoy seguro lo que es bueno y lo que es malo, lo que está bien y lo que está mal.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Muchas veces actúo sin mirar las consecuencias.
☐ MAS(+) ☒ MENOS(-)
- Normalmente trato de resolver los problemas metódicamente y paso a paso.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Creo que los formalismos coartan y limitan la actuación libre de las personas.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Me interesa saber cuáles son los sistemas de valores de los demás y con qué criterios actúan.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Pienso que el actuar intuitivamente puede ser siempre tan válido como actuar reflexivamente.
☐ MAS(+) ☒ MENOS(-)
- Creo que lo más importante es que las cosas funcionen.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Procuro estar al tanto de lo que ocurre aquí y ahora.
☒ MAS(+) ☐ MENOS(-)
- Disfruto cuando tengo tiempo para preparar mi trabajo y realizarlo a conciencia.
☐ MAS(+) ☒ MENOS(-)

[SIGUIENTE](#)

Fig. 2. Pantalla de captura de datos de aplicación del test de Honey-Alonso.

Tabla 2. Resultado de positivos obtenidos en el test de Honey-Alonso para cada estilo de aprendizaje.

Positivos	Activo	Reflexivo	Teórico	Pragmático
6	5	0	0	1
7	7	1	4	0
8	10	4	5	1
9	16	5	7	1
10	14	2	12	8
11	21	10	12	14
12	29	16	18	25
13	15	21	25	21
14	16	18	24	24
15	19	22	25	23
16	2	20	19	16
17	6	25	10	20
18	1	13	2	6
19	2	5	1	3
20	1	2	0	1
Total	164	164	164	164

5.2. Fusificación

Una vez obtenidos los datos, se necesitan definir las variables y valores lingüísticos, así como la función de pertenencia para realizar la fusificación. Las variables lingüísticas que se identificaron son los EAs [11].

```
VAR_INPUT
    activo      : REAL;
    reflexivo   : REAL;
    teorico     : REAL;
    pragmatico  : REAL;
END_VAR

FUZZIFY EA
    TERM mb := (0.3, 1) (0.4, 1) (0.45, 0);
    TERM ba := (0.4, 0) (0.45, 1) (0.55, 1) (0.55, 0);
    TERM me := (0.5, 0) (0.55, 1) (0.75, 1) (0.8, 0);
    TERM al := (0.75, 0) (0.8, 1) (0.85, 1) (0.9, 0);
    TERM ma := (0.85, 0) (0.9, 1) (1, 1);
END_FUZZIFY
```

5.3. Definición de las reglas difusas

Fuzzy Control Language (FCL) [18], es el lenguaje para definir las reglas de inferencia que se utiliza en las clases e interfaces Java del paquete jFuzzyLogic. FCL es un estándar incluido en el IEC (International Electrotechnical Commission).

En un total de 61 reglas difusas se consideraron los 4 EA, 5 valores lingüísticos (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto) y 15 variables de salida, quedando como ejemplos las siguientes:

```
//4 reglas para 1 estilo muy alto (ma)
RULE 1 : IF (activo IS ma AND reflexivo IS NOT ma AND teorico IS NOT ma
            AND pragmatico IS NOT ma) THEN eaActivo IS ma;

//4 reglas para 1 estilo alto (al)
RULE 5 : IF (activo IS al AND reflexivo IS NOT al AND teorico IS NOT al
            AND pragmatico IS NOT al AND reflexivo IS NOT ma
            AND teorico IS NOT ma AND pragmatico IS NOT ma)
            THEN eaActivo IS al;

//4 reglas para 1 estilo medio (me)
RULE 9 : IF (activo IS me AND reflexivo IS NOT me AND teorico IS NOT me
```

```
AND pragmatico IS NOT me AND reflexivo IS NOT ma
AND teorico IS NOT ma AND pragmatico IS NOT ma
AND reflexivo IS NOT al AND teorico IS NOT al
AND pragmatico IS NOT al) THEN eaActivo IS me;
```

//4 reglas para 1 estilo bajo (ba)

```
RULE 13 : IF (activo IS ba AND reflexivo IS NOT me AND teorico IS NOT me
AND pragmatico IS NOT me AND reflexivo IS NOT ma
AND teorico IS NOT ma AND pragmatico IS NOT ma
AND reflexivo IS NOT al AND teorico IS NOT al
AND pragmatico IS NOT al AND reflexivo IS NOT ba
AND teorico IS NOT ba AND pragmatico IS NOT ba) THEN
eaActivo IS ba;
```

//6 reglas para 2 estilos muy alto (ma)

```
RULE 17 : IF (activo IS ma AND reflexivo IS ma AND teorico IS NOT ma
AND pragmatico IS NOT ma) THEN eaActRef IS ma;
```

//4 reglas para 3 estilos muy alto (ma)

```
RULE 41 : IF (activo IS ma AND reflexivo IS ma AND teorico IS ma AND
pragmatico IS NOT ma) THEN eaActRefTeo IS ma;
```

//1 regla para 4 estilos muy alto (ma)

```
RULE 57 : IF (activo IS ma AND reflexivo IS ma AND teorico IS ma AND
pragmatico IS ma) THEN eaActRefTeoPrag IS ma;
```

5.4. Defusificación

Para la defusificación se necesitaron 15 variables de salida, 4 para un estilo individual, 6 para dos estilos, 4 para tres estilos y 1 para los cuatro estilos, estas se dan en FCL según sigue a continuación:

```
VAR_OUTPUT
    eaActivo      : REAL;
    eaReflexivo   : REAL;
    eaTeorico     : REAL;
    eaPragmatico  : REAL;
    eaActRef      : REAL;
    eaActTeo      : REAL;
    eaActPrag     : REAL;
    eaRefTeo      : REAL;
```

```

eaRefPrag    : REAL;
eaTeoPrag    : REAL;
eaActRefTeo  : REAL;
eaActRefPrag : REAL;
eaActTeoPrag : REAL;
eaRefTeoPrag : REAL;
eaActRefTeoPrag : REAL;
END_VAR

```

Para ejemplificar la defusificación, se muestra a continuación el caso del EA activo.

```

DEFUZZIFY eaActivo
  TERM mb := (0.3, 1) (0.4, 1) (0.45, 0);
  TERM ba := (0.4, 0) (0.45, 1) (0.5, 1) (0.55, 0);
  TERM me := (0.5, 0) (0.55, 1) (0.75, 1) (0.8, 0);
  TERM al := (0.75, 0) (0.8, 1) (0.85, 1) (0.9, 0);
  TERM ma := (0.85, 0) (0.9, 1) (1, 1);
  METHOD : COG;
  DEFAULT := 0.3;
  RANGE := (0.3 .. 1);
END_DEFUZZIFY

```

Es importante mencionar que para la defusificación se usa el centro de gravedad (COG), lo cual implica que el valor a obtener para el estilo de aprendizaje se ubica en el centro del rango de pertenencia.

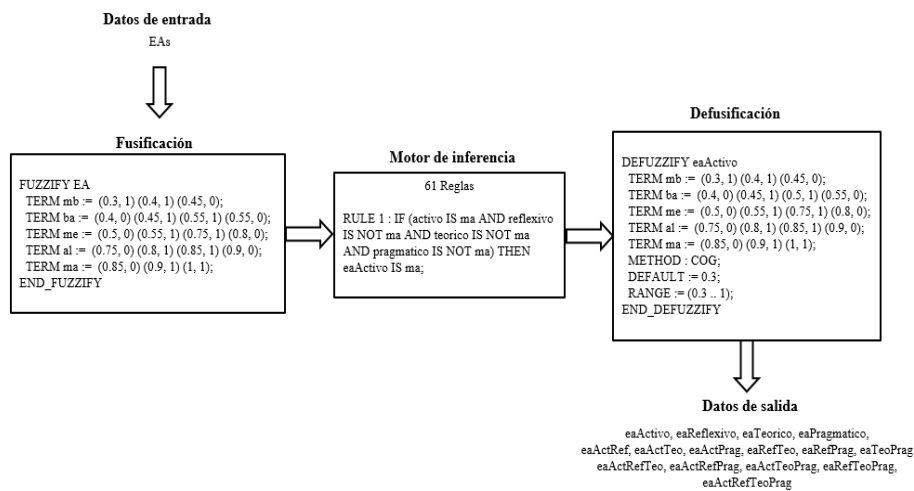


Fig. 3. Esquema del modelo difuso propuesto.

En la fig. 3 se muestra el esquema del modelo difuso propuesto descrito en este apartado, tomando como ejemplo un elemento en cada etapa.

6. Análisis de resultados

A continuación, se presentan algunos resultados obtenidos al aplicar el modelo para la clasificación de EAs de los alumnos de ITIC del ITTLA.

En la Tabla 3, se muestran un resumen de los EAs obtenidos de acuerdo al test de Honey-Alonso y los EAs predominantes después de aplicar el modelo difuso, así como el grado de pertenencia de cada EA.

A manera de ejemplo, se muestran los valores obtenidos para el caso de un estudiante tomado al azar:

Activo = 12
Reflexivo = 16
Teórico = 16
Pragmático = 17

De acuerdo a los valores, el test de Honey-Alonso dice que el estudiante tiene un EA pragmático, sin embargo, se observa que el EA reflexivo y teórico tiene un punto de diferencia con respecto al pragmático.

Tras aplicar el modelo difuso propuesto, se tiene el resultado que se muestra en la Fig. 4, lo cual es distinto a lo que el test de Honey-Alonso dice, esto se debe a que de manera difusa se puede decir que el estudiante tiene 3 EAs predominantes en lugar de 1, en su caso es reflexivo-teórico-pragmático.

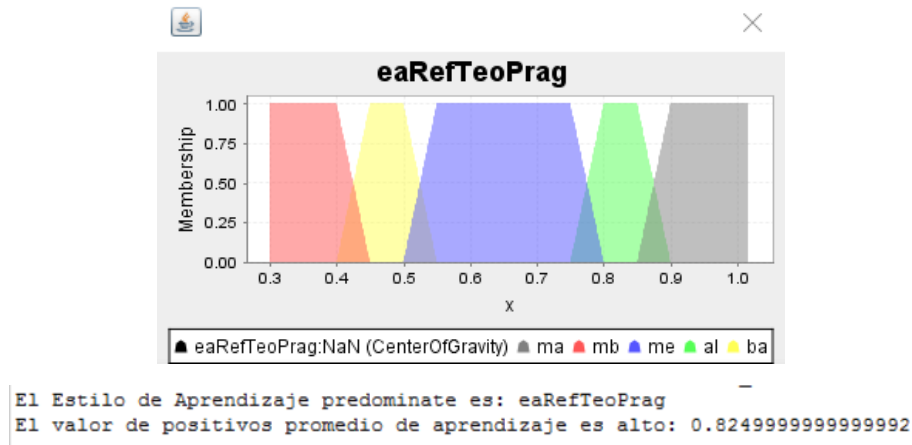


Fig. 4. EAs predominantes de un estudiante de nuevo ingreso.

Tabla 3. Resumen Comparativo de EAs del test de Honey-Alonso vs el modelo difuso propuesto.

No. Estudiantes	EA (Honey-Alonso)	EA (modelo propuesto)	Grado de pertenencia del EA
25	REFLEXIVO	REFLEXIVO	ALTO
18	PRAGMATICO	PRAGMATICO	ALTO
16	REFLEXIVO	REFLEXIVO	MUY ALTO
7	REFLEXIVO	REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
6	TEORICO	TEORICO	ALTO
5	ACTIVO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
4	PRAGMATICO	PRAGMATICO	MUY ALTO
4	REFLEXIVO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
3	PRAGMATICO	PRAGMATICO	MUY ALTO
3	ACTIVO	ACTIVO	ALTO
3	ACTIVO	ACTIVO-PRAGMATICO	MEDIO
3	PRAGMATICO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
3	REFLEXIVO	REFLEXIVO	MEDIO
3	REFLEXIVO	ACTIVO-REFLEXIVO-PRAGMATICO	MEDIO
3	TEORICO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
2	ACTIVO	ACTIVO	MUY ALTO
2	TEORICO	TEORICO	MUY ALTO
2	REFLEXIVO-PRAGMATICO	REFLEXIVO-PRAGMATICO	ALTO
2	REFLEXIVO-PRAGMATICO	REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	ALTO
2	REFLEXIVO-TEORICO	REFLEXIVO-TEORICO	ALTO
2	TEORICO	REFLEXIVO-TEORICO	ALTO
2	TEORICO-REFLEXIVO	REFLEXIVO-TEORICO	ALTO
2	PRAGMATICO	ACTIVO-PRAGMATICO	MEDIO
2	PRAGMATICO	ACTIVO-REFLEXIVO-PRAGMATICO	MEDIO
2	REFLEXIVO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
2	REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
2	TEORICO	REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
2	TEORICO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO
2	TEORICO-PRAGMATICO	ACTIVO-REFLEXIVO-TEORICO-PRAGMATICO	MEDIO

Lo anterior, muestra que el modelo difuso clasifica el EA, o bien, los EAs que sobresalen o predominan en cada estudiante, además, proporciona el grado de pertenencia de estos, toda vez que no es lo mismo un estudiante con EA predominante muy alto, alto o medio. Las características del grado de pertenencia de cada estudiante, permitirá a los expertos una mejor toma de decisiones al definir las estrategias de aprendizaje pertinentes, además de dar seguimiento a cada estudiante.

7. Conclusiones y trabajo futuro

De los resultados mostrados en la Tabla 3, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1) El modelo de inferencia difuso, además de dar la clasificación de los EAs de los estudiantes, permite determinar el grado de pertenencia del o los predominantes.
- 2) Se proporciona información útil a los tutores académicos para que puedan tomar decisiones enfocadas a diseñar las mejores estrategias de aprendizajes para sus estudiantes.

Como trabajo futuro se propone ampliar este modelo, de tal manera que permita al menos lo siguiente:

- 1) Identificar el perfil de los estudiantes de nuevo ingreso, en función a sus EAs. Si el perfil identificado no es el requerido, asistir en el planteamiento de estrategias que hagan que pueda llegar a serlo.
- 2) Que el tutor tenga una herramienta que le permita dar seguimiento a cada estudiante.
- 3) Proporcionar de manera automática a cada estudiante que aplique el test, las recomendaciones de estrategias de aprendizaje pertinentes.

Referencias

1. SEP: Manual de estilos de aprendizaje: Material autoinstitucional para docentes y orientadores educativos. México, SEP Dirección de Coordinación Académica (2004)
2. SEP: Manual del tutor SNIT. SEP (2013)
3. ANUIES.: Anuario estadístico ciclo escolar 2014-2015. ANUIES, México (2015)
4. Alonso, C. M., Gallego, D. J., Honey, P.: Los estilos de aprendizaje: Procedimientos de diagnóstico y mejora. Ediciones Mensajero, Bilbao, España (1997)
5. Huayapa, C. R., Lizarralde, F. A., Vivas, J. R., Gonzalez, M. P., Guccione, L., Arona, G. M.: Modelo del Estudiante basado en Lógica Difusa. En: Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, pp. 999–1003 (2014)

6. Huayapa, C. R., Guccione, L., Benchoff, D. E., Gonzalez, M. P., Lizarralde, F. A. J.: Mejoramiento de la adaptación usando la lógica difusa. En: XIII Workshop Tecnología Informática Aplicada en Educación (WTIAE), pp. 10 (2015)
7. Ibarra-Orozco, R., Virrueta-Gordillo, A., Ramirez-Santiago, B., Castillo-Silva, F.: Metodología para la creación de objetos de aprendizaje adaptables al estilo de aprendizaje. *Research in Computing Science*, 111, pp. 203–211 (2016)
8. Palomino-Hawasly, M. Á., Strefezza, M., Contreras, L.: Sistema difuso para la detección automática de estilos de aprendizaje en ambientes de formación web. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, pp. 269–294 (2016)
9. Keefe, J. W.: Assessing student learning styles. An overview. *Student Learning Styles and Brain Behavior*, pp. 43–53 (1982)
10. Kolb, D.: *Experiential learning: experiences as the source of learning development*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, pp. 21–38 (1984)
11. Honey, P., Mumford, A.: *Using our Learning Styles*. Berkshire U.K. (1986)
12. Santizo-Rincon, J. A., García-Cué, J. L., Gallego, D. J.: Revista de estilos de aprendizaje. *Revista de estilos de aprendizaje*, Vol. 1, No. 1, pp. 28–42 (2008)
13. Zadeh, L. A.: *Fuzzy logic and approximate reasoning*. Kluber Academic Publishers B. V. (1975)
14. Sankar-Ray, K.: *Soft computing and its applications*. Apple academic Press (2015)
15. Zadeh, L. A.: *Soft Computing and Fuzzy Logic*. pp. 48–56 (1994)
16. Chen, G., Pham, T. T.: *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control System*. Texas, CRC Press (2000)
17. Zadeh, L.: Fuzzy sets. *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338–353 (1965)
18. IEC.: International Electrotechnical Commission. [En línea]. Disponible en: [http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:91:0::::FSP_LANG_ID:25?q=Fuzzy Control Language](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:91:0::::FSP_LANG_ID:25?q=Fuzzy+Control+Language) (2014)

Sistemas inmunes artificiales aplicados a la robótica: agarre de objetos

Daniel Ramirez, Jesús Ortiz, Pedro Ponce, Arturo Molina

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Ciudad de México,
México

dan.ramirez@itesm.mx, jesuss031@gmail.com, pedro.ponce@itesm.mx, armolina@itesm.mx

Resumen. Este documento expone un nuevo algoritmo basado en el Sistema Inmune Natural. Dicho algoritmo está diseñado para producir nuevo conocimiento en forma de anticuerpos a partir de ejemplos limitados en cantidad los cuales toman el papel de antígenos. El algoritmo y la teoría son explicados, además de la aplicación donde se probó su funcionamiento. La aplicación consiste en un guante de datos que permite dar ejemplos a una mano robótica. Los resultados se presentan de tal manera que permita corroborar la funcionalidad del sistema y del algoritmo al realizar la tarea de agarre. Finalmente se presenta una propuesta de embeber en el algoritmo un sistema de reconocimiento de formas mediante la clusterización de datos obtenidos por los sensores integrados al sistema para posteriormente clasificarlos.

Palabras clave: manipulación de objetos, robótica, inteligencia artificial aplicada, sistemas inmunes artificiales, computación evolutiva.

Artificial Immune Systems Applied to Robotics: Grip of Objects

Abstract: This document exposes a new Artificial Immune System (AIS) algorithm, inspired in the Natural Immune System (NIS) and certain characteristics. The algorithm presented emulates certain procedures and utilizes concepts such as learning from demonstration and reinforcement learning. The algorithm is designed to produce new knowledge in form of antibodies from limited data samples as antigens. The algorithm and the theory involved is explained in this document, as well as the application chosen, which is a humanoid hand enabled to sense force and flexion in fingers in order to reproduce grasping postures. Results are presented in

order to confirm the functionality of the algorithm and the success at grasping objects.

Keywords: objects manipulation, robotics, artificial intelligence, artificial immune systems, evolutionary computation.

1. Introducción

El aprendizaje maquina es un área de la inteligencia artificial que durante años ha encontrado inspiración en la naturaleza para reproducir ciertos fenómenos o sistemas de manera computacional, con el fin de resolver diversos problemas y desarrollar aplicaciones [1]. Las áreas de aplicación son tan amplias y van desde aplicaciones relacionadas con la internet y el análisis de datos en dicha plataforma [2], [3], casas y edificios inteligentes [4], [5] hasta cultivos de alimentos con sistemas inteligentes [6], [7]. No es sorpresa que el Sistema Inmune Natural (SIN) atrajera la atención de diversos investigadores alrededor del mundo para de alguna manera reproducir ciertas de sus características inherentes de tal manera que fuera posible codificarlas y aplicarlas a diversos problemas.

El SIN es un ejemplo de un Sistema de aprendizaje adaptivo que no solo se adapta durante toda la vida de su huésped también durante toda su existencia crea una librería o repertorio de anticuerpos misma. Esta librería es utilizada para defender el cuerpo del huésped de una manera más rápida cuando por segunda ocasión encuentran al mismo antígeno. Así la respuesta será mucho más rápida y efectiva que en el primer encuentro. La tarea que tiene encomendada el SIN no es una fácil e involucra un gran número de agentes dentro de los cuales podemos destacar; células blancas de la sangre, células madre, nodos linfáticos, al timo entre otros.

La aportación de esta investigación es el desarrollo de un algoritmo basado en el SIN, emulando ciertos procedimientos para poder aplicarse a la robótica, específicamente al agarre de objetos. Este algoritmo pretende ser sencillo comparado con algunos otros que usan retroalimentación visual, nubes de puntos 3D o la cinemática inversa de una mano.

Al algoritmo se le ha nombrado CODA por su acrónimo en inglés Cognición a partir de datos (Cognition from Data), y para poder probarlo se ha construido un Sistema completo que consta de un guante de datos que recaba información de las posiciones y fuera de cada dedo en la mano del humano para poder usar esto como ejemplo y pasarlo al algoritmo para su posterior procesamiento. Otra parte del sistema consiste en una mano humanoide que se encargará de reproducir las poses de agarre para el objeto a partir del simple ejemplo obtenido por el guante y el procesamiento del algoritmo.

2. La teoría detrás de CODA

2.1. Sistema inmune artificial

El primer artículo que describió la importancia del Sistema Inmune Natural para la comunidad estudiantil del aprendizaje máquina fue escrito en 1986 por J. Doyne Farmer [8], donde el SIN es visto como un clasificador capaz de eliminar material externo al sistema original. Después de este artículo no fue hasta que Forrest et al. [9] en 1994 describiera en su trabajo una aplicación real del algoritmo llamado “Selección negativa”. La lista de algoritmos continúa con el Algoritmo de selección clonal o CLONALG que ha sido usado para reconocimiento de patrones y optimización de funciones multimodales con resultados positivos [10].

Otros algoritmos relacionados al SIN son; Redes Inmunológicas, células dendríticas y algunos derivados de los algoritmos mencionados. Para un mejor estudio de dichos temas los libros de De Castro y Timmis [11] así como el de Das Gupta [12] deben ser un excelente punto de comienzo.

La tabla1, resume aquellas características importantes que se pueden encontrar en sus modelos computacionales del SIN. De esta tabla se han extraído características para el desarrollo del algoritmo presentado en este documento, sin embargo, es importante entender que el modelo del SIN es mucho más complejo y que los modelos computacionales han sido simplificados para poder ser emulados. Para un estudio más completo del SIN es necesario referirse a [13] de donde la tabla 1 fue extraída. Algunos de los comportamientos más importantes del SIN que se han imitado y que en el algoritmo CODA están presentes, son los siguientes.

Tabla1. Características del Sistema Natural Inmune que lo hacen una herramienta tan ponderosa del cuerpo humano. Las características aquí presentadas son emuladas por muchos de los algoritmos llamados Sistemas Inmunes Artificiales.

CARACTERISTICA	IMPORTANCIA FUNCIONAL
ESPECIFICIDAD	Asegura que los distintos antígenos provoquen respuestas específicas
DIVERSIDAD	Permite al Sistema inmune responder a una gran variedad de antígenos
MEMORIA	Conduce a una mejora en las respuestas a exposiciones repetidas de un mismo antígeno
EXPANSIÓN CLONAL	Aumenta el número de antígenos específicos para mantener el ritmo de reproducción de los microbios
ESPECIALIZACIÓN	Genera respuestas que son óptimas para la defensa en contra de diferentes tipos de microbios
CONTRACCIÓN Y HOMEOSTASIS	Permite al Sistema inmune responder a antígenos completamente nuevos sin previos encuentros
NO REACTIVIDAD A PROPIOS	Previene daño al portador del sistema durante ataques a elementos foráneos

Generación de diversidad: El SIN es capaz de producir su propia diversidad a partir de sus células y de información que estas obtienen. El mecanismo que usa es recombinar de manera aleatoria fragmentos de genes en cada célula B nueva para así poder obtener nuevos anticuerpos. Este proceso, simple pero efectivo es capaz de producir anticuerpos muy diversos de manera masiva y ha funcionado durante mucho tiempo. Este proceso, el cual se puede apreciar en la figura 1, es capaz de producir anticuerpos para antígenos incluso si anteriormente no se había tenido contacto con el patógeno portador dentro del cuerpo humano.

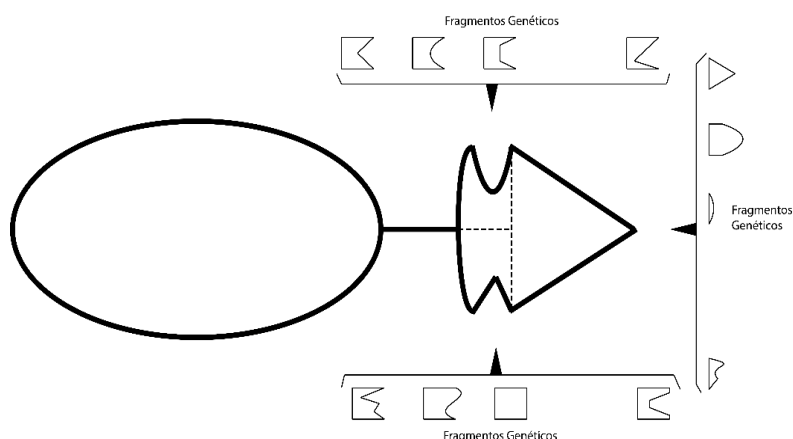


Fig. 1. Ejemplo simple de cómo es creado un anticuerpo a partir de mezclas aleatorias de diversos genes.

En el algoritmo CODA, el proceso es emulado de la siguiente manera. Primero se obtiene el antígeno, el cual es extraído por el sistema de aprendizaje por demostración que consiste en el guante de datos del cual se hablará en secciones posteriores. Toda la información obtenida por este sistema es el patógeno y cada uno de los datos es un antígeno, información que es entregada al proceso de clonación/mutación del algoritmo para de esta manera generar la diversidad para producir nuevos y diferentes datos (anticuerpos).

Los ejemplos obtenidos son separados del arreglo y tratados según la variable a la que pertenezcan (posición y fuerza) a partir de ese momento cada dato es usado como la media μ y encima de cada uno de ellos una distribución normal es fijada de tal manera que se obtengan anticuerpos dentro de esa distribución con una desviación estándar σ , proceso ilustrado por la figura no. 2. Esto quiere decir que en un problema en el cual se tuviesen 3 dimensiones o variables a medir, se tendrían tres distribuciones normales una para cada variable. Tomar el ejemplo como la media de la distribución hará que todas las variaciones se hagan según este número y de esta manera se asegura que no haya datos incongruentes que pudieran estar fuera de la distribución y que no servirían para nada.

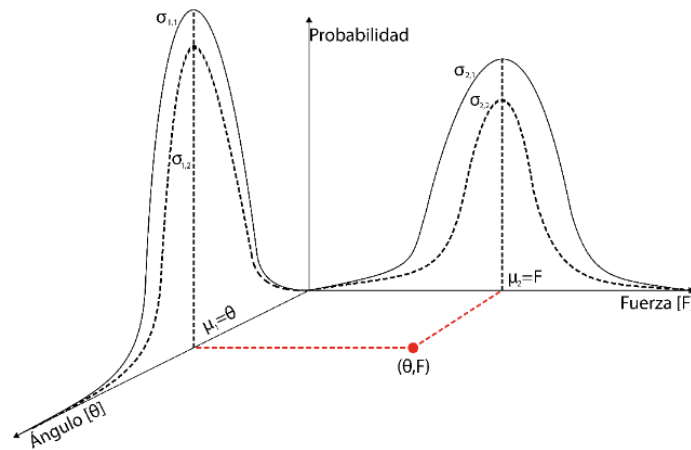


Fig. 2. Diferentes densidades de probabilidad para cada dimensión del patógeno son creadas durante el procedimiento de clonación y de mutación. La letra griega sirve para definir la variable posición y la letra F la fuerza.

De la figura 2 el parámetro σ muestra diversos subíndices, que se leen de la siguiente manera:

$$\sigma_{x,y}; \text{ para todas las dimensiones, y por cada posible } \sigma; x, y \in \mathbb{Z}.$$

En la aplicación que se expone en este documento solamente se usan dos dimensiones como puede observarse en la figura anterior y esto es debido a la configuración de los sensores en el sistema y las variables que se desean extraer.

Selección negativa: Este procedimiento es de suma importancia ya que elimina a todas aquellas mutaciones con desventaja (medidas en comparación a un parámetro en el caso del algoritmo CODA una función de recompensa) que se produjeron al generar diversidad, este procedimiento también es conocido como apoptosis. Debido a que el proceso de generación de diversidad es aleatorio es posible que se creen anticuerpos que contengan datos erróneos y que puedan ser dañinos para el huésped, incluso que puedan atacar células del huésped por error, es por eso que este proceso de eliminación de este tipo de anticuerpos con desventajas es tan importante.

Selección clonal: Desde que el proceso de generación de diversidad es activado alrededor del cuerpo humano. En los nodos linfáticos habrá una gran cantidad de células B que comenzaran a producir anticuerpos con información errónea para esos casos la selección negativa se activa. Sin embargo, habrá células B que comiencen a crear anticuerpos funcionales y con alto potencial, es por eso que estas células B son alentadas a clonarse para de esta forma producir una mayor cantidad de anticuerpos funcionales. Este

procedimiento es importante ya que la es por medio de la hipermutación somática que las células B producen cambios finos en los anticuerpos para crear los más capaces.

La figura 3 muestra un resumen de los procesos que se han explicado con anterioridad, y fue el modelo computacional simplificado que utiliza el algoritmo CODA.

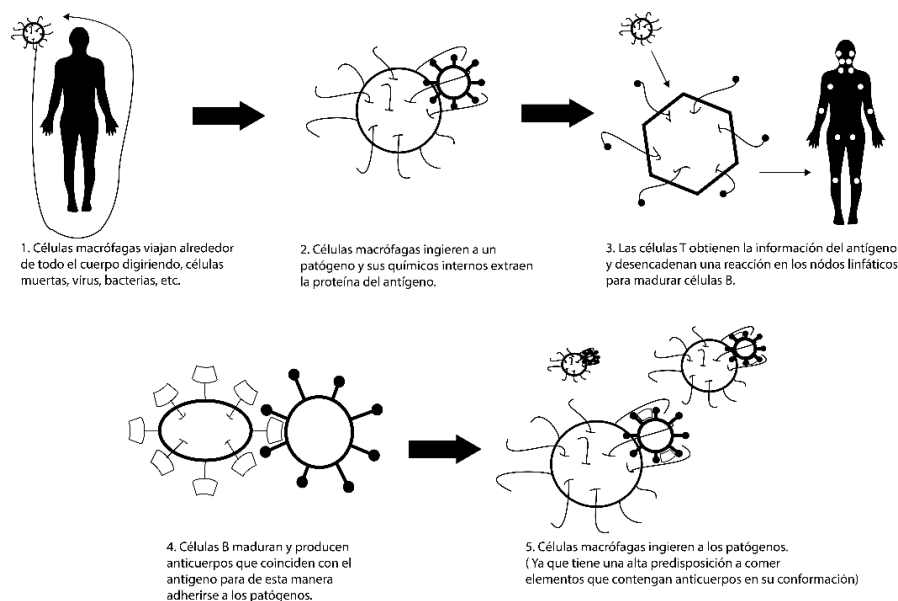


Fig. 3. El sistema inmune adaptivo y sus procedimientos de defensa al encontrarse con un patógeno [14].

En el algoritmo CODA selección negativa y la selección clonal, están unidas a partir de la implementación de una función de evaluación que busca a los anticuerpos más capaces de reproducir la tarea deseada. La función de recompensa para esta aplicación está diseñada para poder obtener el mejor rendimiento del algoritmo basándose en la tarea a realizar. Es por esto que fuerza y posición son las variables escogidas, ya que permiten caracterizar una posición para manipular el objeto fácilmente. Las implementaciones de dichas funciones de recompensa se encuentran explicadas con mayor detalle en [14].

¿Por qué es importante evaluar la recompensa esperada para cada anticuerpo? Imagine que el sistema ha obtenido un mal ejemplo durante el proceso de aprendizaje por demostración, esto pudiera ser por datos corruptos o por falla en algún sensor. Esto provocaría que la variable μ se colocará en una región del plano donde produciría bajas recompensas, en este caso sería de suma importancia detener la producción de anticuerpos con estas características. Otro posible caso puede ser que los anticuerpos produjeran recompensas medianamente buenas, en esta ocasión sería importante modificar parámetros como σ , y de esta manera aumentar la diversidad de anticuerpos, de tal manera

que este cambio pudiera producir una mayor cantidad de anticuerpos y dentro de todos ellos se encuentre alguno que produzca mayor recompensa.

2.2. Aprendizaje reforzado

El aprendizaje reforzado, es una técnica que permite a una entidad aprender a partir de experiencias previas en el tiempo, este tipo de aprendizaje está estrechamente ligada con la programación dinámica y está constituida por conceptos importantes que permiten al ente aprender, estos conceptos son la política de comportamiento, que básicamente indica al ente que acciones debe tomar según el estado en el que se encuentre; es decir su comportamiento; la función de recompensa, que da una retroalimentación instantánea de la acción escogida y que está definida por el objetivo u objetivos a alcanzar.

Este método ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones robóticas y sus resultados han sido favorables, probando así su competencia como método para que un ente pueda aprender ciertas habilidades. Incluso en algunas ocasiones ha sido posible demostrar que su desempeño es mucho mejor que el de código programado meramente a mano y de forma explícita sobre una tarea a realizar [15], ha sido utilizado en robots móviles, para permitir que los robots aprendan los aspectos más básicos de la tarea que están por realizar, en lugar de programar el mismo robot de manera explícita indicando paso por paso [16], también han sido exitosamente aplicados estos métodos a sistemas robóticos de visión [17] e incluso se ha logrado que lleven a cabo una tarea tan difícil como lo es la locomoción de un robot bípedo para que este camine [18]. Como se puede observar el aprendizaje reforzado no es una técnica nueva y está ya ha sido estudiada y aplicada de manera extensa en una amplia gama de escenarios y aplicaciones con resultados positivos, basados en [19] se hará un breve resumen de las características importantes de dicho método.

Como se puede leer en el texto anteriormente citado, el aprendizaje reforzado es seleccionacional, involucra probar y seleccionar entre un grupo de alternativas al comparar consecuencias y también es asociativa debido a que aquellas alternativas encontradas son asociadas con situaciones particulares. Es importante resaltar la unión de estos dos términos anteriores, dado que se combina la búsqueda y la memoria con el objetivo de buscar y seleccionar acciones acordes a cada situación y recordar cuales acciones funcionaron mejor y en qué momentos.

Adicionalmente el aprendizaje reforzado está también altamente involucrado con dos procesos importantes; la exploración y explotación. El primer término, exploración está ligado a la acción de probar nuevas acciones que no se han usado con anterioridad, con el objetivo de descubrir nuevas situaciones con posibles mejores recompensas. La explotación por otro lado se refiere al uso extensivo del conocimiento ya adquirido.

Política de comportamiento: La política de comportamiento define el comportamiento del agente, puede ser tan simple como una tabla de relaciones estado-acciones. O en

escenarios más complicados puede ser un proceso de búsqueda entre espacios de estados y espacios de acciones que involucren un alto procesamiento de datos. Este es un proceso naturalmente estocástico debido a que parte de las decisiones que se toman son a partir de procesos predecibles, pero al mismo tiempo otra parte de estos procesos son aleatorios.

Función de recompensa: La función de recompensa es específica para cada tarea o tareas a realizar. Esta función calcula que tan atractivo es el estado actual percibido asignando una recompensa numérica, este valor es calculado de manera inmediata dando así una retroalimentación de lo que es bueno o no para el agente.

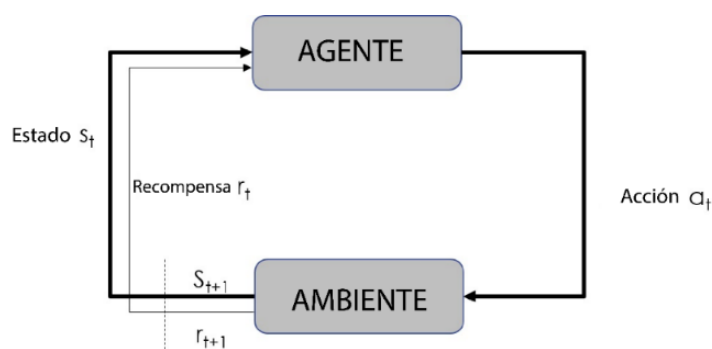


Fig. 4. Diagrama básico de los agentes en la dinámica de aprendizaje reforzado.

2.3. Aprendizaje por demostración

El aprendizaje por demostración es una técnica que permite enseñar a partir de ejemplos. Estos ejemplos pueden proveerse por una gran variedad de formas; a partir de los mismos sensores instalados en el robot [20], con la ayuda de un sistema externo con sensores similares o iguales a los instalados en el robot o ente [21], con sistemas de visión [22] entre otros [23]. Esta técnica es también conocida como “programación por demostración” o “programación por enseñanzas”, y en contraste con la programación clásica donde un experto codificador debe escribir un algoritmo lo suficientemente explícito sobre la tarea que se desea, en el aprendizaje por demostración casi cualquier humano puede auxiliar en la programación del ente que aprende en base a los ejemplos.

Es así como el robot asume el rol de estudiante y el humano el rol de experto o maestro en nuestro caso particular se usó un guante de datos que permite recabar información sobre la posición y fuerza ejercida por cada dedo por medio de sensores embebidos en el guante, permitiendo así recabar información a manera de ejemplos que será usada por el algoritmo CODA posteriormente. La siguiente sección ahonda en el sistema de pruebas que se diseñó y en su funcionamiento de tal manera que se pudieran obtener datos adecuados para ser usados por la aproximación en conjunto que se propone.

3. La plataforma de pruebas

Con el objetivo de comprobar el algoritmo diseñado se escogió una de las tareas que más reto presenta en la robótica y esto es producir poses correctas para la manipulación de objetos. El sistema entero está constituido por un guante de datos y una mano robótica con forma antropomórfica, ambos con sensores de presión y de flexión que permiten obtener datos de posición y fuerza para cada dedo, adicionalmente en el sistema de la mano robótica se instalaron sensores de corriente que permitieran monitorear los actuadores para evitar sobre corrientes y daños.

3.1. La mano antropomórfica

El diseño de la mano fue tomado de un Proyecto internacional de código abierto llamado InMoov, desarrollado por el diseñador francés Gael Langevin. La mano en su totalidad está fabricada por una impresora 3D y como mecanismos que emulan los tendones utiliza hilo de poliamida para lograr el movimiento de los 5 dedos además de un sistema de engranes para un movimiento de 180° en la muñeca.

Como actuadores se instalaron servomotores de alto torque que jalan el hilo de poliamida con un diámetro de .90 mm.

La mano que se usó para las pruebas cuenta con 16 grados de libertad y 6 grados actuados, haciendo que la configuración de dicho robot sea subactuado. La mano original, no está diseñada para ser usada con el tipo de sensores que se le instalaron, es por eso que se debieron hacer ciertas modificaciones para que los sensores pudieran estar embebidos en la mano y proporcionar datos útiles. La figura 5 muestra el resultado de las modificaciones y el sistema finalizado.



Fig. 5. Mano Robótica con sensores de presión y flexión instalados en el anverso y reverso.

El algoritmo no recibirá ninguna información paramétrica que tenga que ver con las dimensiones de la mano o los links que la conforman. La única información que recibirá es la obtenida por los sensores embebidos en el guante mientras es usado por un humano.

La figura 6 muestra un ejemplo de los datos obtenidos cuando los sensores de presión y flexión son excitados al ser presionados y flexionados respectivamente en el sistema de la mano antropomórfica, toda esta información puede ser recopilada por un microcontrolador y enviada a MATLAB donde se despliega de manera gráfica y casi instantánea.

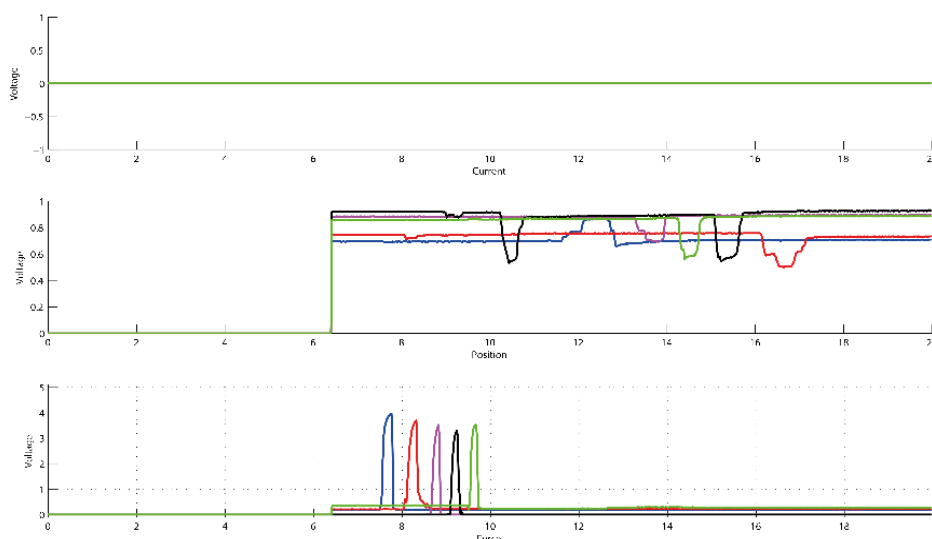


Fig. 6. De arriba a abajo; valores de los sensores de corriente cuando los motores están apagados, Sensores de posición cuando los dedos son movidos de su posición de reposo a una posición aleatoria y de regreso, sensores de fuerza cuando son presionados manualmente.

De la imagen superior se observa que los datos recolectados por el sistema están libres de ruido que afecte sus lecturas y que las lecturas de los sensores son coherentes, de tal manera que el sistema construido proporciona una plataforma de prueba lo suficientemente confiable.

3.2. El guante de datos

El guante de datos es el instrumento que permite hacer uso del aprendizaje por demostración. Este sistema también cuenta con sensores de flexión para la posición y de presión para la fuerza de tal manera que pueda extraer esta información mínima requerida para reproducir un agarre. Se usó un guante genérico y un total de diez sensores, dos por cada dedo; enviando las lecturas de los sensores a MATLAB por medio de un microcontrolador. La figura 7 muestra las señales de los sensores de posición en una secuencia de dos movimientos, primero con la mano abierta y posteriormente con la mano cerrada, en la imagen se observa de manera clara las dos secuencias, este comportamiento

nos permite concluir que el sistema proporciona información clara y fácilmente reconocible e interpretable.

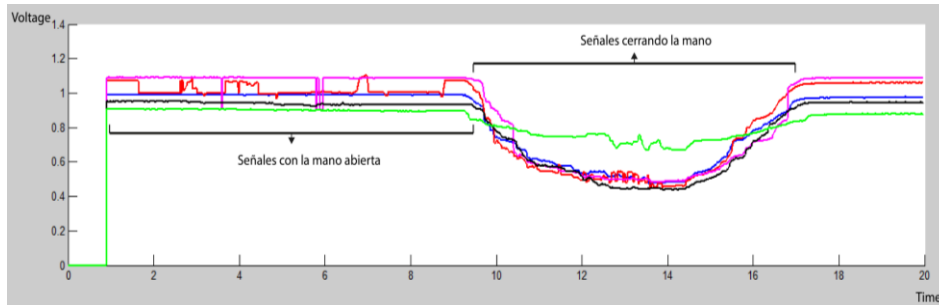


Fig. 7. Ejemplo de datos obtenidos durante un ejercicio de prueba al mantener abierta la mano y posteriormente cerrarla, usando el guante de datos y la interfaz en MATLAB.

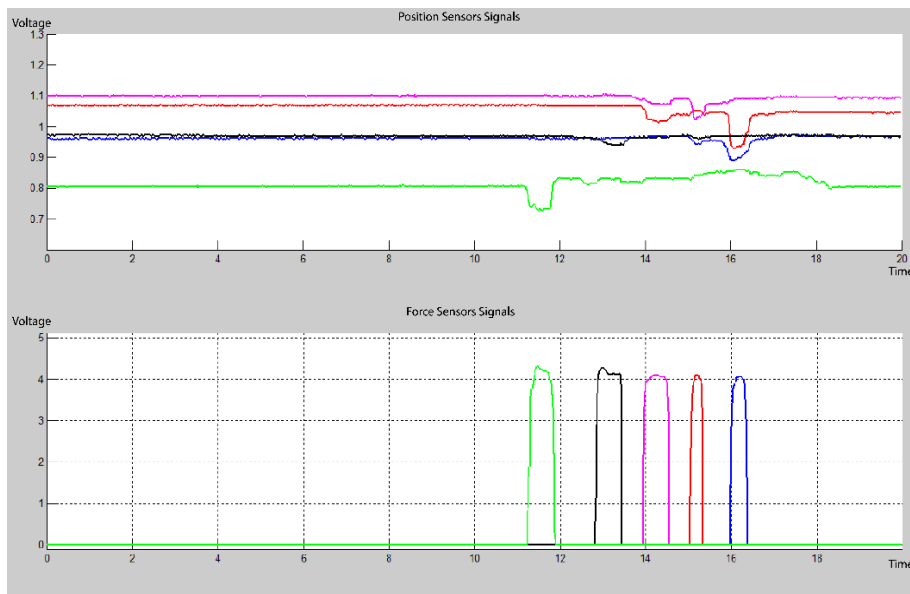


Fig. 8. Gráficas obtenidas al hacer prueba de funcionalidad a cada sensor instalado en el guante de datos. La gráfica superior muestra la variación que sufren los valores al mover cada uno de los dedos de su posición de reposo. La gráfica inferior muestra el comportamiento de los valores al tocar una superficie con los sensores de presión de manera individual.

La figura 8 muestra otra prueba hecha a los sensores de fuerza instalados en el guante, las señales que se muestran son obtenidas al hacer que cada dedo alcance una superficie plana, probando así que cada sensor en cada dedo y es fácilmente perceptible cuando tiene

contacto con un objeto permitiendo entregar datos suficientemente consistentes al algoritmo para ser usados como antígenos.

4. Pruebas y resultados

Para las pruebas con el sistema y el algoritmo se utilizó un set de figuras geométricas bien conocidas. La figura 9 muestra el conjunto entero de dichas figuras y algunos detalles que permiten tener una idea del tamaño en centímetros de sus dimensiones.

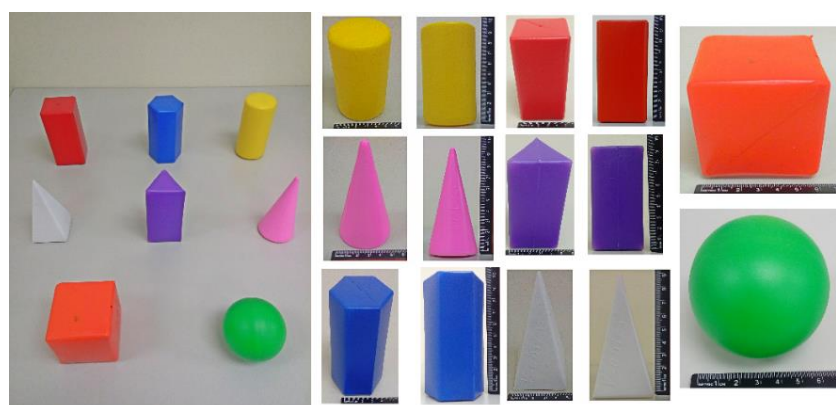


Fig. 9. Set de figuras geométricas para el uso en el protocolo de pruebas del algoritmo CODA.

El protocolo de pruebas es el siguiente;

1. Al seleccionarse el objeto se agarra por un experto humano que use el guante de datos. La información obtenida por los sensores funje como patógeno y es el ejemplo que se introduce al sistema.
2. Con los datos obtenidos se genera diversidad, usando el ejemplo y pasándolo por un proceso de clonación/mutación para obtener nuevos pares de datos.
3. Una vez generado un set de datos por medio del mecanismo emulado del SIN, se evalúan dichos datos por medio de las funciones de recompensa para eliminar datos que no cumplan con los parámetros deseados.
4. Aquellos datos mejor evaluados son utilizados por el sistema para producir el agarre de objetos.

La tabla 2 resume la información obtenida por el guante de datos, como puede observarse, los valores de posición y fuerza (θ , Σ) fueron recopilados por cada dedo, es importante resaltar que estos valores no están en unidades relacionadas a sus magnitudes físicas, son datos numéricos asignados por el convertidor análogo digital del microcontrolador y se manejaron de esta manera durante todo el proceso.

Tabla2. Ejemplos de agarres por cada figura geométrica obtenidos a partir del guante de datos.

θ	Σ	θ	Σ	θ	Σ	θ	Σ	DEDOS
74.00	23.67	84.33	0.00	87.00	127.00	71.83	306.17	Meñique
80.33	266.67	98.67	0.00	101.17	102.67	72.67	213.83	Anular
90.17	249.33	106.17	266.00	107.67	95.17	82.83	202.17	Medio
81.33	0.00	83.00	336.33	89.00	274.67	70.83	356.67	Índice
80.00	392.50	89.17	245.00	88.50	247.50	81.50	359.50	Pulgar
Esféra		Cubo		Prisma Rectangular		Cilindro		DEDOS
θ	Σ	θ	Σ	θ	Σ	θ	Σ	DEDOS
73.00	178.33	66.83	0.00	76.17	0.00	74.50	0.00	Meñique
76.83	172.50	70.00	84.67	91.50	0.00	87.17	0.00	Anular
86.33	99.83	80.17	135.00	106.50	0.00	102.33	270.83	Medio
74.50	180.33	63.00	317.50	93.00	297.50	89.67	310.83	Índice
89.83	330.17	88.50	0.00	91.50	203.17	92.67	373.33	Pulgar
Prisma Hexagonal		Prisma Triangular		Pirámide		Cono		

Estos datos se introdujeron al procedimiento de clonación/mutación del algoritmo CODA para producir N anticuerpos.

El resultado de introducir los datos al algoritmo con el ejemplo del prisma hexagonal produjo 500 nuevos y diferentes pares de datos, estos se muestran en la figura 10 en la imagen de la izquierda, el asterisco que se observa en cada uno de los conjuntos es el ejemplo que se le dio al algoritmo como información inicial, los círculos son los anticuerpos producidos. En la misma figura en la imagen de la derecha se observa como los anticuerpos tienen una distribución normal multivariable como se explicó en la sección uno.

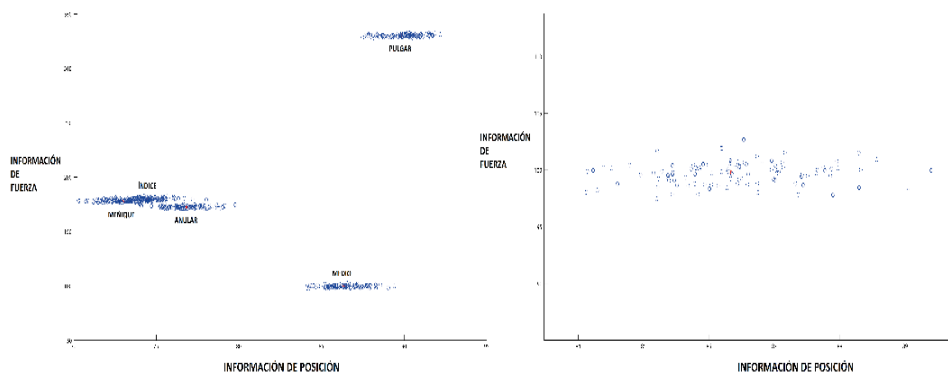


Fig. 10. Izquierda, ejemplos (asteriscos) y anticuerpos (círculos) obtenidos por cada dedo a partir del procedimiento de generación de diversidad del algoritmo CODA. Derecha, vista detallada de anticuerpos producidos para el dedo medio.

Es importante indicar que los anticuerpos hasta este punto no han sido evaluados, solamente se ha generado diversidad, el siguiente paso es introducir los datos al proceso de selección negativa para evaluar su posible efectividad con la función de recompensa. La función de recompensa toma en consideración los valores de θ y Σ para hacer la evaluación por cada par de datos de cada dedo, finalmente la recompensa obtenida por cada dedo es sumada hasta obtener por cada conjunto de 5 dedos un valor que oscila entre 0 y 5, siendo 5 el máximo valor posible y 0 el mínimo. Aquellos datos que cumplan con el criterio se guardan en el repertorio de anticuerpos, conteniendo así todos aquellos que se calificaron como más capaces. La figura 11 muestra todos aquellos anticuerpos que fueron calificados como aptos para el ejemplo del prisma hexagonal obteniendo un total de 6 posibles agarres diferentes de un total de 100 generados en un comienzo. En la misma imagen a la derecha se observan otros tres ejemplos capturados por el guante de datos que al ser comparados con los anticuerpos producidos por el algoritmo se observa que tienen distribuciones similares, sugiriendo que al estar en las mismas áreas que aquellos producidos por humanos reales, pertenecen a agarres correctos para el objeto entrenado. Este tipo de clusterización se desea embeber en el algoritmo para posteriormente poder obtener información relevante a la forma del objeto sin necesidad de una retroalimentación visual. Finalmente, para corroborar dicha información se usaron estos datos con la mano antropomórfica y al enviarlos de manera individual con la figura que se usó en el entrenamiento, se obtuvieron resultados positivos con un 83% de efectividad; es decir 5 de las seis posturas acertaron en agarrar la pieza sin que esta se cayera fácilmente o se moviera de manera irregular.

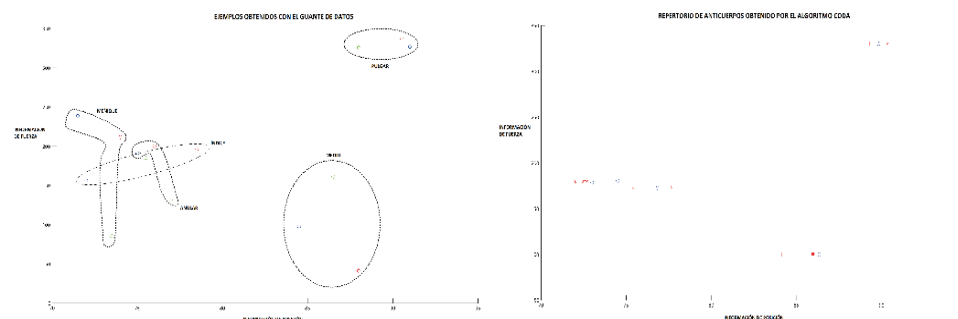


Fig. 11. Izquierda, tres ejemplos obtenidos a través de humanos usando el guante de datos. Derecha, ejemplos que se le dieron al sistema y repertorio que produjo con los anticuerpos más aptos.

5. Conclusiones

El algoritmo que se presentó en este documento, fue diseñado para emular al Sistema natural inmune en ciertos aspectos computacionalmente importantes para resolución de

problemas y su implementación en aplicaciones robóticas, como es el caso de la manipulación o agarre de objetos. Con el objetivo de hacer que el algoritmo tuviera un desempeño superior se complementaron los procedimientos emulados con el uso de métodos como el aprendizaje reforzado y el aprendizaje por medio de ejemplos de tal manera que pudieran ser complementarios con los sistemas inmunes artificiales. El algoritmo fue capaz de dar un porcentaje de aciertos de 83% de casos positivos con un prisma hexagonal y un 100% de casos positivos con una prueba posterior con un cubo. Adicionalmente se observa que los datos tienden a agruparse según la forma, sugiriendo así que al hacer uso de un algoritmo de clusterización y de un clasificador. Finalmente, el sistema demostró ser lo suficientemente capaz y confiable de ser usado para probar el algoritmo, aportando datos limpios y coherentes que permitieron implementar este algoritmo en la mano robótica de forma antropomórfica.

Bibliografía

1. Yang, X. S.: *Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications*. Newnes (2013)
2. Boyan, J., Freitag, D., Joachims, T.: A machine learning architecture for optimizing web search engines. In: *AAAI Workshop on Internet Based Information Systems* (1996)
3. Agichtein, E., Brill, E., Dumais, S.: Improving web search ranking by incorporating user behavior information. In: *Proceedings of the 29th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, ACM (2006)
4. Jiang, L., Liu, D. Y., Yang, B.: Smart home research. In: *Proceedings of the Third Conference on Machine Learning and Cybernetics SHANGHAI* (2004)
5. Tapia, E.M., Intille, S.S., Larson, K.: Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors. Springer (2004)
6. Tan, C. P.: Classification of multi-temporal SAR images for rice crops using combined entropy decomposition and support vector machine technique. *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 71, pp. 19–39 (2007)
7. Kurata, K., Eguchi, N.: Machine learning of fuzzy rules for crop management in protected cultivation. *Transactions of the ASAE*, Vol. 33, No. 4, pp. 1360–1368 (1990)
8. Farmer, J. D., Packard, N. H., Perelson, A. S.: The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 22, No. 1, pp. 187–204 (1986)
9. Forrest, S.: Self-nonself discrimination in a computer. *IEEE* (1994)
10. Cutello, V.: Clonal selection algorithms: a comparative case study using effective mutation potentials. In *Artificial Immune Systems*, Springer, pp. 13–28 (2005)

11. De Castro, L. N., Timmis, J.: Artificial immune systems: a new computational intelligence approach. Springer Science & Business Media (2002)
12. DasGupta, D.: An overview of artificial immune systems and their applications. Springer (1993)
13. Abbas, A. K., Lichtman, A. H., Pillai, S.: Basic immunology: functions and disorders of the immune system. Elsevier Health Sciences (2012)
14. Rebollo, D. R. R., Cruz, P. P., Molina, A.: CODA Algorithm: An Immune Algorithm for Reinforcement Learning Tasks. In: Recent Advances in Robotic Systems, InTech (2016)
15. Mahadevan, S., Connell, J.: Automatic programming of behavior-based robots using reinforcement learning. Artificial intelligence, Vol. 55, No. 2-3, pp. 311–365 (1992)
16. Mataric, M. J.: Reinforcement learning in the multi-robot domain. In: Robot colonies, Springer, pp. 73–83 (1997)
17. Asada, M.: Purposive behavior acquisition for a real robot by vision-based reinforcement learning. In: Recent Advances in Robot Learning, Springer, pp. 163–187 (1996)
18. Benbrahim, H., Franklin, J. A.: Biped dynamic walking using reinforcement learning. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 22. No. 3, pp. 283–302 (1997)
19. Sutton, R. S., Barto, A. G.: Reinforcement learning: An introduction. MIT press (1998)
20. Pastor, P.: Learning and generalization of motor skills by learning from demonstration. In: Robotics and Automation, ICRA'09, IEEE International Conference on, IEEE (2009)
21. Zöllner, R., Rogalla, O., Dillmann, R.: Integration of tactile sensors in a programming by demonstration system. In: Robotics and Automation, proceedings 2001 ICRA, IEEE International Conference on, IEEE (2001)
22. Atkeson, C. G., Schaal, S.: Learning tasks from a single demonstration. In: Robotics and Automation, proceedings, IEEE International Conference on, IEEE (1997)
23. Ijspeert, A. J., Nakanishi, J., Schaal, S.: Learning rhythmic movements by demonstration using nonlinear oscillators. In: Proceedings of the IEEE/rsj int. conference on intelligent robots and systems (2002)

Seguimiento autónomo de personas con un robot aéreo no tripulado

Fabiola Guevara Soriano, Antonio Alfredo Reyes Montero, Abraham Sánchez López

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación,
Puebla, Puebla, México

fabiola.guevara@outlook.com, reyes-fred@hotmail.com,
asanchez@cs.buap.mx

Resumen. El presente trabajo propone combinar dos grandes áreas de la Inteligencia Artificial que son: Visión por computadora y Planificación de Movimientos, para ser incorporadas en el área de robótica aérea a través de robots aéreos no tripulados. Nuestro objetivo principal es el seguimiento de personas utilizando los algoritmos de detección y seguimiento: Histograma de Gradientes Orientados (HOG – Histogram of Oriented Gradient) y Filtro de Partículas, e integrarlo con la planificación de movimiento para el vuelo autónomo del cuadricóptero a través del algoritmo Árboles de Exploración Rápida (RRT - Rapidly-exploring Random Tree) y variantes del mismo. Se presentan los resultados de los algoritmos así como su efectividad y finalmente se muestra el desempeño del AR.Drone 2 con las técnicas propuestas.

Palabras clave: cuadricóptero, HOG, filtro de partículas, RRT, RRT Star, RRT Connect, TRRT, LazyRRT.

Autonomous People Tracking with an Unmanned Aerial Robot

Abstract. This work proposes to combine two main areas of the Artificial Intelligence which are: Computer vision and Motion Planning, to be incorporated in the area of aerial robotics through unmanned aerial robots. Our main objective is the tracking of people using the detection and tracking algorithms: HOG (Histogram of Oriented Gradients) and Particle Filter besides integrate it with motion planning for the autonomous flight of the quadcopter through the algorithm Rapidly-exploring Random Tree (RRT) trees and variants of it. We present the results of the algorithms as well as their effectiveness and finally the performance of the AR.Drone 2 with the proposed techniques.

Key words: quadcopter, HOG, particle filter, RRT, RRT Star, RRT Connect, TRRT, LazyRRT.

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV - Unmanned Aerial Vehicles), se han desarrollado en los últimos años con mayor frecuencia en los ámbitos científico y comercial. La gran popularidad que han tenido los convierte en una de las tendencias de desarrollo más recientes y han sido un área de investigación muy activa.

La aplicación de este tipo de vehículos es cada día mayor en tareas que implican algún tipo de dificultad o riesgo para vehículos convencionales tripulados por personas como: la detección de incendios, la identificación de manchas de petróleo en el mar, el seguimiento del tráfico, la inspección de líneas de tendido eléctrico, etc. [1].

Existe un interés general por el control autónomo de vehículos aéreos no tripulados, ya que en los últimos años se han desarrollado muchos proyectos relacionados con este tema. Es claro que una aplicación de esta naturaleza debe incluir un algoritmo de planificación de movimientos y una estrategia para el seguimiento de la trayectoria generada por este. Por lo tanto a través del algoritmo RRT y sus variantes se hace la planificación de movimientos especializada en robots aéreos no tripulados.

El seguimiento de objetos con UAVs ha creado un gran interés entre la comunidad científica, sobre todo por sus aplicaciones como la de inspección de objetos (grabación) que se mueven, sin la necesidad de controlar el UAV desde una estación remota. Por ello es importante desarrollar estrategias que permitan realizar el seguimiento de personas (tracking) en ambientes exteriores, utilizando los algoritmos de detección de objetos, en este caso el algoritmo HOG y de seguimiento de objetos como lo es el Filtro de Partículas [2].

El objetivo de este trabajo es conjuntar de manera eficiente dos técnicas: un algoritmo para la planificación de movimientos especializado en robots aéreos no tripulados y un algoritmo que permita la detección y seguimiento de personas (tracking) en ambientes exteriores. Esto da pauta a diversas aplicaciones en el mundo real puesto que la autonomía de nuestra propuesta permitiría la toma de decisiones en tiempo real para el seguimiento de cualquier individuo en diversos escenarios.

El presente artículo primeramente explica de forma sucinta una descripción de los conceptos fundamentales necesarios para la comprensión del tema a desarrollar. Posteriormente presenta las pruebas del funcionamiento de cada uno de los algoritmos desarrollados, cuya finalidad es evaluar su desempeño. A continuación describe el proceso de integración de los algoritmos con el AR.Drone 2.0 para dar a conocer los logros alcanzados en cuanto al seguimiento autónomo de personas en tiempo real. Finalmente exponen las conclusiones a las que se llegaron, tomando en cuenta las restricciones del proyecto. También presenta la perspectiva y discusión de trabajos futuros que pudieran derivar de la continuación del desarrollo del proyecto en este campo de investigación.

2. Vehículos aéreos no tripulados

Los robots aéreos son dispositivos que se encuentran cada vez más presentes en nuestro entorno, gracias a la miniaturización de los componentes electrónicos que los conforman, haciendo posible utilizarlos en situaciones variadas como pueden ser aplicaciones de servicios para: localizar personas, vigilancia, control de incendios, o inspección de zonas de difícil acceso, como es el caso de la inspección de los reactores nucleares dañados en Fukushima en 2011, o la inspección sobre la ciudad fantasma de Chernobyl en 2014, que sufrió las consecuencias del desastre nuclear de 1986, entre otras.

Los UAV son aeronaves capaces de volar sin necesidad de un piloto humano a bordo que las controle. Pueden ser remotamente controlados o volar de forma autónoma basada en planes de vuelo pre-programados mediante el uso de sistemas de control complejos. Además, pueden estar controlados por una estación a bordo que realiza toda la toma de decisiones de forma automática o por operadores que con el uso de un radio control pueden realizar acciones de forma manual como son el despegue y el aterrizaje. La autonomía se relaciona con los algoritmos de control que poseen estos vehículos para responder de manera satisfactoria al encontrarse en eventos inesperados o aleatorios durante sus misiones de vuelo [3].

3. Seguimiento de Objetos

El seguimiento de objetos ha sido desde hace tiempo un tema que ha suscitado gran interés debido a las numerosas aplicaciones en las que se puede emplear. El hecho de poder realizar este tipo de actividades que además no necesitan intervención humana directa, trae consigo muchas ventajas: se realiza de forma mecánica, es decir, que las personas no deben realizar esfuerzo para estar observando por largo tiempo los lugares de interés. Además, de esta forma puede obtenerse la información de movimiento de forma estadística, lo que evita posibles errores humanos que podrían producirse si la supervisión tuviera que llevarla a cabo una persona. Y por último, también consigue alejar a las personas de peligros que puedan acarrear las labores de vigilancia así como permitir el monitoreo de lugares que no sean accesibles a las personas [3].

3.1. Histograma de gradientes orientados (hog)

El algoritmo HOG fue introducido en 2005 por Navneet Dalal y Bill Triggs. La esencia principal de dicho algoritmo es que la forma de un objeto en una imagen puede ser descrita por medio de la distribución de los gradientes.

El objetivo de esta técnica es la extracción de características de una imagen, las cuales identifiquen la silueta de una persona o algún otro objeto. Las características son extraídas teniendo en cuenta los bordes. El proceso de extracción de información de los bordes

presentes en una imagen como se consigue calculando los gradientes y las orientaciones de los píxeles.

La idea principal es que la apariencia y la forma de los objetos pueden ser caracterizados de mejor manera por la distribución de gradientes de intensidad locales, inclusive sin conocimiento del gradiente correspondiente. Esto se hace mediante la división de la imagen en varias regiones pequeñas (celdas), cada una de las cuales tiene un histograma de las direcciones de su gradiente o también llamada orientación de borde de los píxeles de la celda. Las entradas de histograma combinadas forman la representación [4].

3.2. Filtro de partículas

El filtro de partículas fue introducido originalmente en el área de visión computacional como el algoritmo Condensation (CONDitional DENSity PropagATIOn), que fue presentado por Michael Isard y Andrew Blake para seguir contornos y lo llamaron ICONDENSATION.

El filtro de partículas representa la densidad a posteriori mediante una distribución de partículas en el espacio de estados. Las partículas son estados posibles del proceso, que se pueden representar como puntos en el espacio de estados de dicho proceso. Este enfoque se ha desarrollado de forma independiente en los últimos años en campos como la estadística, la economía o la visión artificial. Los nombres con los que se le ha denominado son: Método Secuencial de Monte Carlo, Algoritmo Condensation, Filtro Bootstrap, Filtro de la Supervivencia del Más Apto, aunque últimamente se está utilizando el término Filtro de Partículas para todos ellos [4].

3.3. Segmentación

La segmentación es un proceso que se encarga de dividir una imagen digital en varias partes. Es utilizada tanto para localizar objetos como para encontrar los límites de estos dentro de una imagen. Concretamente, es un proceso de asignación de una etiqueta a cada píxel de la imagen. Se ha generado una gran cantidad de trabajos que presentan diversas técnicas, modelos y algoritmos. Estas técnicas se dividen en cuatro grandes grupos [4]:

- Técnicas de segmentación basadas en los valores de píxel.
- Técnicas de segmentación basadas en el área.
- Técnicas de segmentación basadas en orillas.
- Técnicas de segmentación basadas en la física.

4. Árboles aleatorios de exploración rápida

Los algoritmos RRT son una técnica desarrollada por Steven M. LaValle y su grupo de colaboradores en la universidad de Illinois, EU. La base de estos métodos es la construcción

incremental de árboles de búsqueda que intentan explorar rápida y uniformemente el espacio de estados, ofreciendo beneficios similares a los obtenidos por otros métodos exitosos de planificación aleatoria. Además, los algoritmos RRT son, particularmente, convenientes para problemas que involucran restricciones diferenciales.

4.1. Rrt

Los algoritmos RRT fueron presentados como una técnica de planificación para búsqueda rápida en espacios de altas dimensiones que tienen tanto restricciones algebraicas (provenientes de los obstáculos) como restricciones diferenciales (originadas por la no-holonomía y la dinámica). La idea clave es dirigir la exploración hacia regiones inexploradas del espacio tomando puntos en el espacio de estados e incrementalmente “jalar” el árbol hacia ellos.

El algoritmo básico de construcción de los RRTs, se muestra en el siguiente algoritmo, en cada iteración se intenta extender el árbol agregando un nuevo vértice en dirección a un estado seleccionado aleatoriamente.

CONSTRUIR_RRT(X_{ini})

```

1 T.ini(  $X_{ini}$  );
2 para k=1 a K
     $X_{aleat} \leftarrow$  ESTADO_ALEATORIO();
3     EXTENDER(T,  $X_{aleat}$  );
4 regresa T
```

EXTENDER (T,x)

```

1  $X_{prox} \leftarrow$  VECINO_MAS_PROXIMO(  $X$ , T);
2 si NUEVO_ESTADO(  $X$ ,  $X_{prox}$ ,  $X_{nuevo}$ ,  $U_{nuevo}$  )entonces
3     T.agregaVertice(  $X_{nuevo}$  );
4     T.agregarArista(  $X$ ,  $X_{prox}$ ,  $X_{nuevo}$ ,  $U_{nuevo}$  );
5     si  $X_{nuevo} = X$  entonces
6         regresa Alcanzado;
7     sino
8         regresa Avanzado;
9 regresa Atrapado;
```

4.2. Variantes rrt

Generalmente consideramos a los RRT como un bloque en la construcción de un planificador eficiente. Por ejemplo, podríamos usar un RRT para escapar de un mínimo local en un planificador de caminos aleatorio con campos de potencial.

La elección recomendada depende de varios factores, tales como: restricciones diferenciales, el tipo de algoritmo para la detección de colisiones y/o la eficiencia en el cómputo del vecino más próximo. A continuación se mencionan varias alternativas de planificadores que utilizan algún algoritmo RRT, los cuales fueron utilizados para esta investigación:

- RRT Connect [5].
- RRT Star [6].
- TRRT [7].
- LazyRRT [8].
- SyclopRRT [9].

5. Resultados experimentales

5.1. Seguimiento de personas

Para la detección de personas, se utilizó con éxito el algoritmo clasificador HOG. Dicha detección está implementada bajo un sistema basado en entrenamiento y aprendizaje. En este sistema se aprenden los rasgos característicos de cada una de las dos clases, correspondientes a personas y no personas.

Para obtener el algoritmo encargado de la detección se cumplieron los siguientes pasos:

1. Se creó el dataset de imágenes normalizadas positivas y negativas. Para el trabajo desarrollado se integraron dos datasets a fin de obtener mejores resultados en la fase de entrenamiento y aprendizaje de nuestro algoritmo lo que se ve reflejado en un mejor rendimiento y detección de personas, los datasets fueron tomados de INRIA [10] y MIT Pedestrian [11]. Las especificaciones son:

- No. de imágenes Positivas: 4450
- No. de imágenes Negativas: 1963
- Dimensión de las imágenes: 64x128
- Formato de imágenes usados: PNG, JPG, PPM, BMP

2. Se obtuvieron los HOG de las imágenes positivas y negativas donde el algoritmo a seguir se muestra a continuación:

1. Normalización de la imagen.
2. Calcular el gradiente de la imagen en X y Y.
3. Calcular los histogramas de los gradientes.
4. Normalización a través de los bloques.
5. Recolección de datos para procesar en el clasificador.

3. Se entrenó el clasificador utilizando las técnicas de clasificación basadas en límites de decisión. Con este fin se usó la máquina de vectores de soporte (SVM – Super Vector Machine), en particular el modelo lineal. Como resultado, el clasificador aprende el patrón o modelo del objeto deseado.

4. Se realizó el testeo del descriptor.

5. Se realizó el testeo en el proceso de detección.

Los resultados del entrenamiento usando un algoritmo propio en conjunto con la herramienta SVMLight [12], se muestran en la Tabla 1. Cabe mencionar que la eficiencia del clasificador se define, entre otras cosas, tomando en cuenta los valores falsos positivos, falsos negativos, verdaderos positivos y verdaderos negativos, que como se puede apreciar van en función del número de imágenes negativas y positivas usadas para el entrenamiento y aprendizaje, entre otros factores.

Tabla 1. Resultados de las variaciones en el entrenamiento.

	Entrenamiento 1	Entrenamiento 2	Entrenamiento 3
Positivos	4450	5985	6000
Negativos	1963	1750	1943
Tiempo de ejecución (ms)	115.77	161.92	160.01
Evaluaciones del Kernel	288344	395196	394160
Norma x	1.70197	1.70562	1.73833
Norma w	10.23471	10.23471	10.23475
Resultados	Positivos verdaderos: 4450 Negativos verdaderos: 1871 Falsos Positivos: 91 Falsos Negativos: 1	Positivos verdaderos: 5981 Negativos verdaderos: 1630 Falsos Positivos: 124 Falsos Negativos: 0	Positivos verdaderos: 5981 Negativos verdaderos: 1842 Falsos Positivos: 120 Falsos Negativos: 0

Los resultados finales de la detección de personas en diferentes espacios y tipos de iluminación se muestran en la Figura 1.



Fig. 1. Pruebas del algoritmo de detección de personas.

5.2. Filtro de partículas

Una vez que se realizó la detección de personas, se aplicó el filtro de partículas para hacer el seguimiento de la persona.

En la Figura 2, se puede observar el filtro de partículas cuando el UAV va siguiendo a una persona que es reconocida por el HOG. En color fucsia se ven las partículas, en color verde se plasma una línea que recopila los estados que han sucedido en el tiempo que se realiza el seguimiento, con una cruz roja se observa el estado actual de la persona y con una cruz blanca se observa el estado actual que el filtro de partículas predice.



Fig. 2. Pruebas del filtro de partículas (vistas de la cámara y la consola).

5.3. Planificación de movimientos

Se realizaron diversas pruebas a lo largo de la investigación que nos permitieron llegar a un análisis sobre el procesamiento de los diversos algoritmos de planificación de movimientos. Uno de los requerimientos para realizar estas pruebas fue el modelado de 3 escenarios, además del modelado del drone para considerar las restricciones de tamaño que este presenta y de esta forma tener en cuenta la zona deformable y evitar colisiones. Se realizaron 3 escenarios de pruebas distintos, cada uno de estos con ciertas características que podrían dificultar la planificación. Ver los escenarios en la Figura 3.

A través del framework ROS se utilizó la herramienta OMPL app [13] la cual cuenta con un entorno gráfico en donde podemos observar el procesamiento de estos algoritmos y ver la construcción del árbol.

Se realizaron 10 corridas por cada una de las 6 configuraciones de parámetros diferentes del planificador, esto se hizo para cada uno de los 5 algoritmos bajo 3 escenarios diferentes, por lo tanto se tuvieron 900 corridas. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la ejecución del método RRT simple. Esto se simplificó sacando el promedio de tiempo, número de nodos y la eficiencia.

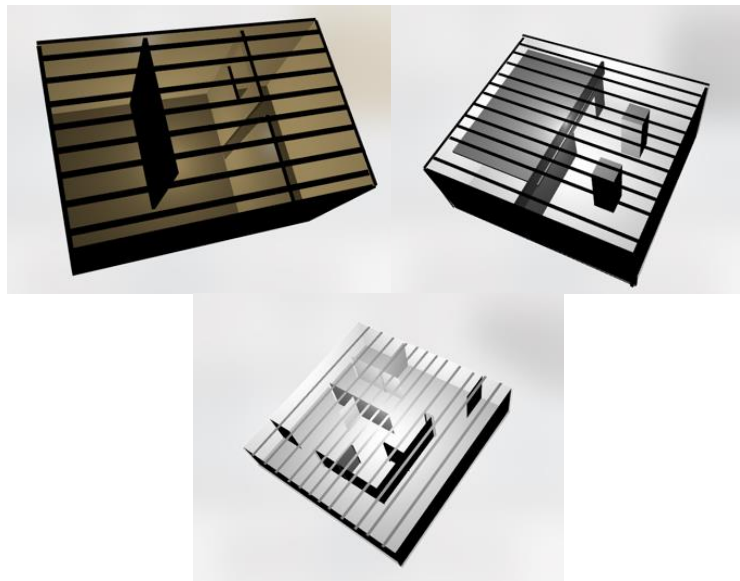


Fig. 3. Escenarios de pruebas 1, 2 y 3.

Características de la computadora para la ejecución.

- Macbook Pro mid 2012,
- 16 GB RAM 1600 MHz DDR3,
- Intel Core i5 - 2.5GHz.

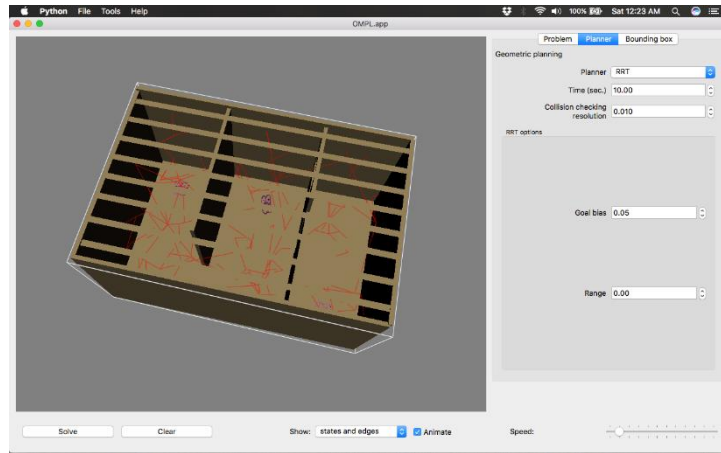


Fig. 4. Ejemplo de la ejecución del método RRT básico en el escenario 1.

La Tabla 2 presenta el porcentaje de eficiencia que tuvo cada algoritmo en cada uno de los escenarios, es decir, el promedio de las 6 corridas.

Tabla 2. Porcentaje de eficiencia de los algoritmos en los 3 diversos escenarios.

	RRT	RRTConnect	RRTstar	TRRT	LazyRRT
Escenario 1	86%	80%	85%	50%	65%
Escenario 2	91.6%	83.3%	76.6%	83.3%	0%
Escenario 3	96.6%	95%	100%	83.3%	81.6

En la Tabla 3 se muestra la ejecución del algoritmo RRT, el cual tuvo el mejor desempeño en el escenario 1.

Tabla 3. Rendimiento del algoritmo RRT en el escenario 1.

Max Time (sec.)	Collision Checking resolution	Goal bias	Range	Tiempo CPU	Estados Creados	Estados Interpolados	Conectado
60	.010	0.05	0	0.161305	157	121	100%
60	0.030	0.05	0	0.189162	1369	123	100%
60	0.030	0.05	1	5.470463	40621	123	100%
60	0.050	0.05	1	4.553411	37647	123	90%
60	0.030	0.02	0	0.072629	148	127	90%
60	0.060	0.02	0	0.094622	309	106	40%

La Tabla 4 muestra la ejecución del algoritmo RRT-Connect que tuvo uno de los mejor desempeños en el escenario 1.

Tabla 4. Rendimiento del algoritmo RRT-Connect en el escenario 1.

Max Time(sec.)	Collision Checking resolution	Range	Tiempo CPU	Estados Creados	Estados Interpolados	Conectado
60	0.010	0	0.0659405	47	121	80%
60	0.010	1	2.9081836	15876	123	100%
60	0.030	0	0.041726	45	102	70%
60	0.080	2	0.9875299	7608	114	30%
60	0.020	2	0.9399893	6663	123	100%
60	0.018	5	0.3602856	2790	122	100%

Es posible observar que los resultados dependen fuertemente de las configuraciones del algoritmo, puesto que estas determinan que tan eficiente es para realizar la planificación. Los parámetros son diferentes en cada uno de los algoritmos, se puede determinar el rango que tendrá el crecimiento de las ramas, la verificación de colisión, el bias que se quiere lograr, etc. Ciertos algoritmos a pesar de que en determinados escenarios tuvieron una respuesta poco favorable en otros tuvieron buen desempeño, nuevamente la dificultad en el escenario es la que nos permite tener resultados diversos, dando pauta a determinar el mejor algoritmo bajo las configuraciones de cada escenario.

5.4. Pruebas en tiempo real

Finalmente se realizó la combinación de las dos técnicas mencionadas al principio para resolver nuestro objetivo principal. El equipo de pruebas fue el cuadricóptero llamado AR.Drone 2. La intervención del dron para la parte del vuelo autónomo se completó usando el framework TUM_Ardron y bajo un algoritmo propio que sirvió de intérprete para darle el plan de vuelo. Para la parte de detección y seguimiento de personas, se utilizó la cámara principal del Ar.Drone la cuál utiliza los puertos establecidos del UAV para comunicarse mediante la red local de WiFi y hacer streaming del video capturado.

Las pruebas se realizaron en un escenario que previamente se modeló a escala lo que nos permitió obtener la planificación de movimientos bajo los diversos algoritmos, en dicho escenario no hubo tránsito de personas durante el proceso, es importante mencionar que la eficiencia en las pruebas y resultados son dependientes de variables como la iluminación, el aire, el tránsito peatonal, etc.

En la Figura 5 se muestran las pruebas realizadas del vuelo autónomo.

La tarea de reconocimiento de personas es pesada computacionalmente, ya que entre mayor es la imagen que se recibe, más tiempo tarda en obtener resultados adecuados. Para imágenes muy pequeñas, del orden de 64×128 píxeles, el reconocimiento de una persona tarda en promedio 40 ms. Para la imagen que se procesa desde el UAV, el tiempo que tarda

en hacer el reconocimiento es de 200ms en promedio, por ello se tomaron medidas que ayudaran a la correcta percepción del seguimiento. La Figura 6 muestra la detección y seguimiento de la persona a través del vuelo autónomo del AR.Drone 2.0.

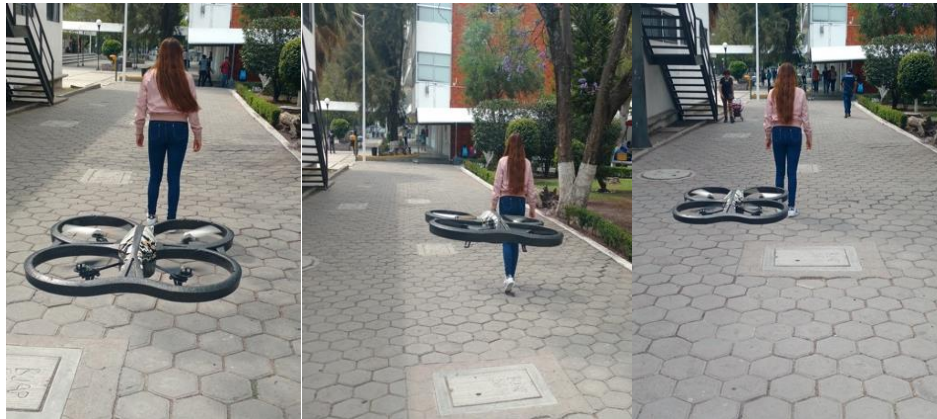


Fig. 5. Vuelo autónomo mediante planificación de movimientos.

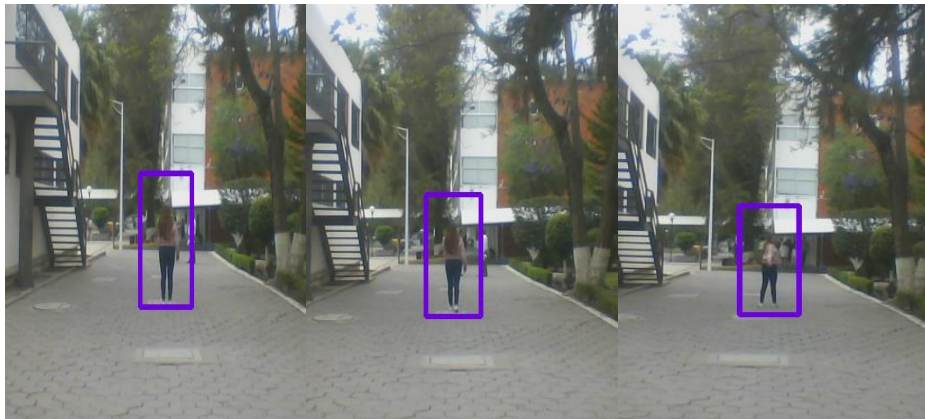


Fig. 6. Seguimiento de personas a través del AR.Drone 2.

6. Conclusiones

El concepto inicial de este artículo fue la elaboración de un sistema capaz de realizar el seguimiento autónomo de personas con un robot aéreo no tripulado. Se ha demostrado que el HOG hace un reconocimiento muy bueno de varias siluetas de personas en la escena, sin embargo, aún falta por acoplar las órdenes que se envían al UAV con el seguimiento del

objeto central de la escena, que si bien con el filtro de partículas fácilmente podemos saber cuál objeto se debe seguir, las órdenes de movimiento aún son un tanto complejas debido a los factores externos muy variables que inherentemente se encuentran con los UAV.

Uno de los aspectos más significativos que saltan a la vista es la dificultad de estabilidad en los movimientos del UAV, sobre todo en condiciones de viento fuerte. Además una de las tareas en la que conviene trabajar fuertemente es en el seguimiento del objeto cuando se encuentran muchas personas (siluetas) u objetos del mismo tipo en la escena, sin perder de vista el objetivo principal.

Este tipo de sistemas nos permiten abrir un gran campo de posibilidades para el área de robótica aérea. El algoritmo de planificación utilizado puede ser mejorado realizando diversas pruebas hasta obtener los parámetros óptimos, de igual forma el reconocimiento y seguimiento de personas es dependiente del entrenamiento que reciba, esto nos da pauta a proponer diversos datasets que nos permitan enriquecer el conocimiento de nuestro algoritmo.

Este proyecto actualmente se sigue desarrollando y verificando mediante ciertas variantes para buscar una ejecución más precisa. Existe un amplio trabajo a futuro puesto que, por ejemplo, se puede utilizar un algoritmo RRT en tiempo real que permita generar nuevas trayectorias dependiendo de los obstáculos imprevistos que se puedan presentar, o bien mejorar la estabilidad del vuelo en corrientes fuertes de aire, de igual forma en el seguimiento de personas es posible hacer un mejor entrenamiento para la obtención de características donde se tomen factores claves como, diferentes tipos de iluminación, escenarios, tipos de segmentación, tamaño de los datasets, entre otros, además de mejorar las características del filtro de partículas para un rendimiento más eficiente del seguimiento.

Referencias

1. Garijo, D., López, J. I., Pérez, I.: Control de un vehículo aéreo no tripulado. Universidad Complutense de Madrid, facultad de informática, pp. 3 (2009)
2. Ibáñez, N.: Técnicas de procesamiento de imagen para el seguimiento de objetos desde vehículos aéreos no tripulados. Universidad de Valladolid, pp. 9 (2015)
3. Núñez-Escamilla, R.: Diseño, Construcción, Instrumentación y Control de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV). Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, pp. 13 (2010)
4. Escobar-Díaz, O.: Seguimiento de objetos con vehículos aéreos no tripulados. Tesis de maestría, FCC-BUAP, pp. 7, 11 y 12 (2015)
5. Kuffner, J., LaValle, S. M.: RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. In: Proc. 2000 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730, pp. 995–1001 (2000)
6. Karaman, S., Frazzoli, E.: Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning. International Journal of Robotics Research, Vol. 30, No. 7 (2011)

7. Devaurs, D., Siméon, T., Cortés, J.: Enhancing the Transition-based RRT to Deal with Complex Cost Spaces. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631158, pp. 4120–4125 (2013)
8. Bohlin, R., Kavraki, L. E.: A Randomized Algorithm for Robot Path Planning Based on Lazy Evaluation, in Handbook on Randomized Computing, pp. 221–249 (2001)
9. Plaku, E., Kavraki, L. E., Vardi, M. Y.: Motion Planning with Dynamics by a Synergistic Combination of Layers of Planning. In: IEEE Transactions on Robotics, DOI: 10.1109/TRO.2010.2047820 (2010)
10. Pedestrian Dataset INRIA. <http://pascal.inrialpes.fr/data/human>
11. Pedestrian Dataset MIT. <http://cbcl.mit.edu/software-datasets/PedestrianData.html>
12. SVMLight. <http://svmlight.joachims.org/>
13. OMPL App. <http://ompl.kavrakilab.org/gui.html>

Integración de técnicas de inteligencia artificial en ambiente domótico

Georgina Resendíz, Enrique Mendéz, Ana Luisa Sanchez, Fernando Gudiño

UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería,
Ciudad de México, México

{gmontserb, enr321, ana100394, fernando.gudino}@comunidad.unam.mx

Resumen. Para la comodidad y seguridad de los usuarios dentro de su vivienda se ha desarrollado el área de la Domótica que permite implementar soluciones de automatización y control inteligente. En este proyecto se ha implementado en un prototipo a escala la integración de tres secciones principales dentro de los sistemas domóticos: en el área de confort se implementa controlador difuso de aire acondicionado y controlador de gradiente de iluminación, para el área de seguridad se implementa un control de ingreso por reconocimiento de caras; para el área de automatización de elementos ON/OFF se usa un servidor web para explotar un service web de clima. Para la interacción del sistema domótico con el usuario se ha diseñado una interfaz intuitiva que facilita la manipulación de actuadores y la monitorización del estado de los sensores y demás elementos. Adicionalmente se integra el Sistema por medio de Webservices, lo que permite adaptarse al Internet de las Cosas IoT.

Palabras clave: automatización, casa inteligente, control difuso, domótica, prototipo, Internet de las cosas.

Integration of Artificial Intelligence Techniques in a Domotic Environment

Abstract. Domotics has been developed for the comfort and security of users in their homes, aiming to implement solutions on automatic and intelligent control. In this work, we have implemented a scale prototype integrating three main sections under the domotics systems: a fuzzy controller for air conditioning and a controller for gradient light have been implemented at the comfort area, a control system based on facial recognition has been applied in the security area, and an automated ON/OFF controller for electronic devices has been done in a web server to use a web service for climate monitoring. In addition, we designed and implemented an intuitive user interface for monitoring the state of the sensors and other electronic devices, as well

as for manipulating the actuators. Additionally, the system is integrated via Webservices aiming to adapt for the Internet of Things IoT.

Keywords: automation, intelligent house, fuzzy control, domotics, prototype, Internet of things.

1. Introducción

Una casa inteligente o Smart Home es aquella que posee una inteligencia ambiental y control automático, esto permite responder al comportamiento de sus habitantes y brindar diversas aplicaciones [3, 4, 6, 7, 10-12, 14]. Es importante destacar que una casa inteligente, además de estar automatizada, requiere de una conexión a Internet para permitir comunicar la información de ésta al dispositivo móvil, Tablet o computadora a través de aplicaciones móviles.

Las casas inteligentes han sido tema de investigación desde hace algunas décadas. Uno de los primeros trabajos en esta área fueron los “Smart Rooms”, los cuales fueron implementados por el MIT Media Lab, Pentland, en el año de 1996. Posteriormente, la domótica se continuó desarrollando teniendo tres grandes ramas: la rama asiática, liderada por Japón, que cuenta con equipos especializados bajo su tecnología y formatos propios; la rama estadounidense, que abarca el Norte de América, que presenta estándares diferentes a los japoneses; y la rama europea, que presenta la mayor calidad y cantidad de desarrollo tecnológico en esta área, así como la mayor cantidad de infraestructura y empresas instaladas.

En el estado actual, existen muchos tipos de casas inteligentes que se dividen en tres categorías principales según la aplicación [10, 20]:

1. Primera categoría: Provee servicios de detección y reconocimiento de las acciones o estado de salud de los habitantes para el cuidado de adultos mayores, cuidado del estado de salud y/o cuidado de niños.
2. Segunda categoría: Provee servicios de almacenamiento y recuperación de elementos multimedia (foto o video) capturados dentro de la casa inteligente.
3. Tercera categoría: Provee servicios de vigilancia, que permiten capturar datos del ambiente que al ser procesados brindan información que puede ayudar en la activación de alarmas, para proteger la casa inteligente y a sus habitantes de robos y desastres naturales (como inundaciones, entre otros).

Además, se encuentra un tipo especial de casa inteligente la cual ayuda a sus habitantes a reducir el consumo de energía mediante el monitoreo y control de los dispositivos y la reprogramación del tiempo de operación de acuerdo a la demanda de energía y suministro.

Cabe señalar que cada vez son más las soluciones domóticas que integran la inteligencia artificial en la automatización de la toma de decisiones y autonomía del sistema [2, 5, 7, 8, 10-12]

Una arquitectura centralizada en sistemas domóticos permite concentrar y administrar información y recursos desde un controlador centralizado, mismo que se encarga de enviar y recibir señales de los actuadores, interfaces y sensores [11].

Las soluciones domóticas dependen de los requerimientos del usuario; ya sea que necesite sistemas estandares, o que requiera de sistemas mas especializados, por lo cual se tiene una solución ad-hoc a cada persona o personas que habiten o interactuen con el Sistema. Los sistemas domóticos pueden ser controlados desde una variedad de interfaces que incluyen pero no se limitan a; computadora (via local, o remota por wifi, bluetooth, Ethernet, etc) o dispositivo móvil (Smartphone, tablet, etc.)[1].

Uno de los elementos que diferencian a los sistemas domóticos de los sistemas tradicionales de automatización es la capacidad de explotar otros recursos adicionales a los que la propia casa tiene, tal es el caso de los servicios web, como predicción de clima, o adquisición de productos via elementos conectados a internet de las cosas (IoT) como refrigeradores o televisores inteligentes, lo cual permite incrementar la red a otros espacios vitales de los usuarios [3].

Hoy en día con el surgimiento del Internet de las cosas y la conexión a Internet de cualquier dispositivo tecnológico, es de suma importancia tener el control de los sistemas a grandes distancias a través de una red global de comunicaciones, por tal motivo, el desarrollo de una interfaz que pueda comunicarse y controlar por medio de la red de redes a cualquier dispositivo electrónico es de gran impacto comercial y científico. Más aún, si esta interfaz presenta una forma de interacción más natural entre el humano y el sistema a controlar, las ventajas de este sistema pueden aumentar con respecto a la inclusión de sectores poblacionales con distintos tipos de discapacidades físicas.

2. Prototipo de casa domótica

Se diseñó, contruyó y probó un prototipo de casa domótica implementado con controladores Arduino Mega [4, 15, 19], con una interfaz creada en Visual Studio 2015 que de acuerdo al tipo de usuario (administrador o usuario) se permite monitorear o controlar los índices de confort de los espacios habitables como son temperatura, humedad, aire acondicionado, iluminación, seguridad y automatización de elementos ON/OFF.

El prototipo implemntado se basa en los reglamentos para casa habitación establecidas por El Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores y por Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [22, 23]. En cuyos lineamientos se consideran las siguientes dimensiones como las minimas necesarias para una calidad de vida aceptable [23]: Frente del lote: 6 m y Fondo del lote: 15 m.

El plano arquitectónico se muestra en la Figura 1 y se considera una escala de 1:20. La habitaciones numeradas con I y VI representan las recamaras, el número II es el baño, mientras que III, IV y V refieren a la estancia, el comedor y la cocina respectivamente.

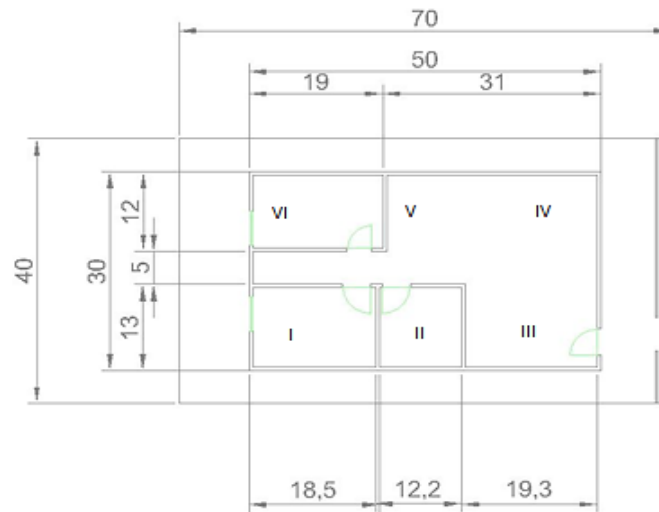


Fig. 1. Plano Arquitectónico del prototipo de Casa Domótica.

A continuación, se dará una breve descripción de las especificaciones funcionales del sistema de acuerdo a lo que se considera un usuario estandar.

2.1. Control de aire acondicionado

En el diseño del prototipo se realizó una distribución de seis habitaciones (sala, comedor, cocina, baño, habitación adultos, habitación niños) de las cuales solo a las tres que componen una habitación grande se les colocaron sensores de temperatura y se aplicó un controlador difuso tipo Sugeno [24] con dos entradas (temperatura y humedad) para determinar las salidas (nivel de velocidad y temperatura del aire acondicionado).

Las habitaciones que fueron acondicionadas son la sala, el comedor y la cocina. A dichas secciones se les colocaron tres sensores de temperatura que, usando la distribución de medias ponderadas, permiten regular el nivel de velocidad del ventilador para temperaturas altas y el ajuste de la calefacción para temperaturas bajas mediante el controlador tipo Sugeno.

Dentro del prototipo no se colocaron sensores en el pasillo por ser un espacio muy reducido y que no necesitaba de un control de temperatura. En el caso del baño no se colocó sensor por ser un lugar de humedad variable y, por lo tanto, no es recomendable colocarlo.

2.2. Control de iluminación

Para poder realizar el control de iluminación se dividió el prototipo en siete secciones. La primera sección corresponde a la sala, la segunda al comedor, la tercera a la cocina, la cuarta al baño, la quinta al pasillo entre las habitaciones, la sexta a la habitación de los adultos y la séptima a la habitación de los niños.

El desplazamiento dentro de las habitaciones debe ser de manera secuencial, esto se debe a que no se puede ir de una habitación a otra sin pasar por una intermedia, por ejemplo, si se quiere ir de la sala al baño obligatoriamente se debe de pasar por el pasillo.

El control de la iluminación se realiza por el método de gradiente por lo que al pasar de una habitación a otra se presentan cambios graduales en los niveles de iluminación, siempre y cuando la habitación destino esté ocupada previamente, esto con la finalidad de no deslumbrar a las personas que ya estaban en la habitación; de otra forma, si la habitación destino no está ocupada, el nivel de intensidad luminosa de la habitación destino se ajustará instantáneamente al nivel que tenga la habitación origen.

2.3. Control de ingreso

El sistema de ingreso se divide en dos partes, la primera es el acceso por RFID y reconocimiento facial, para mover automáticamente la cerca y la segunda es el acceso a la casa a partir de un teclado matricial con contraseñas y una cámara de reconocimiento facial.

Se colocó un módulo lector RFID RF para acceder al patio principal de la casa, cuando se le acerca un tag autorizado el controlador envía una señal al modulo de control que activa la camara de videovigilancia y toma una imagen de la cara del conductor, si tanto el tag como la imagen coincide con los datos almacenados por el Sistema se envía la señal de respuesta y se abre el acceso, al mismo tiempo que se enciende un led intermitente de advertencia.

Si el ingreso no se hace por la cerca y se hace via peatonal para poder ingresar a la vivienda se tendrá que colocar la contraseña correcta mediante el teclado matricial.

El sistema de acceso por teclado matricial permite ingresar una clave de acceso. Adicionalmente al presionar el teclado se envía una señal que active la camara de reconocimiento facial. En caso de que la contraseña sea incorrecta o el rostro no se encuentre en la base de datos, el sistema mostrará un error y encenderá un led rojo de advertencia si se continúa ingresando una contraseña incorrecta el sistema se bloqueará durante 30 segundos y pasado este tiempo se reiniciará. Si se presiona alguna tecla durante el bloqueo del sistema se activará una alarma sonora. Cuando, tanto la contraseña sea correcta y el rostro sea autorizado, se mostrará un mensaje de bienvenida para ingresar a la vivienda.

Por otra parte si el sistema detecta un intento de acceso no autorizado durante el tiempo en que los habitantes no se encuentran, se enviará un correo de advertencia con datos de la persona que intento entrar (imagen del a videocámara) y la hora del intento.

2.4. Automatización de elementos on/off

Dentro de los elementos a automatizar se tienen aparatos electricos que no tienen una interfaz electronica inteligente tal es el caso de una radio grabadora, un calentador eléctrico y diversas lámparas, los cuales se encuentran conectados a un módulo de relevadores respectivamente con su etapa de potencia, así también para las habitaciones de niños y de adultos se les implementaron cortinas controladas por servomotores. Todos estos elementos se pueden controlar desde la interfaz de usuario manipulando los botones hacia ON y OFF.

Además del control de las cortinas y los elementos de potencia también se pueden controlar el estado de los LEDs de la parte de iluminación por lo que se podrán encender o apagar estos elementos.

2.5. Automatizacion de elementos con webservices

Un servicio web (en inglés, web service o web services) es una tecnología que utiliza un conjunto de protocolos y estándares que sirven para intercambiar datos entre aplicaciones [18]. Con esta posibilidad se puede autoatizar los sistemas de riego considerando la humedad relativa y la temperatura máxima del día, asi como la cobertura de nubes. Si las condiciones se presentan de manera adecuada se activará el Sistema de riego, de lo contrario dicho Sistema no se ejecutara.

3. Arquitectura del sistema domótico

La arquitectura que presenta el sistema domótico es centralizada. Esto es debido a que se tiene una computadora que gestiona cada modulo e interactua con un microcontrolador que controla los sensores y elementos de las secciones de aire acondicionado, iluminación, automatización y control de ingreso con topología estrella, tal como se muestra en la Figura 2.

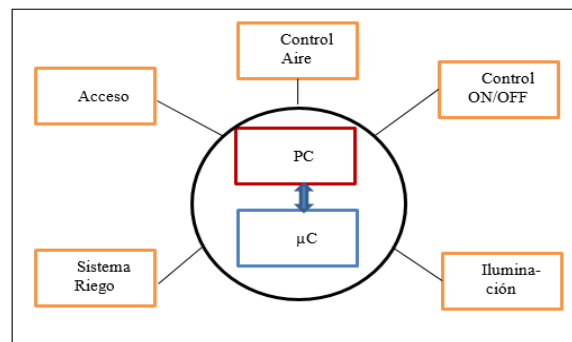


Fig. 2. Arquitectura general del Sistema Domótico.

3.1. Controlador difuso de aire acondicionado

El confort térmico es la sensación que expresa la satisfacción de los usuarios de los edificios con el ambiente térmico. Por lo tanto es subjetivo y depende de diversos factores: Temperatura del aire, Humedad relativa del aire, Movimiento de aire (flujo y velocidad), Temperatura media radiante, Factores personales (actividad laboral y cambio metabólico), Aislamiento térmico (Vestimenta de la persona) [6].

Como el cuerpo humano reacciona de maneras distintas ante el frío y el calor, se efectúan cálculos diferentes en invierno y en verano para medir la sensación térmica. Durante el invierno, se considera la influencia de la temperatura ambiente en combinación con la velocidad del viento. Por otra parte, durante el verano, el factor con mayor incidencia sobre la sensación térmica es la humedad, ya que ésta afecta directamente a la capacidad de generación de sudor de la piel. Dada las condiciones preponderantes en la república Mexicana se decidió solo considerar las condiciones de verano.

La lógica difusa surge entre los años sesenta y setenta propuesta por Lofti A. Zadeh [27]. Esta lógica permite simular los mecanismos de razonamiento humano para el control de sistemas, basados en la experiencia, proporciona un modelo matemático con el que se puede tratar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos y de este modo poder resolver problemas usando métodos matemáticos y computacionales.

Para el diseño de un controlador difuso de climatización se utiliza la arquitectura tipo Sugeno [24] con entradas provenientes de los diversos sensores de temperatura y humedad, las cuales primero son preprocesadas para posteriormente ingresar al Sistema difuso, como salidas se tiene la velocidad del ventilador y el tipo de aire (frío, caliente), tal como se muestra en la figura 3.

Para la variable de entrada temperatura, el universo de discurso se dividió en siete conjuntos difusos: mucho calor, bastante calor, algo de calor, neutral, algo de frío, bastante frío y mucho frío. Por otra parte la variable de entrada humedad se dividió en tres conjuntos: baja, media y alta.

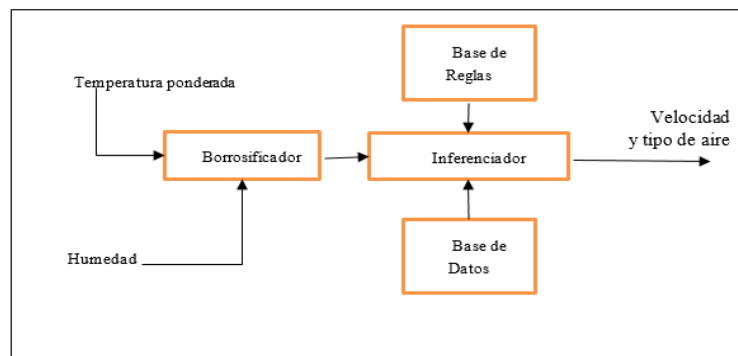


Fig. 3. Diseño del controlador difuso de aire acondicionado.

Por su parte la salida tipo de aire se divide en dos tipos: caliente y fría; mientras que control de velocidad esa dado por el controlador Sugeno

Se puede observar en la Figura 2 que el sisema no toma las enradas de temperatura directa, sino que esta es poderada, para ello se utilizo la siguiente formula

$$T=w_i*t_i. \quad (1)$$

En la cual w_i es el peso asignado por la distancia lineal de la sistema de aire acondicionado al sensor en particular. La justificación se base en el hecho de que la accionar el aire acondicionado, las diversas superficies se enfriaran o calentaran mas rápido en función de la cercania a la Fuente de aire.

3.2. Control de iluminación

La iluminación adecuada es primordial para el desempeño correcto de las actividades humanas, sin embargo, de los factores medibles: flujo luminoso, intensidad luminosa, luminancia e iluminancia, es esta ultima la que de manera recurrente podemos utilizar como parametron de control.

Para poder implementar un Sistema de control de iluminación se decidio realizar un ajuste por medio de gradient, de acuerdo a la sigueinte expresión.

$$L_i = L_{i-1} \pm \Delta L \quad (2)$$

En la cual ΔL se gradua en cinco porciento cada 5 segundos, con el fin de evitar el deslumbramiento de las personas que transistan entre las habitaciones de la casa, así como evitar que se pierda el nivel adecuado de iluminacón actual.

3.3. Control de acceso por reconocimiento de caras

La visión artificial, es una disciplina que consiste en adquirir, procesar y modelar matemáticamente los procesos de percepción visual en los seres vivos, captando imágenes provenientes del mundo real, con la finalidad de generar datos numéricos o simbólicos que puedan ser cuantificados o codificados con la finalidad de utilizarlos en algoritmos y programas computacionales. Los datos recabados podrán ser utilizados en la tomas de decisiones necesarias para llevar a cabo un proceso determinado. Un sistema con visión artificial puede, entre otras cosas, reconocer figuras y patrones. La combinación de estas características con un Sistema adicional de control provee un método robusto de control de ingreso.

Para el Sistema de reconocimiento de caras se opto por el método de Eigenfaces [9, 13, 25, 26], por ser un Sistema conocido y desarrollado por la mayoría de los lenguajes de programación mediante librerías, tal es el caso de OpenCV [16, 17, 24]. El desarrollo del Sistema se verifica en la Figura 4.

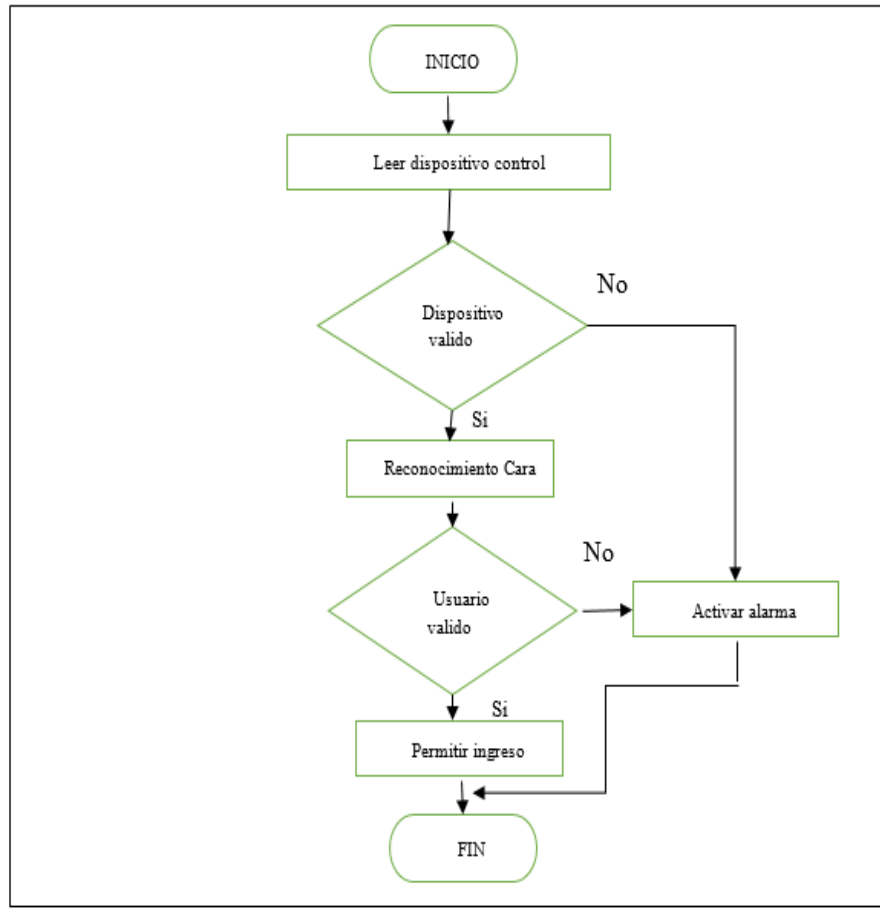


Fig. 4. Sistema de control de acceso por reconocimiento de rostros.

3.4. Automatización de sistema de riego

Para la explotación del servicio Web del Sistema meteorológico [21], se utiliza XMPP [18], protocolo abierto basado en XML (*eXtensible Markup Language*), diseñado para dar soluciones de comunicaciones en tiempo real.

Usando la tecnología de transmisión XML se intercambian elementos conocidos como *stanzas* entre dos entidades de una red. Una stanza se puede entender como una unidad básica de información. Un ejemplo del servicio web se muestra en la Figura 5.

Se observan diversos elementos, pero los de interés se relacionan con la probabilidad de precipitación, la humedad relativa y la temperatura máxima.

```
{
  "CityId": "MXAS0002",
  "Name": "Aguascalientes",
  "StateAbbr": "Ags.",
  "DayNumber": "0",
  "ValidDateUtc": "20170222T000000Z",
  "LocalValidDate": "20170222T070000Z",
  "HiTempF": "80",
  "LowTempF": "43",
  "HiTempC": "27",
  "LowTempC": "6",
  "PhraseDay": "Cielo mayormente despejado. Máxima de 26 C. Vientos del ESE y variable.",
  "PhraseNight": "Cielo mayormente despejado. Mínima de 6 C. Vientos del ENE y variable.",
  "SkyText": "Mayormente soleado",
  "ProbabilityOfPrecip": "0",
  "RelativeHumidity": "4",
  "WindSpeedMph": "1",
  "WindSpeedKm": "2",
  "WindDirection": "147",
  "WindDirectionCardinal": "SSE",
  "CloudCoverage": "23",
  "UvIndex": "6",
  "UvDescription": "Alto",
  "IconCode": "65",
  "IconCodeNight": "97",
  "SkyTextNight": "Despejado",
  "Latitude": "21.88",
  "Longitude": "-102.3"
}
```

Fig. 5. Servicio web explotado para el control de riego.

4. Implementación de prototipo y resultados

Finalizado el trabajo de diseño, construcción y prueba del prototipo se comprobó que el sistema domótico funcionó adecuadamente. Se obtuvieron fotografías de la vista frontal, superior y trasera del prototipo de casa domótica que se muestran en las Figuras 6,7 y 8.



Fig. 6. Prototipo de casa domótica (vista frontal).

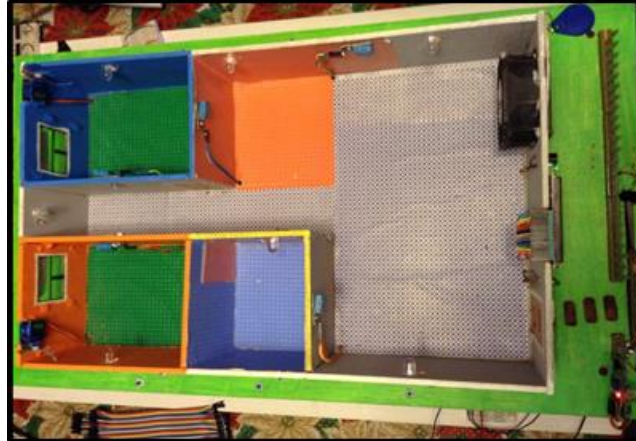


Fig. 7. Prototipo de casa domótica (vista superior).

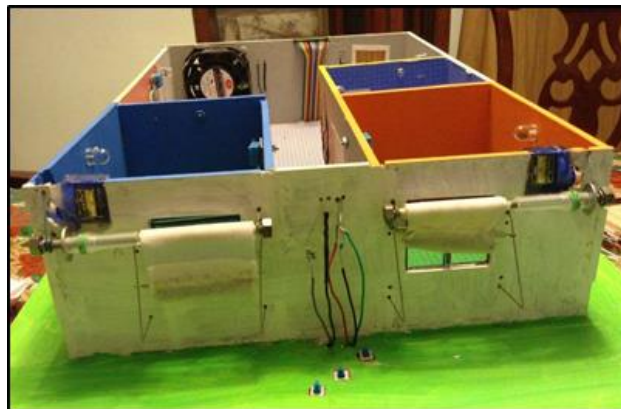


Fig. 8. Prototipo de casa domótica (vista trasera).

Se probó la interacción del usuario a través de la interfaz de Visual Studio 2015 para el monitoreo o control de los elementos del sistema domótico, obteniendo resultados satisfactorios tanto para la interfaz de usuario como la de administrador.

Se realizó un análisis de los costos directos e indirectos del Proyecto. De acuerdo a los valores de costos totales. La Tabla 1 muestra un comparativo de los precios comerciales de un Sistema similar y el propuesto¹.

¹ Los precios están en moneda nacional

Tabla 1. Comparativo de precios de un Sistema comercial y el implementado en el prototipo.

Área	Precio Sistema comercial	Precio propuesto
Seguridad	7000	3000
Iluminación ²	2200	1200
Temperatura ²	2000	1000
Potencia ³	1000	500

Se observa que el proyecto es viable si se va a comercializar debido a que el precio de venta es inferior a soluciones comerciales que duplican o triplican sus costos. Adicionalmente el mantenimiento del sistema es reducido y la escalabilidad es mayor.

5. Conclusiones

Se cumplieron los objetivos planteados en el desarrollo del prototipo de casa domótica, logrando integrar satisfactoriamente todos los elementos de un sistema domótico en una sistema funcional. Así mismo se lograron instrumentar diferentes tipos de sensores, adquiriendo nuevos conocimientos acerca de su funcionamiento.

Este proyecto nos permitió determinar las condiciones de un entorno favorable (temperatura, humedad, iluminación) que permitan tener un ambiente confortable para el usuario, con base a esto se lograron automatizar las funciones de aire acondicionado mediante un controlador difuso, iluminación de acuerdo al método de gradiente, automatización de elementos on/off explotando servicios Web y control de ingreso por reconocimiento facial, desarrollando una interfaz amigable para facilitar el monitoreo y control de los mismos.

Así también, se concluyó que un proyecto domótico involucra una gran inversión de tiempo y recursos, tanto de capital humano como de material y herramientas, por lo cual los precios a la venta de este tipo de proyectos suelen ser elevados. Esto nos ha motivado a continuar dentro de esta área para el futuro desarrollo de una empresa de soluciones domóticas.

Adicionalmente el sistema propuesto, permite una fácil y rápida interacción con Internet de las cosas, ya que puede comunicar hardware-hardware de forma autónoma y manual. Este sistema también presenta una alternativa para personas con capacidades diferentes, ya que presenta una flexibilidad de reconfiguración personal.

² Precio por habitación.

³ Precio por elemento a instrumentar.

Referencias

1. Acampora, G., Cook, D. J., Rashidi, P., Vasilakos, A. V.: A survey on ambient intelligence in healthcare. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 12, pp. 2470–2494 (2013)
2. Alfano, G., Cannistraro, G., D'Ambrosio, F. R., Rizzo, G.: Notes on the use of the tables of standard ISO 7730 for the evaluation of the PMV index. Indoor Built Environment (1996)
3. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G.: The internet of things: A survey. Computer networks, Vol. 54, No. 15, pp. 2787–2805 (2010)
4. Baraka, K., Ghobril, M., Malek, S., Kanj, S., Kayssi, A.: Low cost arduino/android-based energy-efficient home automation system with smart task scheduling. Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN), Fifth International Conference on, IEEE, pp. 296–301 (2013)
5. Brush, A. J., Lee, B., Mahajan, R., Agarwal, S., Saroiu, S., Dixon, C.: Home Automation in the Wild: Challenges and Opportunities. Microsoft Research (2011)
6. Ciriza, P.: Evaluación del Bienestar térmico en locales de trabajo cerrado INSHT. Spain (2013)
7. Cook, D. J.: An agent-based smarthome. In: Pervasive Computing and Communications, Proceedings of the First IEEE International Conference on, IEEE, pp. 521–524 (2003)
8. Cook, D. J.: Ambient intelligence: technologies, applications and opportunities. Pervasive and Mobile Computing, Vol. 5, pp. 277–298 (2009)
9. Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., Gómez-Sanchis, J., Blasco, J.: Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. Food and Bioprocess Technology, Vol. 4, No. 4, pp. 487–504 (2011)
10. De Silva, L.C.: State of the art of smart homes. Eng. Appl. Artif. Intel. (2012)
11. Dobelle, W. H.: Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex. ASAIO journal, Vol. 46, No. 1, pp. 3–9 (2000)
12. Henríquez, M., Palma, P.: Control automático de condiciones ambientales en domótica usando redes neuronales artificiales. Información tecnológica, Vol. 22, No. 3, pp. 125–139 (2011)
13. Hjeltnæs, E., Low, B. K.: Face detection: A survey. Computer vision and image understanding, Vol. 83, No. 3, pp. 236–274 (2001)
14. Li, R. Y. M., Li, H. C. Y., Mak, C. K., Tang, T. B.: Sustainable Smart Home and Home Automation: Big Data Analytics Approach. International Journal of Smart Home, Vol. 10, No. 8, pp. 177–198 (2016)
15. Monk, S.: 30 Arduino Projects for the evil genius. United States of America: McGraw-Hill, pp. 61–67 (2010)
16. Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., Eruhimov, V.: Real-time computer vision with OpenCV. Communications of the ACM, Vol. 5, No. 6, pp. 61–69 (2012)
17. Uke, N., Thool, R.: Moving vehicle detection for measuring traffic count using opencv. Journal of Automation and Control Engineering, Vol. 1, No. 4 (2013)
18. Saint-Andre, P.: Extensible messaging and presence protocol (XMPP): Core (2011)
19. Fitzgerald, S.: Arduino Libro de Proyectos. Torino, Italia: Arduino LLC, pp. 137–143 (2013)
20. Home Automation & Wiring. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics (1999)
21. Pronostico Por Ciudades GZ. Sistema Meteorológico Nacional. Mexico, <http://smn.cna.gob.mx/es/web-service-api> (2017)

22. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Diario Oficial dela Federación, 3 de julio de 1987 (1987)
23. Dimensiones minimas de vivienda de acuerdo a disposiciones y reglamentos oficiales. INFONAVIT (2006)
24. Sugeno, M.: Theory of fuzzy integrals and its applications. Ph.D. thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan (1974)
25. Turk, M., Pentland, A.: Face recognition using eigenfaces. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 586–591 (1991)
26. Youssif, A. A., Asker, W. A.: Automatic facial expression recognition system based on geometric and appearance features. Computer and Information Science, Vol. 4, No. 2, pp. 115 (2011)
27. Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. Information and control, Vol. 8, No. 3, pp. 338–353 (1965)

Controladores inteligentes para invernadero hidropónico

Pedro Ponce, Arturo Molina, Omar Mata

Tecnológico de Monterrey, Ciudad de México,
México

pedro.ponce@itesm.mx, armolina@itesm.mx, omar.mata@itesm.mx

Resumen. En este caso de estudio se presenta el diseño de un prototipo funcional de un invernadero hidropónico inteligente que permite cultivar frutos, como el jitomate, durante cualquier época del año, manipulando variables específicas como la temperatura y la humedad del microclima dentro del invernadero. Los objetivos del presente caso estudio son analizar las partes que componen el prototipo como es la estructura del invernadero. Se analiza de manera particular el efecto que el viento de la zona provoca sobre esta, así como describir e implementar diferentes técnicas de control básico e inteligente para manipular el microclima en el invernadero. La metodología a seguir inicia por describir las características del cultivo, las condiciones climáticas de la zona, ubicación del invernadero, orientación, material de la estructura, la cubierta y la cimentación, además de implementar dispositivos para la automatización, técnicas de control y herramientas de simulación como Matlab® y LabVIEW™, que se aplican para la generación y manipulación del microclima. Los resultados muestran características mecánicas como los desplazamientos, los esfuerzos, las tensiones, los momentos o las fuerzas de reacción de los invernaderos con estructuras tipo túnel con cenital, mariposa, diente de sierra, multi-túnel, parral capilla y sombrero chino, para determinar la más factible a ser construida respecto al clima de la Ciudad de México. También se describe la simulación del comportamiento estructural y del sistema de control inteligente del invernadero que se construyó en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey campus Ciudad de México (ITESM CCM).

Palabras clave: invernadero, estructuras, sistemas de control, materiales, clima.

Smart Hydroponic Greenhouse Controllers

Abstract. In this case study we present the design of a functional prototype of an intelligent hydroponic greenhouse that allows to grow fruits, like tomato, at any time of the year, manipulating specific variables such as temperature and humidity of the microclimate inside the greenhouse. The objectives of the present case study are to analyze the parts that compose the prototype as it is the structure of the greenhouse.

The effect of the wind in the region over the structure is analyzed. And to describe and implement different basic control techniques and intelligent techniques to manipulate the microclimate in the greenhouse. The methodology to be followed begins by describing the characteristics of the crop, the climatic conditions of the area, the location of the greenhouse, its orientation and structure material, its cover and foundation, as well as implementing devices for automation, control techniques and simulation tools such as Matlab® and LabVIEW™, which are applied for the generation and manipulation of the microclimate. The results show mechanical characteristics such as displacements, stresses, moments or reaction forces of greenhouses with tunnel structures with zenith, butterfly, sawtooth, multi-tunnel, chapel and Chinese hat, to determine the most feasible to be built with respect to the climate of Mexico City. Simulation of the structural behavior and the intelligent control system of the greenhouse is also described, which was built at the Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey campus in Mexico City (ITESM CCM).

Keywords: greenhouse, structures, control systems, materials, climate.

1. Introducción

En México, se realizan inversiones privadas y públicas para la instalación, operación y automatización de estructuras para tener agricultura protegida (AP) como invernaderos, macrotúneles, malla anti-insectos o casa sombra [1]. Las hectáreas protegidas han evolucionado desde 1998 a 2008 a una Tasa Media de Crecimiento Anual (TMCA) de 34.5 %. Moreno et al. [2] mencionan que en 2008 de 8,834 ha con AP, 49% eran de invernaderos tecnificados y de mediana tecnificación y el 5 % de malla sombra. Si este tipo de invernaderos considera el uso de la hidroponía para obtener mayores rendimientos que por unidad de superficie tienen de 100 a 3000 % más que el cultivo convencional en el suelo [3]. La tasa de crecimiento nacional de la agricultura protegida es de 20 %, aunque los proyectos instrumentados y controlados en el sector presentan tasas de sobrevivencia de 60 % [4], debido a la falta de tecnologías adecuadas para las condiciones particulares de cada región del país y a la instalación de estructuras en lugares inapropiados que incrementan los costos de inversión y de producción. Para aumentar la producción de un cultivo es necesario optimizar la tecnología aplicada con técnicas de control específicas para manipular el microclima dentro de un invernadero. Desde 1970 se usan técnicas de control en los invernaderos como el PID (control proporcional + integral + derivativo) o el control apagado/encendido que son técnicas convencionales y los controles óptimo y predictivo, que son técnicas avanzadas, aplicando modelos del clima por ser no lineal e inestable. El principal objetivo del modelado del microclima es tener una primera aproximación del comportamiento del sistema antes de validar e implementar en un invernadero real. Lafont y Balmat [5] explican el uso de la teoría del control difuso para identificar el sistema del invernadero basado en datos de entrada y salida. Bennis et

al. [6] mencionan otras técnicas como: el modelo predictivo, predictivo generalizado, óptimo, lineal cuadrático adaptivo, redes neuronales, lógica difusa, no lineal, control robusto o el control compatible. Las técnicas de control convencional son importantes en las aplicaciones reales de ingeniería, pero generalmente no todas consideran las propiedades como la interacción entre las variables, las no linealidades, las múltiples restricciones y los conflictos entre objetivos que pueden existir en el sistema de control del microclima del invernadero, siendo necesario hacer una combinación entre ellas como menciona Haigen Hu [7].

1.1. Técnicas de control para manipulación del microclima

Tabla 1. Características básicas de controladores empleados en invernaderos.

Controlador	Nivel de tecnología	Complejidad de implementación	Complejidad de uso	Mantenimiento
CTDSR	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Encendido-apagado	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
PID	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Fuzzy	Alto	Medio	Medio	Medio

Tabla 2. Tipos de control para invernadero con base en el clima.

Clima	Tipo de Control	Invernadero
Climas tropicales o desérticos secos	PID, FUZZY	Túnel con cenital, Mariposa, Multi-Túnel, Capilla, Sombrero Chino
Desierto subtropical y climas mediterráneos	CDTWF, ON-OFF, PID, Fuzzy	Túnel con cenital, Mariposa, Multi-Túnel, Capilla, Sombrero Chino
Climas tropicales húmedos	CDTWF, ON-OFF, PID, Fuzzy	Diente de sierra, Parral modular, Capilla, Túnel con cenital, Mariposa, Sombrero chino
Climas templados	ON-OFF, PID, FUZZY	Túnel con cenital, Mariposa, Multi-Túnel, Capilla
Climas templados fríos en latitudes superiores a 45 °:	ON-OFF, PID, FUZZY	Venlo

El control aplicado a elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos de un invernadero, se implementa considerando la estructura física, ventilación, sistema de humidificación, riego y suministro de nutrientes usando sensores, actuadores, un controlador y técnicas de control para regular el microclima en el interior del invernadero. Los tipos de control aplicados a los invernaderos son: control por tiempo definido por la experiencia del agricultor, encendido-apagado y control PID. Respecto a la complejidad, características de instalación y uso de técnicas de control, se muestra en la Tabla 1 un resumen con base en el tipo de control a emplear y en la Tabla 2 se propone el control aplicado a un tipo de clima específico.

Existen zonas específicas (por ejemplo, climas extremos de invierno) o tipos de cultivo como las rosas que requieren de muchos cuidados y control de las variables, demostrando que este tipo de control no es suficiente, siendo necesario tener un sistema de control inteligente.

1.2. Estrategias de control inteligente

Existen invernaderos que utilizan el control inteligente para la manipulación del microclima, así como para el suministro de nutrientes del cultivo. Para diseñar el control se requiere un lazo cerrado (Figura 1), que involucra sensores, actuadores y estrategias de control que son incluidos en el modelo dinámico del invernadero. Para resolver la función de transferencia de este modelo, los métodos no lineales que se emplearon en este caso de estudio son los expuestos por Isidori, Sastry y Khalil [8, 9, 10].

Realimentación/ prealimentación linealizada: Su objetivo es transformar algebraicamente un sistema dinámico no lineal en uno lineal que otras técnicas de control lineal pueden aplicar.

Control de modo deslizamiento (SMC): La acción del controlador es conmutar a una frecuencia específica. La regla de control es usada para manipular el error del sistema a un hiper plano en el espacio de estados, cuando la superficie de deslizamiento es alcanzada, el estado del sistema se mantiene en conmutación o deslizamiento hasta tener un estado de equilibrio.

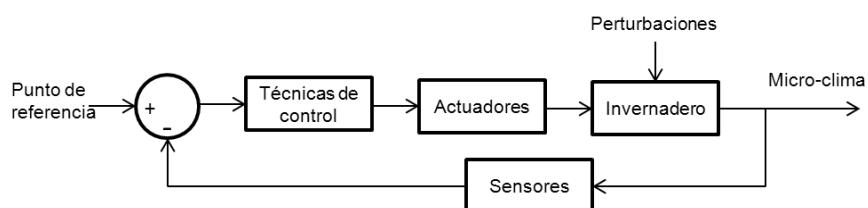


Fig. 1. Esquema de lazo de control de un invernadero.

Lógica difusa: Su objetivo es construir un modelo capaz de controlar la planta del sistema sin usar modelos en términos matemáticos. Los sistemas de lógica difusa son muy

utilizados en dos contextos generales: en situaciones de sistemas altamente complejos cuyos comportamientos no son muy claros y en situaciones donde se necesita una rápida aproximación.

ANFIS (Sistema de inferencia neuro- difuso adaptivo): Es una representación gráfica de una red con un sistema difuso de tipo T-S. Esta combina los beneficios de una red neuronal con la inferencia de un sistema difuso, aprovechando un mismo modelo que tiene como ventajas ser más rápido aprendiendo, exacto y mejor capacidad de gestión de datos. Tiene un sistema de inferencia difuso, donde los parámetros de la función de membresía se ajustan por la formación de un algoritmo híbrido que combina el gradiente descendiente y el método de mínimos cuadrados.

2. Estructura del invernadero

Con base en la mecánica de los materiales y las consideraciones estructurales como la forma o las dimensiones, se realizó la simulación del impacto del viento en invernaderos como túnel con cenital, mariposa diente de sierra, multitúnel, parral capilla y sombrero chino en el programa INVENTOR ® de AUTODESK ®, para obtener características mecánicas como los desplazamientos, los esfuerzos, las tensiones, los momentos o las fuerzas de reacción y seleccionar el que presente menos problemas estructurales. Por la magnitud de información que se obtiene en el proceso INVENTOR ®, solo se reportan los invernaderos que tienen valores más altos en las variables mostradas en la Tabla 3, teniendo como condiciones iniciales: velocidad de viento de 30 km/hr (como lo indico el Servicio Meteorológico Nacional en otoño del 2013, que puede consultarse en CONAGUA [11]), orientación Norte-Sur y material de la estructura en acero galvanizado. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del análisis realizado a un invernadero tipo Venlo.

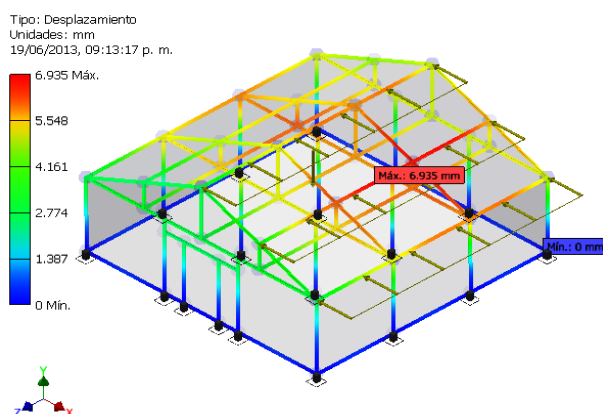


Fig. 2. Análisis mecánico de un invernadero tipo venlo.

Tabla 3. Características mecánicas de diferentes invernaderos después de inducir una fuerza a través de viento sobre la estructura.

Características / tipo de invernadero	Desplazamiento (mm)	Fuerza de reacción (N)	Momento (Nmm)	Esfuerzo normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)	Esfuerzo de torsión (MPa)
Túnel con cenital	4.876	155.762	68379.112	12.792	0.499	0.855
Mariposa	45.908	229.480	456595.175	85.416	1.599	2.109
Diente de Sierra	10.824	394.935	271493.092	50.789	1.549	0.838
Multi- túnel	4.888	327.602	194233.670	46.866	1.095	0.388
Parral	7.011	386.000	141205.529	29.003	2.156	2.170
Túnel	6.242	67.523	91531.392	17.619	0.275	0.439
Capilla	6.935	304.677	185057.571	34.619	1.193	0.636
Sombrero Chino	4.535	318.104	126381.397	23.959	1.343	0.583

Como se observa los invernaderos que tienen la base tipo túnel presentan un menor desplazamiento y movimiento en los nodos de las estructuras. Respecto a la fuerza de reacción la que más soporta es el diente de sierra. Esta información también sirve para determinar que invernaderos pueden construirse en batería o grupo por tener una excelente ventilación, tales como: Túnel con Cenital, Mariposa, Diente de Sierra, Multi-Túnel y Sombrero Chino. Los invernaderos tipo Túnel ofrecen ventajas que permiten modificaciones como ventanas cenitales o techos tipo sombrero chino o mariposa para mejor ventilación e intercambio de calor

2.1. Implementación de las técnicas de control

Las combinaciones de los sistemas de control para hacer un sistema inteligente que se implementan en el invernadero hidropónico son:

Modos deslizantes + Control de linealización de realimentación/prealimentación: Es un modelo espacio estado con acoplamiento no-lineal para el clima del invernadero, las ecuaciones usadas en el sistema son 1 y 2, el lazo de control correspondiente se presenta en la Figura 3:

$$u_1 = \frac{(1+\alpha)v_1 - \delta\beta_T x_2 + UA(v_2 - x_1) - \rho C_p V_{\bar{u}_1} - \delta\rho V_{\bar{u}_2}}{\delta\rho(x_2 - v_3) + \rho C_p(x_1 - v_2)}, \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{\rho C_p(x_1 - v_2) \left(-\frac{\alpha}{\delta} v_1 + \delta T_{x_2} + \rho V_{\bar{u}_2} \right) + \rho(x_2 - v_3)(v_1 + UA(v_2 - x_1) - \rho C_p V_{\bar{u}_1})}{\delta\rho(x_2 - v_3) + \rho C_p(x_1 - v_2)}, \quad (2)$$

dónde C_p es calor específico del aire, ρ densidad del aire, V es volumen de aire, α es coeficiente global para usar la sombra y las dimensiones del área, β_T es coeficiente global de las constantes termodinámicas, x_1 y x_2 son variables de estado dinámico (temperatura y humedad absoluta), u_1 y u_2 es rango de ventilación y capacidad de humedad del sistema de niebla:

$$\hat{u}_1 = k_1 \text{sgn}(x_1 - x_{d1}), \quad (3)$$

$$\hat{u}_2 = k_2 \text{sgn}(x_2 - x_{d2}). \quad (4)$$

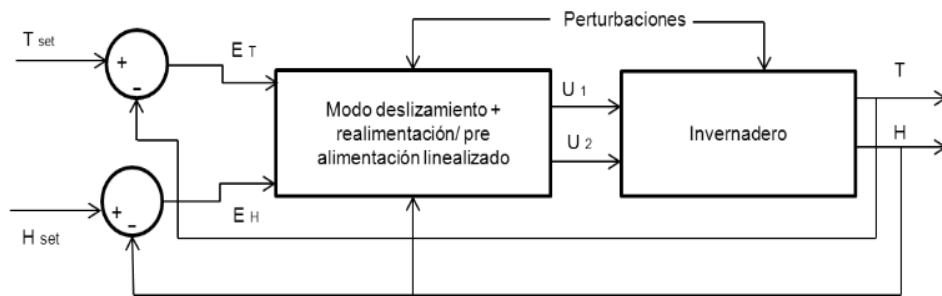


Fig. 3. Lazo de control de clima.

Control de lógica difusa + ANFIS: Este se aplica al sistema de irrigación y al de hidroponía, para su uso se implementa el control en un tanque que debe ser monitoreado y controlado. La importancia de este radica en la dificultad y complejidad del sistema para obtener los datos experimentales. El modelo matemático para la alimentación de nutrientes es derivado por un balance de masas en los tanques de alimentación y colectores, además de un balance de materia para la concentración de los nutrientes en el tanque colector (ecuaciones de la 5 a la 8). La propuesta de control para alimentación de nutrientes se basa en la lógica difusa, cuyo modelo se muestra en la Figura 4, utilizando también ANFIS. El controlador consiste en tres entradas: altura del tanque de alimentación (h_1), altura del tanque colector (h_2), el error de conductividad eléctrica de los sensores (EC_{error}) y una salida que es el tiempo (t) de activación del solenoide; las ecuaciones para el modelo son:

Ecuación de la válvula:

$$f(t) = C_v \sqrt{\frac{ph_1(t)}{144}}. \quad (5)$$

Tanque de alimentación, balance de masa:

$$\frac{d}{dt} h_1(t) = -\frac{f(t)}{A_1}. \quad (6)$$

Tanque colector, balance de masa:

$$\frac{d}{dt}h_2(t) = -\frac{f(t)}{A_2}. \quad (7)$$

Concentración (ppm) o conductividad eléctrica (mS/cm):

$$EC = 0.0014C + 0.0318. \quad (8)$$

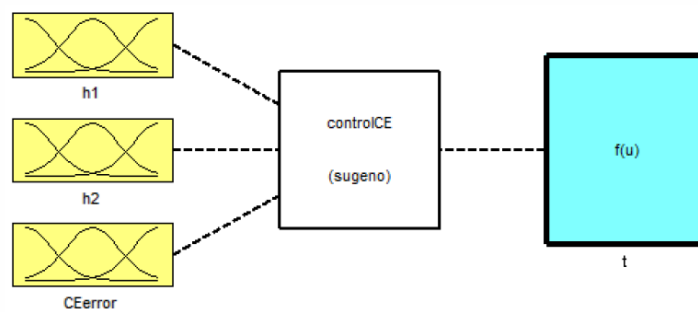


Fig. 4. Modelo logica difusa para alimentación de nutrientes.

Se tiene una configuración de un sistema ANFIS, como se muestra en la Figura 5. Esta presenta cada entrada y consiste en 3 funciones de membresía (Figura 6) y 27 reglas diferentes que se basan en la altura de los tanques y el error en la conductividad eléctrica.

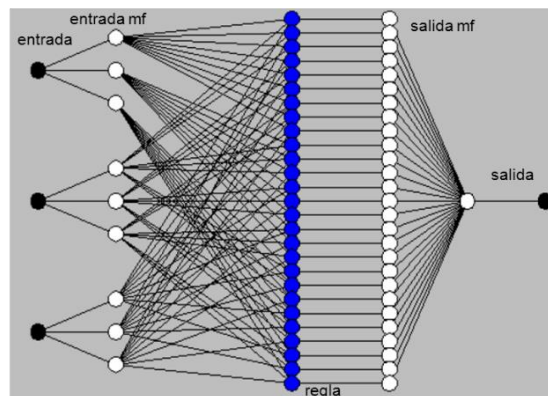


Fig. 5. Configuración de un sistema ANFIS.

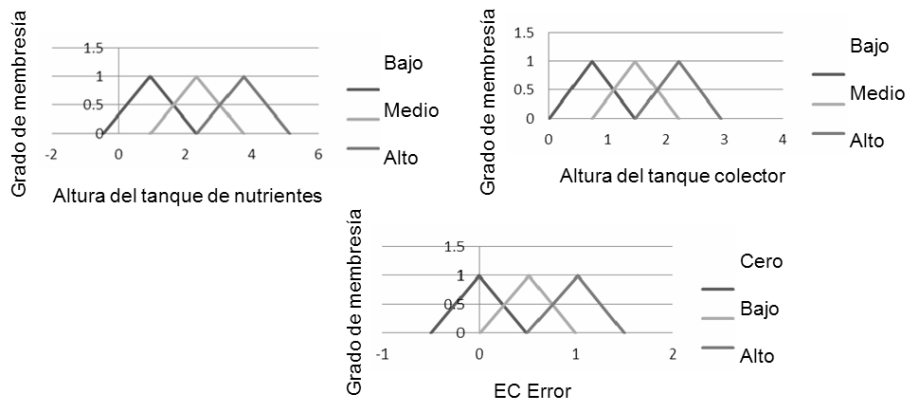


Fig. 6. Funciones de membresía.

La salida t consiste de 27 funciones lineales de primer orden polinomial de la forma:

$$t = (a * h_1) + (b * h_2) + (c * EC_{error}) + d, \quad (9)$$

donde a, b, c y d son constantes.

Finalmente el lazo de control de alimentación de los nutrientes es el siguiente (Figura 7):

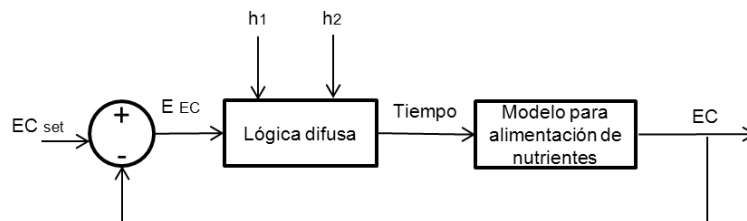


Fig. 7. Lazo de control para alimentación de nutrientes.

Los controladores administran diferentes actuadores para lograr un buen funcionamiento en términos del microclima deseado para el cultivo del jitomate, estos se activan o no dependiendo de la adquisición de señales que indique si las variables se encuentran o no dentro del rango preestablecido. La simulación del microclima se hizo con LabVIEW™ 2012 y dos herramientas auxiliares: el ICTL (por sus siglas en inglés Intelligent Control Toolkit LabVIEW™) y un simulador del diseño de control como MATLAB®, para obtener gráficas con condiciones distintas de temperatura y humedad relativa que permiten determinar el tipo de control que estabiliza más rápido el sistema a situaciones con cambios repentinos en el clima. En la Figura 8 se muestra el control

convencional de humedad relativa y control de temperatura que se activan o no dependiendo de las variables medidas, si están o no fuera del rango preestablecido.

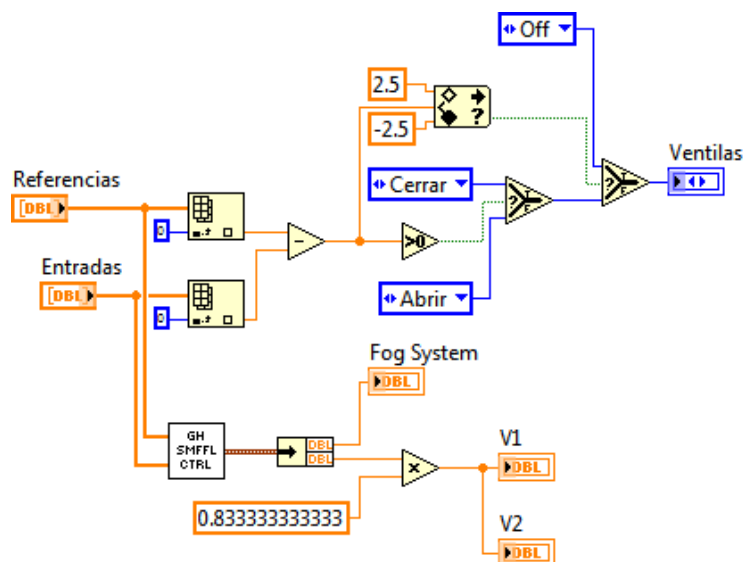


Fig. 8. Control no lineal de temperatura y de humedad relativa en el programa LabVIEW™.

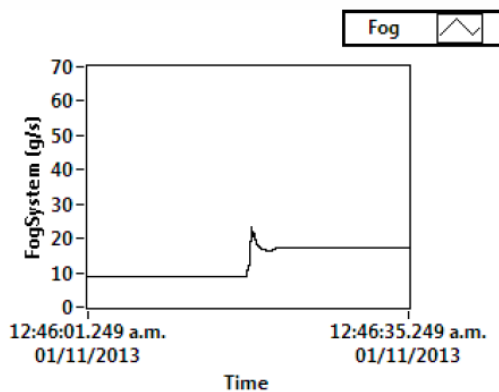


Fig. 9. Respuesta del sistema de nebulización (Fogsystem) ante perturbaciones aplicando un control de Modo deslizamiento + Control de Linealización de realimentación /prealimentación.

Se eligieron como base de simulación los valores deseados para el cultivo del tomate. Las condiciones dentro del invernadero fueron de 30 °C y 20 % de humedad relativa

respectivamente. La intensidad de luz fue de 300 w/m², la temperatura fuera del invernadero es de 27 °C y 15 % de humedad relativa. Algunos cambios y manipulaciones de variables que se hicieron en los puntos deseados para realizar pruebas fueron de 30 °C a 23 °C en la temperatura y del 20 % al 60 % en la humedad relativa. Se realizaron pruebas aplicando los controles referidos anteriormente obteniéndose que el mejor es el Modo deslizamiento + Control de Linealización de realimentación /prealimentación; porque tiene una respuesta suave para alcanzar el punto de ajuste. Éste puede ser un poco más bajo que el PID, pero el segundo es menos estable y se ve como oscilaciones en la parte del sistema de nebulización como se muestra en las Figuras 9 y 10.

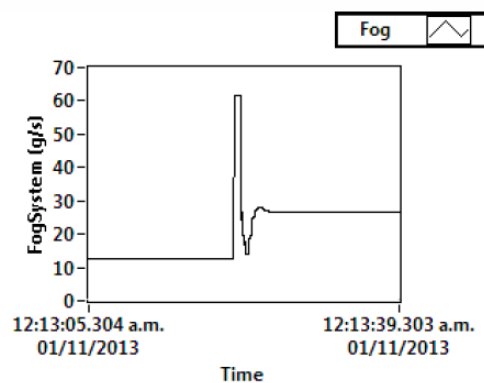


Fig. 10. Respuesta del sistema de nebulización ante perturbaciones aplicando un control PID.

2.2. Interfaz gráfica de usuario

El principal objetivo de la interfaz gráfica de usuario (IGU) es dar la posibilidad de programar las necesidades del cultivo en términos del microclima, de las etapas de crecimiento y de los nutrientes que se requieran, lo que implica que la IGU automáticamente resolverá las demandas del cultivo programadas por el usuario (Figura 11).

2.3. Implementación de invernadero hidropónico inteligente

El invernadero que se tiene en el ITESM CCM (Figura 12), tiene una orientación Norte-Sur en un clima templado subhúmedo con vientos que circulan a una velocidad aproximada de 30 km/h en otoño. La zona en que se instaló está rodeada de árboles que sirven como protección contra el viento; cuenta con servicios para un buen funcionamiento como: agua, electricidad e internet para la transmisión de datos en tiempo real principalmente.

INVERNADERO INTELIGENTE
TECNOLÓGICO DE MONTERREY
CAMPUS CIUDAD DE MÉXICO

1

Nombre Cultivo

Nº Etapas

Etapa Actual

Duración Etapa

Días	Horas	Minutos
0	0	0

Inicio Etapa

00:00 p.m.
DD/MM/YYYY

Final Etapa

00:00 p.m.
DD/MM/YYYY

Referencias

T (°C)	0
HR (%)	0
IL (kLux)	0
CE (mS/cm)	0
pH (1-14)	0
TR (min)	0

Horas Riego

00:00 p.m.
00:00 p.m.
00:00 p.m.
00:00 p.m.
00:00 p.m.
00:00 p.m.

Continuar

Editar

Guardar



Fig. 11. Panel de control y caseta de control.



Fig. 12. Invernadero inteligente.

La estructura tipo semi-túnel, cuenta con una ventana cenital y dos laterales para prevenir acumulación de agua y mejorar la circulación del viento, además de una regulación de la temperatura. Tiene un área de cultivo de 100 m². La estructura permite resistir vientos con velocidades de 75 km/hrs y soportar cargas de 25 kg/m²; tiene soportes para el tutoreo de las plantas. El diseño de la estructura es de tipo modular y utiliza columnas, conectores, largueros y arcos galvanizados con perfil tubular de 1.5 pulgadas. Esto se seleccionó por los resultados del análisis de esfuerzos en INVENTOR[®], obteniéndose que la tensión más alta de los invernaderos es del 1 % (2.156 Mpa) de la tensión máxima admisible, haciendo que el acero galvanizado sea un excelente material para la estructura. La cubierta del invernadero es de plástico tratado con estabilizador de rayos UV II calibre 720.

Se implementaron equipos que permiten la extracción del aire. En la Figura 13 se presenta la simulación de viento en el programa CFD de Inventor[®] dentro y fuera del invernadero. Esta se realizó en un túnel de viento con el propósito de determinar qué tan eficaz es la construcción teniendo las siguientes características: estructura del material acero galvanizado, material de la cubierta es polietileno de baja densidad, velocidad del viento de 30 km/hrs, viento tipo Barlovento, dimensiones del túnel 7 m de alto, 14 m de profundidad y 20 m de ancho y una temperatura de 19.85 °C.

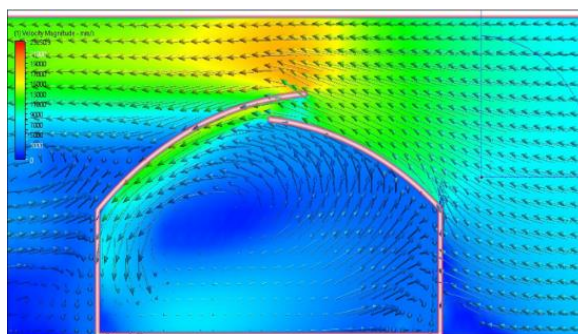


Fig. 13. Simulación del comportamiento del viento en CFD de INVENTOR[®].

Debe considerarse que, para mejorar los resultados de la construcción, es necesario hacer simulaciones con los cambios de velocidad del viento, dirección del invernadero, tipo de cultivo y diferentes tipos de materiales. En el interior del invernadero se cuenta con un sistema de sombreado, que consiste en una malla que protege el cultivo contra radiación solar, permitiendo la regulación de la intensidad de luz. Se instaló para la protección del cultivo en una extensión de 100 m², y tiene actuadores independientes tanto en la parte superior como en la inferior, del lado izquierdo y derecho para su mejor manipulación. Se instaló un sistema de humidificación que utiliza un sistema de nebulización para ajustar la humedad relativa y para controlar la regulación de temperatura y un sistema de riego que se basa en una técnica hidropónica llamada NFT

(Técnica de la Película Nutriente) que consiste en recircular una solución de nutrientes a través de un sistema de tuberías alimentando el cultivo, junto con éste se coloca un sistema de suministro de nutrientes, que consiste en tres tanques que almacenan soluciones nutritivas para cada etapa de crecimiento del cultivo. Para controlar el flujo de nutrientes y del agua del sistema de humidificación, se utilizan electroválvulas de 3 vías 2 posiciones de 120 V 50/60 Hz y una bomba que se controla por encendido/apagado. El sistema de control del invernadero inteligente hace la adquisición de datos por medio de sensores para detección de temperatura, humedad relativa, intensidad de luz, conductividad eléctrica, pH de la solución nutritiva y el nivel de la solución en los tanques colectores y de almacenamiento a través de una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument ®. La localización de los sensores dentro del invernadero se muestra en la Figura 14. Para el uso y aplicación de todos los dispositivos y sensores antes referidos, se hizo un sistema de control, que tiene las siguientes características:

Computadora: Toma las decisiones pre-programadas. Esta es IBM Thinkpad con Windows 7 Professional Edition, procesador Pentium IV a 2.8 GHz y 2 GB de RAM. Tiene instalado LabVIEW™, software portador de la interfaz de usuario y controladores del Invernadero.

Interfaz de Hardware: NI CompactDAQ-9174 y NI USB-6009 son usados para adquirir y generar señales. Tiene conectado un módulo de entradas analógicas NI-9221 y tres de relés NI-9481.

Estrategias de Control: Se tienen tres tipos de controladores implementados y programados actualmente: a) Manual – El usuario decide la acción a llevarse a cabo, b) encendido/ apagado Convencional – Control automático basado en comparadores, c) No convencional – Control automático basado en estrategias de control no-lineal e inteligentes, Linealización por Realimentación, Modos Deslizantes y Lógica Difusa.

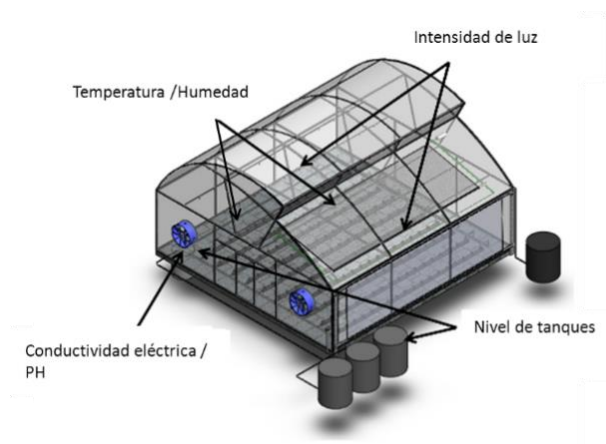


Fig. 14. Localización de los sensores.

3. Conclusiones

Después de la construcción del invernadero, las plantas fueron sembradas el 2 de noviembre del 2013 concluyendo en el mes de mayo del presente año la última recolección del fruto, comprobándose la funcionalidad del sistema de control (Figura 15). En esta fase solo se requirió mantenimiento y limpieza de los aspersores y las válvulas por las que circulan nutrientes. Las actividades que se realizaron por parte del personal encargado solo fueron realizar el tutoreo y la poda de las plantas, ya que se acondiciono un sistema de monitoreo por internet para visualizar algún desperfecto que requiriera atención inmediata.



a) Noviembre del 2013



b) Mayo del 2014

Fig. 15. Evolución del cultivo de jitomate del invernadero inteligente del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Monterrey Campus Ciudad de México.

Referencias

1. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura.: Oportunidad De Negocios en Agricultura Protegida. Boletín Informativo Fira, pp. 11–98 (2010)
2. Moreno, A., Aguilar, J., Luévano, A.: Características de la Agricultura Protegida y su Entorno en México. Revista Mexicana De Agronegocios, Vol. 15, pp. 763–774 (2011)
3. Jensen, M. H., Collins, W. L.: Hydroponic Vegetable Production. Horticultural Reviews, Vol. 7, pp. 483–558 (1976)
4. Sagarpa: Programa De Ejecución Directa 2009 Agricultura Protegida. Disponible en: [Www.Amhpac.Org](http://www.amhpac.org) (2009)
5. Lafont, F., Balmat, J.: Optimized Fuzzy Control of a Greenhouse. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 128, pp. 47–59 (2002)
6. Bennis, N., Duplaix, J., Enéa, G., Haloua, M., Youlal, H.: Greenhouse Climate Modelling and Robust Control. Computers and Electronics in Agriculture, pp. 97–107 (2008)
7. Hu, H., Xu, L., Wei, R., Zhu, B.: Multi-Objective Control Optimization for Greenhouse Environment Using Evolutionary Algorithms. Sensors, pp. 5792–5807 (2011)
8. Isidori, A.: Nonlinear Control Systems. New York: Springer (1995)
9. Sastry, S.: Nonlinear System: Analysis, Stability, and Control. New York: Springer (1999)
10. Khalil, H. K.: Nonlinear Systems. México: Prentice Hall (2002)
11. Comisión Nacional Del Agua: Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: [Http://Smn.Cna.Gob.Mx](http://smn.cna.gob.mx) (2014)

Análisis de pérdidas en semiconductores de potencia generadas por controladores difusos de velocidad en motores de CD sin escobillas

Manuel García-López¹, Antonio Rosales², Pedro Ponce-Cruz², Arturo Molina²,
Jose J. Rodriguez Rivas¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México,
México

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Ciudad de México,
México

{magarcial, jjrodriguezr}@ipn.mx, {antonio.rosales, pedro.ponce, armolina}@itesm.mx

Resumen. La vida útil de los semiconductores de potencia está en un entorno ocasionado por las pérdidas de potencia por conmutación y conducción debido a la variedad de perfiles de temperatura a los que se ven sometidos los semiconductores durante su operación. Satisfacer el desempeño de la aplicación normalmente depende de la estrategia de control. Sin embargo, cumplir el objetivo por el sistemas de control sin considerar las pérdidas que se presentan en la etapa de potencia afectara la eficiencia de la etapa de potencia y disminuirá el tiempo de vida de los semiconductores. Este trabajo analiza las pérdidas que se generan en los MOSFET's de un puente inversor fuente de tensión trifásico, que alimenta al motor de CD sin escobillas, al controlar su velocidad empleando un controlador difuso. Para observar si hay mejora se compara la respuesta del controlador difuso con la de un controlador PID. La implementación de los dos controladores se lleva acabo con la co-simulación (LabVIEW-Multisim). Los resultados de la co-simulación demuestran que el control difuso, comparado con un PID, presenta un mejor desempeño en términos del índice del error cuadrático en el control de la velocidad, además de presentar menos pérdidas de potencia, lo cual garantiza una extensión del tiempo de vida de los semiconductores de potencia.

Palabras clave: control difuso, motor de cd sin escobillas, co-simulación, pérdidas de potencia.

Loss Analysis in Power Semiconductors Generated by Fuzzy Speed Controller in Brushless DC Motors

Abstract. Lifetime of power semiconductors is in an environment affected by power losses due to switching and conduction modes, as a result the semiconductor

undergoes variations of temperature profiles during its operation. Satisfying the performance required by semiconductor's application depends of the control strategy. However, the accomplishment of control goals without consideration of power losses in the power stage, affect the efficiency as well as decrease the lifetime of the semiconductors. In this paper, the losses in the MOSFETs of a three-phase voltage source inverter bridge, feeding a brushless DC motor, is analyzed. This three-phase voltage source inverter bridge is used to apply a control of velocity, based on fuzzy logic, in the brushless DC motor. In order to verify the advantages of the proposed fuzzy controller an improvement, the response of the fuzzy controller is compared with that one of a PID controller. The implementation of the two controllers is performed by mean of LabView-Multisim co-simulation. Co-simulation results show that the fuzzy controller has better performance than the PID controller, considering mean squared error (MSE) of the tracking error. In addition, fuzzy controller presents less power losses guarantying an extension of the lifetime of the semiconductor.

Keyword: fuzzy control, brushless dc motor, co-simulation, losses power.

1. Introducción

Alta eficiencia, tiempo de vida largo, ruido bajo y una buena relación torque-velocidad son las bondades que han acelerado el uso de motores CD sin escobillas en la industria automotriz, aeroespacial y de aparatos de uso doméstico [1]. Particularmente, el control de la velocidad del motor es un aspecto importante en la mayoría de aplicaciones [2]. La velocidad puede regularse en lazo abierto o en lazo cerrado siendo el control en lazo cerrado el más eficiente pues considera el monitoreo en línea de la velocidad.

Los controladores en lazo cerrado más implementados son PID (Proportional-Integral-Derivative) [3] y su uso en motores CD sin escobillas no es la excepción. Sin embargo, la robustez de los controladores PID ante perturbaciones e incertidumbre en los parámetros de la planta no es buena comparada con la robustez que ofrecen técnicas avanzadas como control difuso.

Las características principales del control difuso son las siguientes [4]: es la alternativa del control convencional cuanto la planta presenta no-linealidades que son difíciles de modelar matemáticamente; A diferencia de los controles PID tradicionales, que se basan en referencias fijas, el funcionamiento de los controladores difusos se basa en tareas que pueden involucrar más de una variable del sistema; pueden trabajar como controles adaptables, incluso controladores PID son mejorados con controles difusos para formar PID adaptables; y su característica más importante es que son controladores capaces de sintetizar información de operadores y reflejar esa experiencia (humana) en el desempeño del controlador.

Asegurar que el motor va a mantener la velocidad en el valor deseado, usando control clásico o avanzado, es lo ideal en un contexto de control automático. Sin embargo, el control

de velocidad de motores CD requiere de una etapa de potencia (puente H), la cual se compone de semiconductores que necesitan ser conmutados de manera adecuada porque la conmutación a altas frecuencias los daña. Por lo tanto, la estimación y el análisis de pérdidas en los semiconductores es un aspecto importante a considerar en la práctica [5], no solo por el calentamiento del semiconductor sino también por la eficiencia en términos de potencia.

Para hacer un análisis detallado de cada elemento que compone el lazo de control de velocidad de un motor de DC se debe considerar la diferente dinámica de los elementos, por ejemplo, la dinámica de la electrónica de potencia (amplificador) es más rápida comparada con la dinámica del motor o el controlador. Hacer una simulación de este tipo de sistemas puede resultar un reto pues el software podría aproximar muy bien la dinámica rápida pero la lenta no o viceversa, o simplemente el software es el ideal para simular sistemas de control pero no circuitos eléctricos.

Co-simulación se entiende como la interacción o combinación de 2 plataformas de simulación diferentes con el objetivo de formar un solo sistema donde exista intercambio de datos entre ambos simuladores [7]. Llevar a cabo la co-simulación del sistema en estudio es la alternativa para analizar por un lado el controlador y por otro la parte eléctrica (motor con amplificador de potencia). Particularmente la co-simulación entre Labview y Multisim es una opción interesante debido a que: Multisim ofrece un estudio detallado de la parte eléctrica debido a que los modelos con que trabaja se acercan mucha a la realidad y permiten un análisis en línea de las pérdidas de potencia; y Labview es idóneo para el diseño de controladores y el monitoreo de variables.

En este trabajo se analizan las pérdidas por conducción y conmutación que se generan al controlar la velocidad de un motor de CD sin escobillas. Se estudian dos controladores, uno difuso y un controlador PID, y se compara su desempeño con respecto al error de regulación y la cantidad de pérdidas que genera en la etapa de potencia. Los controladores se implementan en un entorno de co-simulación Labview-Multisim, el cual permite la estimación en línea de las pérdidas por conmutación y conducción. El desempeño de los controladores se mide utilizando el error cuadrático integral. Los resultados de co-simulación demuestran que el controlador difuso presenta un mejor desempeño con menores pérdidas, comparado con el controlador PID.

2. Accionamiento del MCDSE

El accionamiento del MCDSE (Motor de CD Sin Escobillas) propuesto para simular la estimación de las pérdidas por conmutación y conducción de componentes semiconductores es mostrado en la figura 1, este es integrado por una fuente de tensión de corriente directa (V), un inversor fuente de tensión trifásico (MOSFET'S: 1, 2, 3, 4, 5 Y 6), un MCDSE, sensores de efecto Hall (HC) y controlador. Para que el rotor gire; la corriente tiene que pasar por las bobinas de estator generando un campo magnético que es perpendicular a la dirección del campo magnético de los imanes permanentes esto es una condición para

obtener el par máximo; una vez iniciado el movimiento de giro la posición del rotor varia en ese instante, por lo tanto, en cada momento hay que conocer la posición en que se encuentra el rotor para poder excitar las bobinas que corresponda y conseguir el par en el instante determinado.[8]

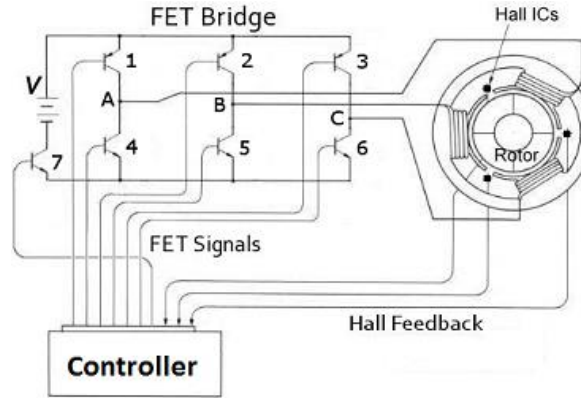


Fig. 1. Esquema general del accionamiento MCDSE.

2.1. Modelo del MCDSE

El modelo del MCDSE en espacio de estado es descrito por la ecuación 1.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

donde:

$$x = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs} \quad \omega_m \quad \theta_r]^T, \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_p}{J} f_{as}(\theta_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_1} & 0 & -\frac{\lambda_p}{J} f_{bs}(\theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_1} & -\frac{\lambda_p}{J} f_{cs}(\theta_r) & 0 \\ \frac{\lambda_p}{J} f_{as}(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_{bs}(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_{cs}(\theta_r) & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; L_1 = L - M, \quad (4)$$

$$u = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad T_1]^T. \quad (5)$$

2.2. Controladores

Un lazo cerrado se implementa para aumentar la robustez paramétrica a los disturbios. Además, modifican la dinámica de la planta para que se alcancen los criterios de diseño [12] figura 2. Los controladores estudiados son el PID y el difuso

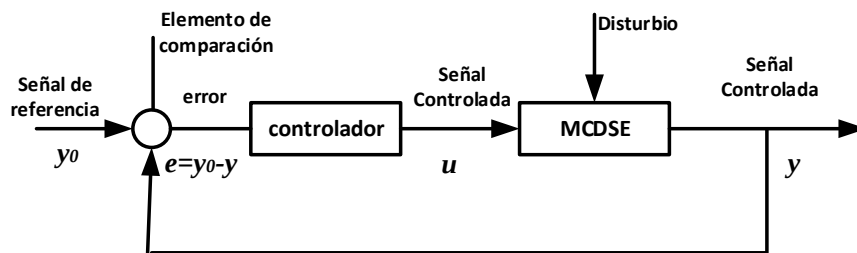


Fig. 2. Esquema del accionamiento del Motor de Corriente Directa Sin Escobillas.

La ecuación (6), es una operación lineal realizada por un **Controlador PID** convencional; la cual consiste en aplicar propiamente la suma de tres acciones de control: una acción proporcional (e_p), una acción integral (e_i) y una acción derivativa (e_d) [9]:

$$u = K_p e_p + K_i e_i + K_d e_d, \quad (6)$$

donde: K_p - ganancia proporcional, K_i - ganancia integral, K_d – ganancia derivativa, $e_p = e(t)$, $e_i = \int_0^t e(\tau)$ y $e_d = \frac{de(t)}{dt}$.

Un **Controlador Difuso** consiste en la realización de la estrategia de control en forma cualitativa utilizando lógica difusa para crear un controlador difuso que emula una estrategia heurística de reglas basadas en experiencia o prácticas. La operación no-lineal realizada por un controlador difuso (en donde la fusificación es basada en conjuntos difusos, la operación lógica AND es realizada con el operador Min, el método del centro de gravedad es aplicado para la defusificación) puede ser expresada por la ecuación (7) [9]:

$$u = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 v_i w_j q_k (a_{0ijk} + a_{2ijk}e_I + a_{3ijk}e_D + a_{4ijk}e_P e_I + a_{1ijk}e_P + a_{5ijk}e_P e_D + a_{6ijk}e_I e_D + a_{7ijk}e_P e_I e_D). \quad (7)$$

Las variables lógicas v_i, w_j, q_k llevan la información de la señal actual de las membresías a un sector del espacio de entrada, por ejemplo, v_i es dada por las relaciones de las ecuaciones (8), (9), (10) y (11)

$$v_1 = \begin{cases} 1 & \text{para } e_P \leq e_{P1}, \\ 0 & \text{otro,} \end{cases} \quad (8)$$

$$v_2 = \begin{cases} 1 & \text{para } e_{P1} < e_P \leq e_{P2}, \\ 0 & \text{otro,} \end{cases} \quad (9)$$

$$v_3 = \begin{cases} 1 & \text{para } e_{P2} < e_P \leq e_{P3}, \\ 0 & \text{otro,} \end{cases} \quad (10)$$

$$v_4 = \begin{cases} 1 & \text{para } e_{P3} \leq e_P, \\ 0 & \text{otro.} \end{cases} \quad (11)$$

Las variables w_j, q_k pueden ser realizadas de forma similar.

2.3. Co-simulación

Los programa de simulación de NI Multisim, desarrollado para modelar y analizar circuitos eléctrico, y LabVIEW, desarrollado para simular y diseñar sistemas de control, son utilizados para realizar la simulación (co-simular) entre el sistema de control y los circuitos electrónicos de potencia. La figura 3, muestra un esquema en detalle de la co-simulación de todo el sistema de prueba. El bloque “Brushless DC Motor VSI Thermal” es un programa en Multisim 2014.0.1 en donde se simulan el inversor fuente de tensión, motor de CD sin escobillas y los sensores de efecto HALL (embebidos en el bloque del motor de CD). El bloque “Brushless DC Motor VSI Thermal” está en un entorno “vi” (virtual instrument) de LabVIEW, en el cual se simulan los controles de velocidad PID y Difuso (a partir del error en el caso del PID y error y cambio del error en el caso del Difuso), así, como la generación de los pulsos de disparo que controlan las compuertas de los MOSFET del puente inversor fuente de tensión [10].

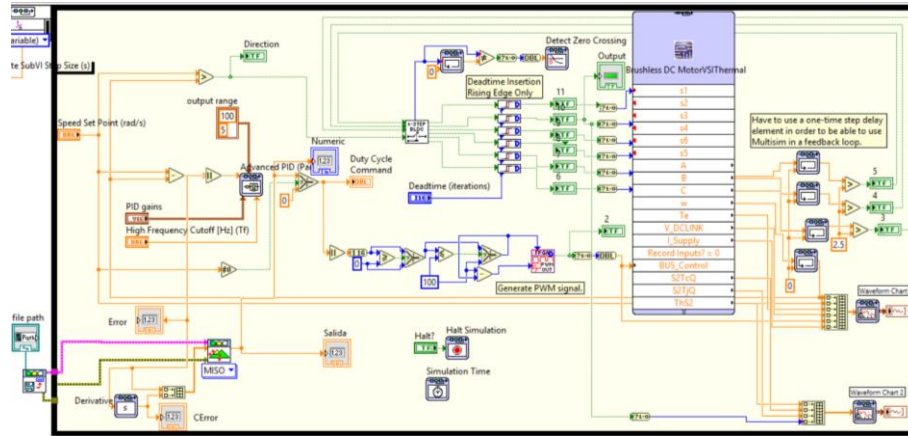


Fig. 3. Detalle del programa de co-simulación entre LabVIEW y MULTISIM [10].

3. Procedimiento de la implementación

El propósito de este trabajo es investigar el impacto de un algoritmo de control difuso y compararlo con un algoritmo PID en términos de las pérdidas por conducción y conmutación en los MOSFET's de inversor fuente de tensión; por lo que se implementó el esquema general del accionamiento MCDSE de la figura 1. Este esquema se realiza a partir de la co-simulación entre LabVIEW y MULTISIM.

En LabVIEW se implementan los algoritmos del y PID y control difuso. Los parámetros del PID son $K_C = 500$ los K_I , y K_D son igual 0. Para el control difuso en el proceso de **fusificación** se tiene las funciones de membresía de la figura 4.

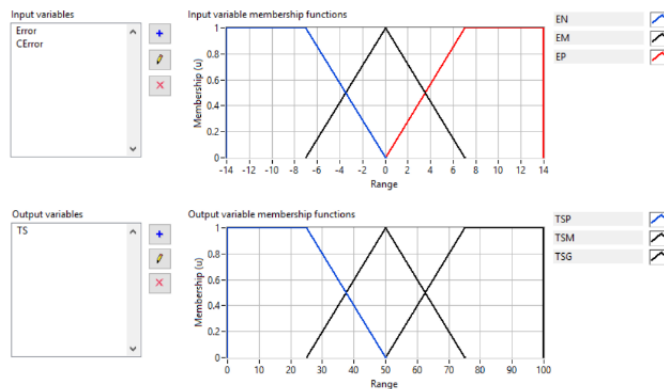


Fig. 4. Realización de la fusificación, funciones de membresía de entrada y salida.

En la figura 4: $Error = VelocidadDeReferencia - VelocidaActual$, $CError = ErrorAnterior - ErrorActual$, $EN = ErrorNegativo$, $EM = ErrorMedio$, $EP = ErrorPositivo$.

Las reglas de inferencia y la estimación de la variable de salida se muestra en la figura 5, por lo que, la salida es obtenida por el método del centro de áreas. En este proceso de **defusificación** se tienen las funciones de membresía de la figura 4, en donde: TS = TensionDeSalida, TSP = TensionDeSalidaPequeña, TSM = TensionDeSalidaMedia y TSG = TensionDeSalidaGrande

Fig. 5. Realización de la inferencia y defusificación, método por centro de áreas.

Tabla 1. Parámetros del Motor Corriente Directa de Sin Escobillas.

	Magnitud	Unidad
Inductancia del Estator	0.15	mH
Resistencia del Estator	0.6	Ω
Constante de velocidad	0.03	Vs/rad
Constante del par	0.03	Nm/A
Numero de par de polos	1	

En NI Multisim 2014.01 se implementan los circuitos electrónicos de potencia: fuente corriente directa, “V”, inversos fuente de tensión, “FET bridge” y el motor de CD sin escobillas, MCDSE. La tabla 1, muestra los parámetros del MCDSE; este es adquirido y realizado de acuerdo a los parámetros del componente BRUSHLESS_DC_MACHINE [13]. La tabla 2, muestra los parámetros nominales del MOSFET EPC2015 en estudio [14].

La obtención de las pérdidas por conducción y conmutación, del MOSFET EPC2015, es realizada adquiriendo el componente MOSFET_DIODE_THERMA de NI Multisim 2014.0.1; el cual es basado en el modelo de una red electro-térmica la cual es obtenida a partir de la estructura simplificada de los semiconductores MOSFET-Diodo, montados en un casco que a su vez es montado sobre un disipador como lo muestra la figura 6. Las

potencias por calor en las uniones, que es donde es más grande, son igual al producto $I \times V$ en el MOSFET y Diodo, el calor fluye a través de la impedancia térmica de la estructura y se disipa en el entorno ambiente. En el modelo se simplifica el proceso del fuljo del calor en una dimensión, por lo tanto, el recorrido térmico se basa en utilizar agrupaciones de impedancias térmicas en la interface de la superficie entre el casco y el disipador.

La potencia $I \times V$ se presenta como una corriente, por lo que se utilizan fuentes de corriente para su representación. La temperatura existente en los puntos físicos de unión de la red térmica, así, como la temperatura ambiente son representada por fuentes de tensión. Las impedancias térmicas son representadas usando elementos R-C, figura 7 [11].

Tabla 2. Valores nominales del MOSFET EPC2015.

	Magnitud	Unidad
V_{DS}	40	V
$R_{DS(ON)}$	4	mΩ
I_D	33	A
T_J , temperatura de operación	-40 a 150	°C
$RK_{\theta JC}$. Resistencia térmica. Unión a casco	2.1	°C/W
$RK_{\theta JB}$. Resistencia térmica. Unión a tarjeta	15	°C/W
$RK_{\theta JA}$. Resistencia térmica. Unión al ambiente	54	°C/W

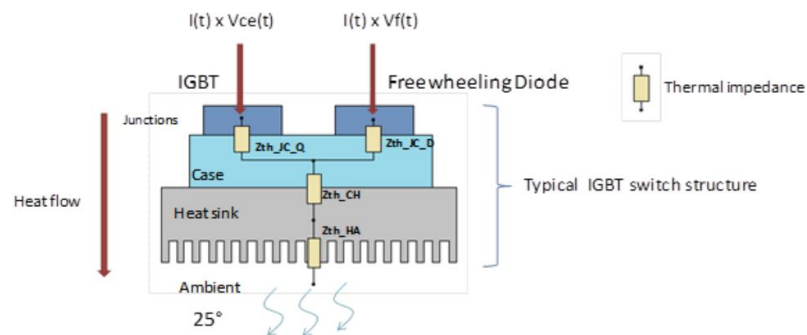


Fig. 6. Estructura simplificada del MOSFET.

El modelo para calcular pérdidas por conmutación y conducción; así, como las temperaturas de unión en el MOSFET y Diodo son a partir de las redes electro-térmica, figura 7.

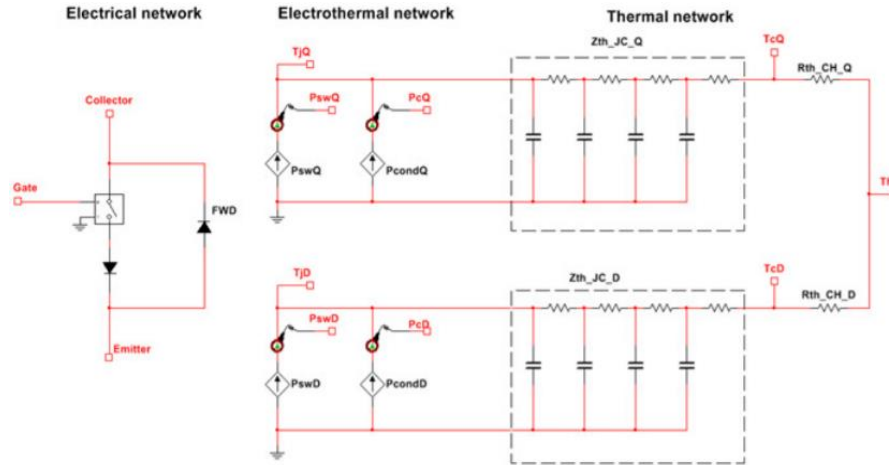


Fig. 7. Modelo térmico del MOSFET-Diodo basado en una red electro-térmica.

4. Resultados

La figura 8, muestra el comportamiento de la velocidad del MCDSE utilizando los controladores PID y Difuso, en el arranque, de 0.0 a 0.0013 segundos, los dos controladores presentan el mismo desempeño al llegar a la velocidad de referencia en el mismo tiempo; después del tiempo 0.0013 el controlador difuso presenta mayor desempeño al mejorar la tolerancia en estado permanente, figura 5.

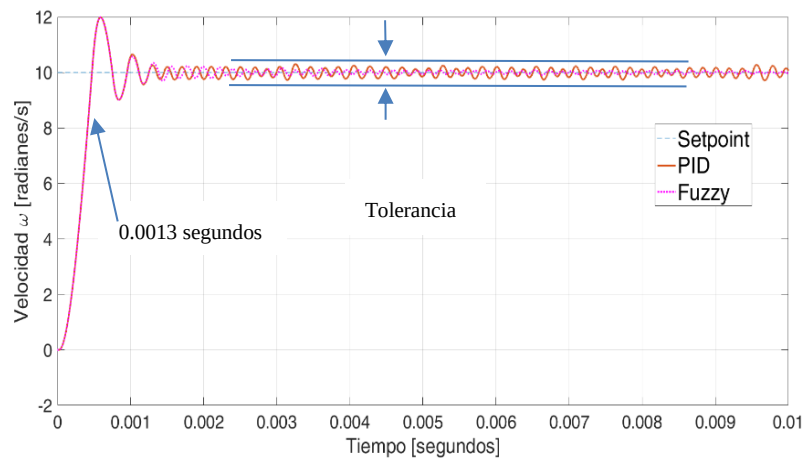


Fig. 8. Respuesta de seguimiento de velocidad.

La figura 9, muestra las pérdidas por conmutación del MOSFET usando los dos controles y son iguales hasta que el MCDSE llega a la referencia. En estado permanente, las pérdidas son mayores cuando MCDSE en estado permanente con el control PID; mientras que con el control difuso son menores.

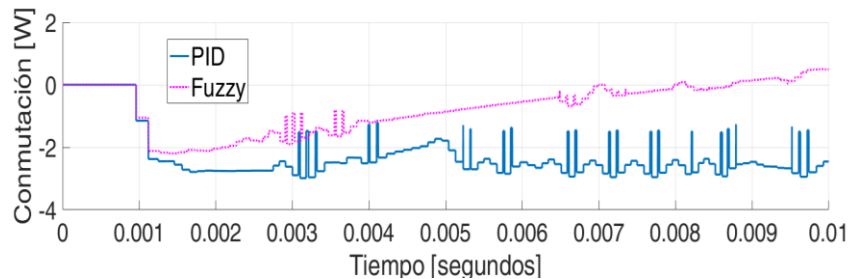


Fig. 9. Pérdidas por conmutación del IGBT.

La figura 10, muestra las pérdidas por conducción del MOSFET usando los dos controles y son iguales hasta que el MCDSE llega a la referencia. Las pérdidas son mayores cuando MCDSE en estado permanente con el control PID; mientras que con el control difuso son menores.

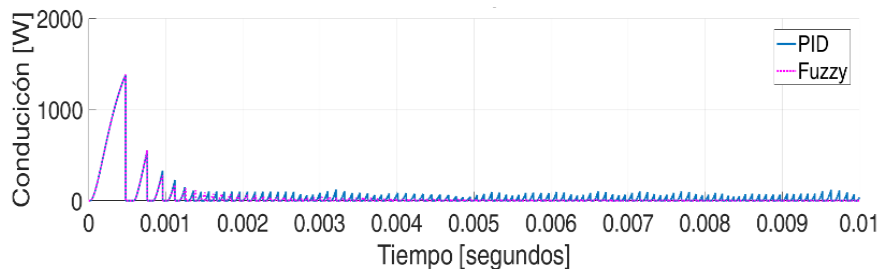


Fig. 10. Pérdidas por conducción del IGBT.

La grafica de la figura 11, demuestra el desempeño de los dos controladores basándose en el índice cuadrático del error (ISE); por lo que se infiere que el controlador difuso está más cercano a la referencia ya que tiene un ISE menor en estado permanente que el controlador PID, este hecho en conjunto con los resultados de las pedidas por conducción y conmutación permite deducir que el controlador difuso no solo abate las perdidas sino que también mejora el seguimiento de velocidad, por lo tanto puede atacar dos problemas a la vez.

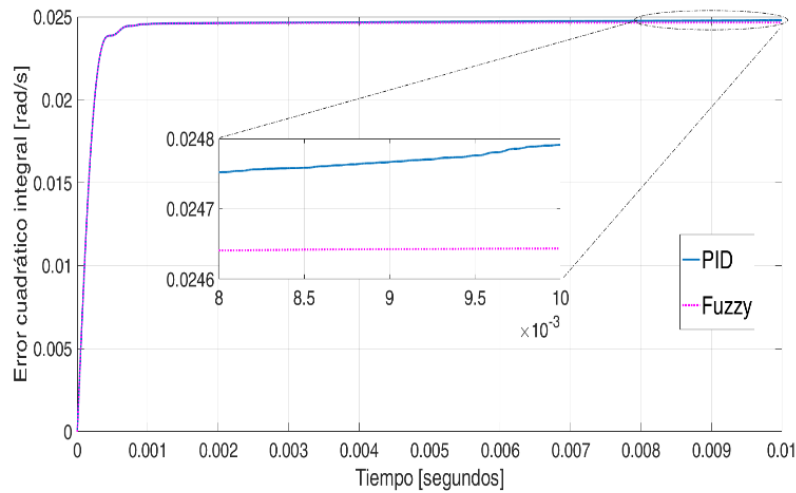


Fig. 11. Índice cuadrático del error (ISE).

5. Conclusiones

Este trabajo demuestra la influencia de los esquemas de control PID (controlador lineal) e Inteligente (controlador no-lineal difuso) en las pérdidas de conmutación y de conducción en los semiconductores (MOSFET's) de un puente inversor trifásico fuente de voltaje que alimenta a un motor de corriente directa sin escobillas. Otro hecho que se observa que el controlador difuso puede a tacer dos problemas como es de abatir las pérdida y el de estar más cercano a la referencia (reducir el error) en estado permanente. Los resultados obtenidos se validan vía co-simulación Labview-Multsim. Las pérdidas por conmutación y conducción son un factor importante que determinan el estrés por temperatura en los semiconductores de potencia y por consiguiente su vida útil por lo que esta investigación permitirá estudiar la longevidad considerando las estrategias de control.

Referencias

1. Xia, C. L.: Permanent magnet brushless dc motor drives and controls. John Wiley & Sons, Singapore (2012)
2. Premkumar, K., Manikandan, B. V.: Speed control of Brushless DC motor using bat algorithm optimized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. Applied Soft Computing, Vol. 32, pp. 403–419 (2015)

3. Åström, K. J., Hägglund, T.: Advanced PID control. ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society (2006)
4. Precup, R. E., Hellendoorn, H.: A survey on industrial applications of fuzzy control. *Computers in Industry*, Vol. 62, pp. 213–226 (2011)
5. Piris-Botalla, L., Oggier, G. G., Airabella, A. M., García, G. O.: Power losses evaluation of a bidirectional three-port DC–DC converter for hybrid electric system. *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 58, pp. 1–8 (2014)
6. Hegasy, O., Van-Mierlo, J., Lataire, P.: Analysis, Modeling, and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 445–4458 (2012)
7. Bhor, D., Angappan, K., Sivalingam, K. M.: Network and power-grid co-simulation framework for Smart Grid wide-area monitoring networks. *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 59, pp. 274–284 (2016)
8. Krishnan, R.: *Electric Motor Drives: Modeling, analysis and control*. Prentice Hall (2001)
9. Andrzej, P.: *Fuzzy Modeling and control. Studies in fuzziness and soft computing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol. 69 (2001)
10. Introducción a la Co-Simulación Digital y Analógica entre NI LabVIEW Y NI. Disponible en: Multisim: <http://www.ni.com/white-paper/13663/es>
11. Power Electronics Development Center. Disponible en: <http://forums.ni.com/t5/Power-Electronics-Development/How-to-simulate-the-temperature-energy-efficiency-and-lifetime/gpm-p/3450019>
12. Johnson, M. A., Moradi, M. H.: *PID Cntrol: New Identification and Design Methods*. Springer-Verlag London Limited (2005)
13. Brushless DC machine hall. Disponible en <https://beta.multisim.com/help/components/brushless-dc-machine-hall>
14. EPC2015C-Enhancement Mode Power Transistor. Disponible en: www.epc-co.com/Products/eGaNfETs/EPC2015C.aspx

Sintonización de controladores PID por medio de un algoritmo genético con fertilización in vitro aplicado a un convertidor multicelular

J. F. García-Mejía^{1,2}, A. A. Flores-Fuentes¹, J. C. Ambriz-Polo³, L. A. González-Escobar⁴,
C. E. Torres-Reyes¹, E. E. Granda Gutiérrez¹

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, CUAEM Atlacomulco,
Estado de México, México

² Centro Panamericano de Estudios Superiores, Zitácuaro,
Michoacán, México

³ Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlan,
Estado de México, México

⁴ Universidad Santiago de Cali⁵, Cali,
Valle del Cauca, Colombia

fgarciam@uaemex.mx, aafloresf@uaemex.mx, juan_120990@hotmail.com,
lage49@yahoo.es, edmore75@hotmail.com, eegrandag@uaemex.mx

Resumen. En este trabajo se presenta un Algoritmo Genético de Fertilización in Vitro con codificación real, un método de optimización estocástico soportado teóricamente por las Leyes de la Herencia de Mendel, la Teoría de la Selección de Darwin y los principios de reproducción asistida de Edwards. El algoritmo propuesto es usado en la sintonización de ganancias de los controladores del tipo Proporcional-Integral-Derivativo aplicados en la regulación de voltaje de los capacitores de un convertidor multicelular de 3 células. Los resultados obtenidos son analizados de manera estadística por medio de los tests de Kolmorov, Anova y el post-hoc de Tukey. La técnica propuesta reporta mejores resultados en la reducción del error cuadrático medio en relación con un Algoritmo Genético Canónico y el método de Ziegler-Nichols.

Palabras clave: algoritmo genético con fertilización in vitro, convertidor multicelular, controlador PID.

Tuning of PID Controllers by means of a Genetic Algorithm with in vitro Fertilization Applied to a Multicellular Converter

Abstract. In this paper, an In Vitro Fertilization Genetic Algorithm with real coding, a stochastic optimization method theoretically supported by Mendel's laws of inheritance, Darwin's selection theory and Edward's principles of assisted reproduction are presented. The proposed algorithm is used in gain tuning of the Proportional-Integral-Derivative type controllers applied on the voltage regulation of the capacitors of a 3 cell multicellular converter. The results obtained are statistically analyzed by Kolmorov, Anova and Tukey's post-hoc tests. The proposed technique reports better results of the mean square error reduction than the Canonical Genetic Algorithm and the Ziegler-Nichols method.

Keywords: in vitro fertilization genetic algorithm, multicellular converter, PID controller.

1. Introducción

Una de las aplicaciones de la electrónica de potencia es la implementación de circuitos electrónicos denominados convertidores multinivel a partir de dispositivos semiconductores de conmutación, diodos y capacitores. Tienen como finalidad la transformación de corriente directa (cd) en corriente alterna (ca) de tal forma que proporcione de manera estable energía a cargas resistivas, capacitivas, inductivas o mixtas. Un ejemplo de esto son los motores de corriente alterna [1]. Una alternativa, que permite el manejo de corrientes elevadas, son los convertidores multicelulares, una serie de arreglos de semiconductores de potencia y capacitores flotados que funcionan como fuentes ideales de voltaje. Una célula de conmutación tiene el esquema que se muestra en la figura 1, donde se puede observar un par de dispositivos de conmutación (Mosfet y Mosfet 1) y un capacitor [2].

En la figura 1 M_n , M'_n y C_{n-1} forman la P-ésima célula, la cual está separada por medio de dos capacitores flotados, dado que no se encuentran referenciados a tierra, y que funcionan como fuentes ideales de voltaje. Por lo tanto, un convertidor de P_n células está constituido por C_{n-1} capacitores, cuyos voltajes están determinados por medio de las ecuaciones 1 y 2:

$$V_T = V_1 + V_2, \quad (1)$$

$$V_k = \frac{k * V_T}{n}. \quad (2)$$

donde V_T es el voltaje de alimentación del convertidor, k representa la célula y n el número total de células del convertidor. Con base en lo anterior en [2] y [3] se han diseñado convertidores de 3 células como el mostrado en la figura 3, donde los voltajes presentes en los capacitores son regulados por medio de controladores del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), dado que es condición que estos estén estables (con mínimas variaciones) en todo momento.

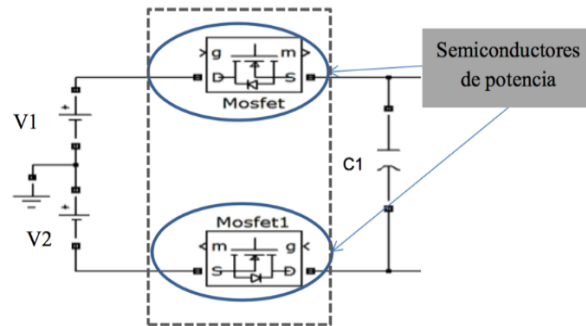


Fig. 1. Célula de conmutación de un convertidor multicelular, formada por dos transistores Mosfet y un capacitor funcionando como fuente flotada.

La topología general de un convertidor multicelular se muestra en la figura 2 donde se ve el conjunto de células de conmutación interconectadas entre sí [3].

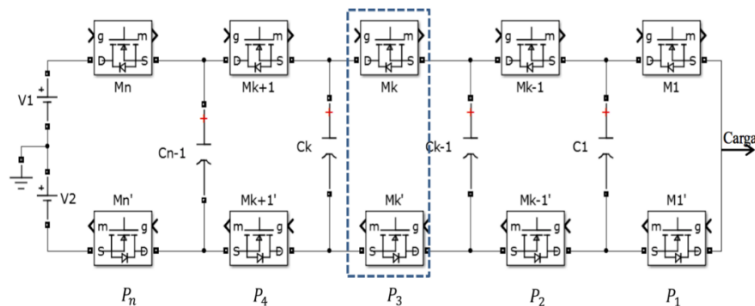


Fig. 2. Un convertidor multicelular de P_n células, donde se muestra los capacitores necesarios.

Las funciones de transferencia de los controladores PID y de los capacitores se muestran en las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (3)$$

$$C_1(s) = \frac{0.99596}{0.00002655s^2 + 0.02755s + 1}, \quad (4)$$

$$C_2(s) = \frac{0.99759}{0.000655s^2 + 0.0518s + 1}, \quad (5)$$

donde:

K_p es la ganancia proporcional,

K_i es la ganancia integral,

K_d la ganancia derivativa.

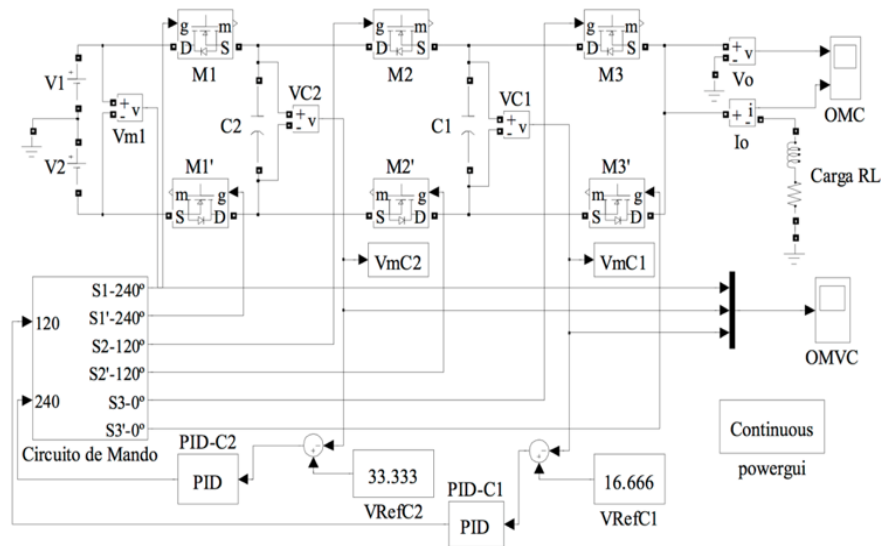


Fig. 3. Diagrama en Simulink® de un convertidor multicelular de 3 niveles con voltaje de los capacitores regulado por medio.

Cabe destacar que en [4] las ganancias de los controladores PID del convertidor multicelular propuesto son sintonizadas fuera de línea, esto por medio de un Algoritmo Genético con codificación real, considerando el problema de sintonización de ganancias como un problema de optimización numérica. Siguiendo este enfoque en este trabajo se propone el ajuste de ganancias de los controladores PID por medio de un método heurístico denominado Algoritmo Genético con Fertilización in Vitro, usando como función objetivo la maximización del inverso del error cuadrático medio dado que es fácil de interpretar analíticamente en relación a otros criterios de desempeño. La finalidad es mejorar los resultados obtenidos de la sintonización por medio de un Algoritmo Genético Canónico y el método de Ziegler Nichols.

2. Algoritmo genético con fertilización in vitro

Junto con el advenimiento de las tecnologías computacionales durante el siglo XX surgieron desarrollos de algoritmos que tuvieran la finalidad de realizar optimizaciones numéricas o combinatorias, una de las primeras investigaciones estuvo a cargo de John Holland profesor de la Universidad de Michigan, el cual propuso uno de los primeros algoritmos evolutivos: El Algoritmo Genético Simple o Canónico (GA, por sus siglas en inglés) [5]. Holland se basó en los trabajos de la Teoría de la Selección Natural de las especies de Charles Darwin, donde se estipula que los miembros de una población tenderán a propagarse en función a su capacidad de adaptación a sus entornos.

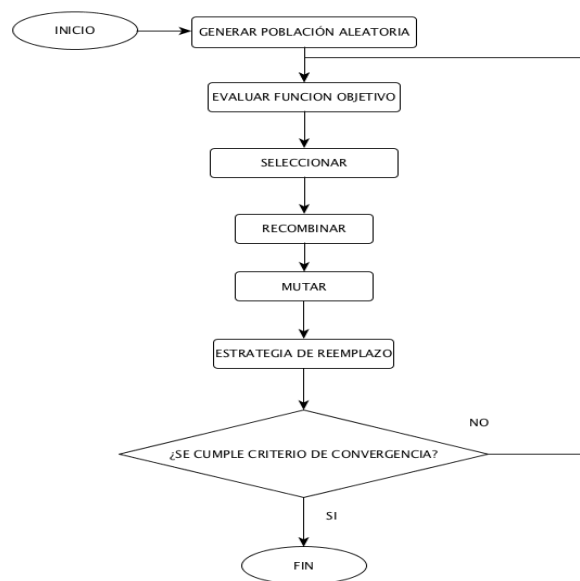


Fig. 4. Diagrama de flujo de un Algoritmo Genético Canónico.

El otro referente teórico de los algoritmos genéticos son las Leyes de la Herencia de Gregory Mendel, las cuales estipulan el carácter hereditario de las características dominantes y recesivas de los individuos que se reproducen sexualmente. Estos preceptos implican que los mejores individuos de una determinada población tienen mayores posibilidades de supervivencia y reproducción; las posibilidades disminuyen o son nulas para los débiles [5]. El GA, creado por John Holland se caracteriza por los pasos descritos en el siguiente pseudocódigo [6, 7]:

- i. definir una función de aptitud o función objetivo,
- ii. generar una serie de posibles soluciones (cromosomas) de manera aleatoria formando un conjunto denominado población,

- iii. codificar la población,
- iv. evaluar con la población la función objetivo, iniciando así la *i*-ésima generación,
- v. seleccionar soluciones que se reproducirán,
- vi. aplicar una operación de cruzamiento,
- vii. mutar algunos elementos resultantes del cruzamiento,
- viii. reemplazar elementos de la población de la *i*-ésima generación con los mejores elementos de vi y vii,
- ix. detener, si se cumple criterio de paro, y en caso contrario ir al paso a iv.

Los pasos descritos se pueden mostrar de forma gráfica en la figura 4.

2.1. Fertilización in vitro

En medicina reproductiva existe dos términos que suelen ser tratados en algunas ocasiones como sinónimos, el primero, la esterilidad definida como la incapacidad para concebir, el segundo, la infertilidad es decir la incapacidad de terminar en un producto viable un embarazo. Cabe destacar que a nivel mundial las estadísticas muestran que 20% de las parejas tienen problemas para embarazarse [9].

Los problemas de salud reproductiva suelen tratarse por medio de diversos procedimientos. Uno de los que presenta mejor índice de éxito es la Fertilización In Vitro (IVF, por sus siglas en inglés) una técnica que empezó a ser desarrollada en la década de los 60's del siglo XX por Edwards (Premio Nobel de Medicina en 2010) a partir de la fecundación en un laboratorio con condiciones controladas de óvulos de ratón para posteriormente ser implantados en una hembra de la misma especie, posteriormente en colaboración con Patric Steptoe escaló la técnicas a parejas de humanos con problemas para concebir, naciendo el primer bebe por IVF en el año 1978 [10]. Los pasos a seguir en una IVF se enlistan a continuación:

- Estimulación: por medio de ciertos medicamentos se estimula la maduración de células reproductivas femeninas (óvulos),
- Recuperación: cuando las células están maduras estas son extraídas por medio de una punción realizada por laparoscopia,
- Fecundación los óvulos son fecundados por células sexuales masculinas (espermias) en un ambiente controlado, con la finalidad de generar embriones viables,
- Implantación: al menos un embrión es implantado en el útero del espécimen femenino el cual idealmente conduciría a una prueba de embarazo exitosa.

2.2. Pseudocódigo de un algoritmo genético con fertilización in vitro

Las investigaciones realizadas por Edwards, fundamentaron el diseño de un nuevo método heurístico denominado Algoritmo Genético con Fertilización In Vitro (IVF/GA,

por sus siglas en inglés) realizado por Camilo Jr. Un investigador del Instituto de Informática de la Universidad Federal de Gois. En esta nueva técnica se explora la posibilidad de usar los cromosomas que no fueron seleccionados para recombinación por medio de analogías con el proceso de reproducción asistida descrito en la sección 2.1.

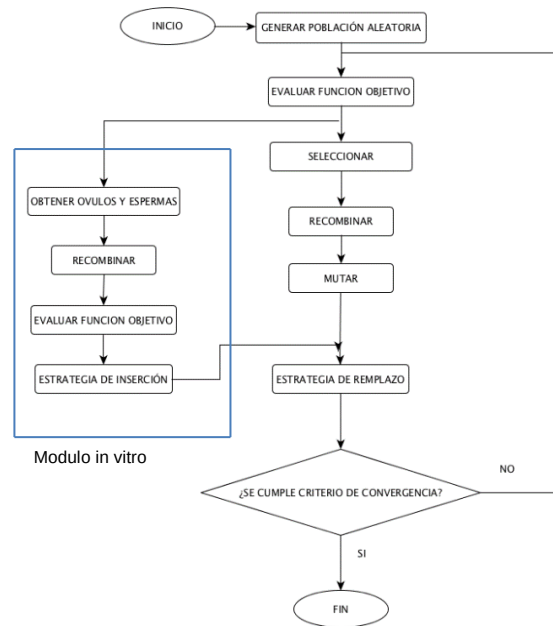


Fig. 5. Diagrama de flujo del IVF/GA propuesto en este trabajo, en azul se observa el módulo de Fertilización In Vitro.

En sus orígenes la técnica se basaba en la codificación binaria de los cromosomas que forman la población del algoritmo. La propuesta que se presenta en este trabajo consiste en cambiar las cadenas binarias por vectores $\vec{x} \in \mathbb{R}$. Esto permite solucionar problemas de optimización numérica de manera más eficiente en relación con codificaciones binarias donde los genes $g \in \mathbb{Z}$. Los pasos del algoritmo IVF/GA que se propone en este artículo basado en [8] se muestran a continuación:

- i. definir una función de aptitud o función objetivo,
- ii. generar una serie de posibles soluciones (cromosomas) de manera aleatoria formando un conjunto denominado población,
- iii. codificar la población,
- iv. evaluar con la población, la función objetivo iniciando así la i -ésima generación,
- v. seleccionar soluciones que se reproducirán,

- vi. del porcentaje de la población que no se seleccionan para recombinación se etiquetan como espermatozoides,
- vii. el mejor individuo de la generación se usa como óvulo,
- viii. recombinar espermatozoides y óvulos generando una serie de soluciones denominadas embriones,
- ix. evaluar gametos en la función objetivo,
- x. Recombinar los cromosomas resultantes de la sección v,
- xi. mutar algunos cromosomas resultantes de x,
- xii. reemplazar elementos de la población de la i-ésima generación con los mejores elementos de ix, x y xi,
- xiii. detener, si se cumple criterio de paro, y en caso contrario ir al paso a iv.

La figura 5 muestra el diagrama de flujo de un Algoritmo Genético con Fertilización In Vitro (IVF/GA por sus siglas en inglés) y resalta el modulo in vitro.

3. Metodología

Se puede estipular que existen dos sistemas de control a lazo cerrado, ambos basados en un PID cuyas ganancias son sintonizadas por medio de GA's y IVF/GA's descritos en la sección 2. La ecuación 6 muestra el cálculo de la función de transferencia para los sistemas propuestos. Por otra parte, la ecuación 7 muestra la función objetivo a maximizar por los algoritmos mencionados

$$Vc_n(s) = \frac{PID_n(s)C_n(s)}{1 + PID_n(s)C_n(s)} * Vref_n, \quad (6)$$

$$fobj_n(K_p^n, K_i^n, K_d^n) = max \left(\frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E(K_p^n, K_i^n, K_d^n)^2}} \right), \quad (7)$$

donde:

$Vc_n(s)$ representa el voltaje del n-ésimo capacitor,

$C_n(s)$ es la función de transferencia del n-ésimo capacitor,

$PID_n(s)$ la función de transferencia del n-ésimo controlador PID,

$Vref_n$ es el voltaje de referencia del n-ésimo sistema de control,

$fobj_n(K_p^n, K_i^n, K_d^n)$ es la función objetivo del n-ésimo sistema de control,

$\frac{1}{T} \int_0^T E(K_p^n, K_i^n, K_d^n)^2$ es el error cuadrático medio del n-ésimo sistema de control en términos de las ganancias del control PID,

T es el tiempo de simulación,

n es el número de sistemas de control usados el cual es $P-1$ células.

Tabla 1. Condiciones de generación de cromosomas.

Cromosoma de Vc_1	Cromosoma de Vc_2
$K_p = (30 + (\text{random}[0,1])60)$	$K_p = (2 + (\text{random}[0,1]) * 30)$
$K_i = ((\text{random}[0,1])10000)$	$K_i = (1000 + (\text{random}[0,1]) * 1000)$
$K_d = ((\text{random}[0,1]) * 0.01)$	$K_d = ((\text{random}[0,1]) * 0.9)$

Como se ha expuesto anteriormente el problema de diseño de los controladores PID de un convertidor multicelular de tres células se divide en el estudio de dos sistemas de control con sus correspondientes funciones objetivo. Esto implica la generación de dos diferentes espacios de búsqueda (colección de cromosomas) formados por vectores de números reales con el siguiente formato:

$$cromosoma = [k_p, k_i, k_d]^T.$$

La tabla 1 muestra las condiciones de generación de los cromosomas para cada uno de los sistemas de control, los cuales son identificados como Vc_1 y Vc_2 .

Los cromosomas que se seleccionaron para el cruzamiento en sucesivas generaciones fueron escogidos mediante un operador de ruleta, dado que este favorece y preserva el carácter estocástico de los algoritmos genéticos.

El operador de cruce propuesto para el GA y IVF/GA es el BLX- α , (mostrado en la ecuación 8), este es usado dado que permite una exploración fuera de los límites impuestos por los cromosomas a recombinar a través de la generación aleatoria de los descendientes con distribución una distribución de probabilidad uniforme [11]:

$$C^H = \text{rand}[(h_{\min} - I * \alpha), (h_{\max} + I * \alpha)]. \quad (8)$$

Donde C^H es el cromosoma descendiente $h_{\min} = \min(C_i^1, C_i^2)$, $h_{\max} = \max(C_i^1, C_i^2)$, $I = h_{\max} - h_{\min}$, $\alpha = \text{rand}[0,1]$ con distribución uniforme.

La mutación se realiza por medio de un operador gaussiano. A partir de un cromosoma C_i' se puede obtener un cromosoma transformado o mutado C_i'' a partir de la siguiente expresión donde el tamaño de paso de la mutación $\beta = [0,1]$ y la dirección de la misma se representa por d (ecuación 9) [11]:

$$C_i'' = C_i' + \beta * d. \quad (9)$$

Tabla 2. Experimentos a realizar.

Test	Técnica	Cromosomas	Porcentaje Cruzamiento	Porcentaje Mutación	Óvulos	Espermas	Sistema de Control
1	GA	100	80%	1%	--	--	Vc ₁
2	GA	100	60%	1%	--	--	Vc ₁
3	IVF/GA	100	80%	1%	1	20	Vc ₁
4	IVF/GA	100	60%	1%	1	20	Vc ₁
5	GA	100	80%	1%	---		Vc ₂
6	GA	100	60%	1%	---		Vc ₂
7	IVF/GA	100	80%	1	1	20	Vc ₂
8	IVF/GA	100	60%	1	1	20	Vc ₂

A partir del anterior se plantea una serie de test que se describen en la tabla 2 los cuales suelen se consideraron a partir de los datos de fertilidad, es decir entre un 40 y un 20% de las parejas tienen problemas reproductivos. Los resultados de los experimentos se muestran en la sección 4. La finalidad es demostrar la pertinencia de algoritmo IVF/GA, como un método de sintonización de ganancias de controladores aplicados a un convertidor de energía multicelular.

Cada uno de los tests o experimentos se ejecutan 35 veces, esto permite analizar estadísticamente la repetitividad es decir la estabilidad del algoritmo. Estos estudios también permiten describir si existen diferencias estadísticamente significativas entre los experimentos realizados

4. Resultados

Los resultados reportados en esta sección son expresados en términos del error cuadrático medio de cada sistema de control. En las figuras 6 (a) y 6 (b) se muestra la convergencia de los GA (color azul) y IVF/GA (rojo) para el sistema de control Vc₁ con una posibilidad de cruzamiento del 60% y 80% respectivamente. Los resultados con el porcentaje de cruzamiento del 60% y 80% son mostrados en las figuras 7 (a) y 7 (b) para el sistema de control Vc₂.

Se puede observar que la convergencia no presenta diferencias significativas entre ambas técnicas para los dos sistemas de control que componen el convertidor muticelular propuesto.

Por otra parte la tabla 3 muestra los resultados estadísticos realizados sobre 35 ejecuciones, lo cual permite determinar cuál algoritmo cumple con los mejores criterios de estabilidad a través del cálculo de la repetitividad (desviación estándar entre media aritmética). Además se aplicó un test de Kolmorov-Smirnov, (con la finalidad comprobar el comportamiento estocástico de los algoritmo propuestos).

La tabla 3 muestra, de acuerdo al test de normalidad de Kolmorov-Smirnov (K-S), que todos los experimentos tienen un comportamiento estocástico. A partir de esto se plantea un test de Anova con la finalidad de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los experimentos desarrollados en este trabajo. Los resultados se muestran en la tabla 4.

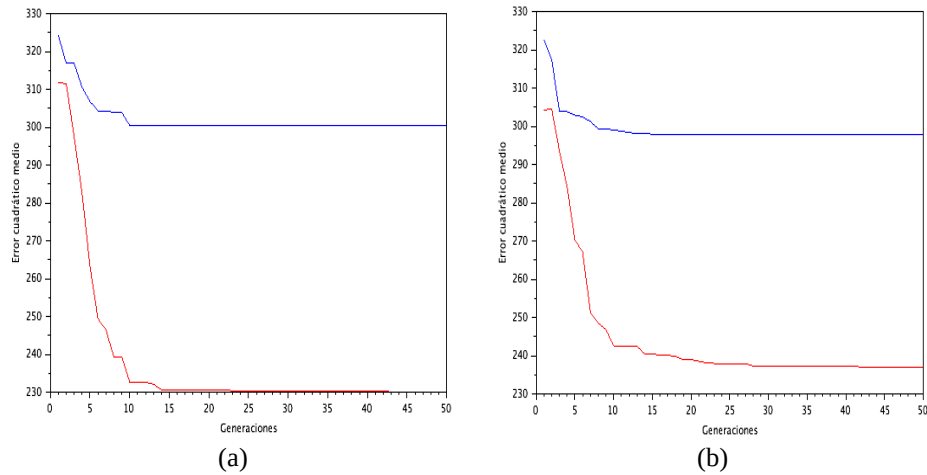


Fig. 6. Convergencia de los ajustes de los sistemas V_{c1} .

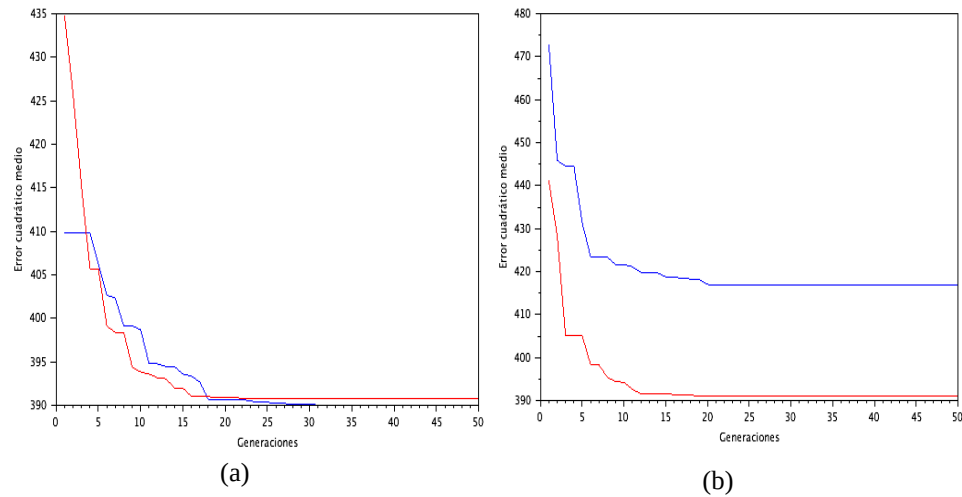


Fig. 7. Convergencia de los ajustes de los sistemas V_{c2} .

Tabla 3. Estadísticos de los experimentos de los sistemas de control V_{c1} y V_{c2} .

Test	Técnica	Valor Medio	Desviación Estándar	Repetitividad	Significancia asintótica (K-S)
1	GA	301.9177	10.6245	3.5190	0.980
2	GA	305.3213	11.0000	3.6027	0.820
3	IVF/GA	264.6754	27.2457	10.2940	0.270
4	IVF/GA	269.2317	28.8980	10.7335	0.660
5	GA	398.1020	7.5952	1.907	0.304
6	GA	401.4855	10.4917	2.6132	0.508
7	IVF/GA	390.5473	7.4637	1.9111	0.156
8	IVF/GA	392.8595	7.2456	1.8443	0.685

Tabla 4. Análisis de Anova de los experimentos.

		Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
Valor de la función Objetivo	Entre Grupos	904335.333	7	129190.762	495.153	0
	Intra Grupos	70967.681	272	260.911		
	Total	975303.014	279			

Las tablas 5 y 6 muestran los resultados del test de Tukey sobre los experimentos propuestos para los sistemas de control V_{c1} y V_{c2} respectivamente, colocando en color rojo el valor correspondiente al menor valor del error cuadrático medio.

Tabla 5. Test de Tukey para experimentos sobre el sistema V_{c1} .

Subconjuntos para $\alpha=0.05$		
Experimento	1	2
1	301.9177	
2	305.3213	
3		264.6754
4		269.2317

En la tabla 5 se muestra que los resultados de los experimentos 1 y 2, que fueron sujetos de optimización por medio de un GA, son estadísticamente similares. Por otra parte la media de los experimentos 3 y 4, los cuales fueron tratados con el IVF/GA propuesto en este

artículo son similares entre sí. Por otra parte, la tabla 6, representativa del sistema de control V_{C_2} tienen un comportamiento similar a V_{C_1} .

Tabla 6. Test de Tukey para experimentos sobre el sistema V_{C_2} .

Experimento	Subconjuntos para $\alpha=0.05$	
	1	2
5	398.1020	
6	401.4855	
7		390.5473
8		392.8595

Las tablas 5 y 6 muestran que los errores cuadráticos medios de los sistemas V_{C_1} y V_{C_2} son menores cuando se ajustan las ganancias de sus PID's con un IVF/GA en comparación con el GA.

Las figuras 8 (a) y 8 (b) muestran los voltajes de salida de los capacitores C_1 y C_2 respectivamente, los cuales son obtenidos por la acción de los PID's ajustados por un IVF/GA (color rojo) y GA (en color azul) con una probabilidad de cruce del 80%, dado los resultados reportados. En las mismas figuras también se compara con el ajuste de Ziegler-Nichols (negro).

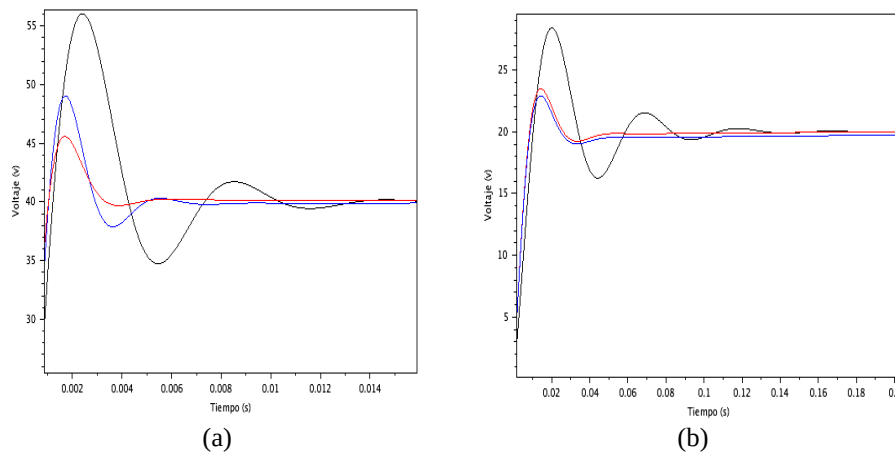


Fig. 8. Voltajes de los capacitores C_1 y C_2 regulados con PID'd.

La tabla 7 muestra un ejemplo de las ganancias de los controladores, las cuales son obtenidas por las técnicas que presentan menor valor de error cuadrático medio. La tabla 8 muestra los índices de desempeño que permite valorar la acción de los controladores diseñados en esta propuesta.

Tabla 7. Valores de las ganancias PID de los sistemas Vc_1 y Vc_2 .

Sistema	Técnica empleada	K_p	K_i	K_d
Vc_1	GA	89.11892	2257.9539	0.0155993
	IVF	88.789632	5236.8697	0.0308438
	Ziegler Nichols	51.037022	33073.821	0.0196891
Vc_2	GA	25.006147	107.51478	0.0943677
	IVF	25.393505	309.03829	0.0940209
	Ziegler Nichols	14.79555	1032.4077	0.0530092

Tabla 8. Criterios de desempeño de los sistemas Vc_1 y Vc_2 .

Sistema	Técnica empleada	Error RMS	Porcentaje de sobre impulso	Tiempo de establecimiento	Error estado estable
Vc_1	GA	305.79742	22.6301	0.007	0.06174
	IVF	264.74921	13.997	0.007	-0.01
	Ziegler Nichols	389.82819	40.1245	0.02	-0.000008
Vc_2	GA	388.4005	14.5610	0.06	1.1120
	IVF	387.57442	17.4101	0.05	0.0862
	Ziegler Nichols	587.93244	42.0535	0.16	0.00685

5. Conclusiones

A partir de las pruebas estadísticas mostradas se puede observar que el Algoritmo Genético con Fertilización In Vitro presenta las siguientes ventajas:

- De acuerdo a la Tabla 3, para los sistemas de control Vc_1 y Vc_2 los menores errores cuadráticos medios son obtenidos con el IVF/GA.
- Convergencia no se ve afectada.
- La repetitividad obtenida por el IVF/GA es menor con respecto con el GA.

Las tablas 5 y 6 muestran que los experimentos realizados con el GA son estadísticamente iguales. Se observa, de acuerdo al test de Tukey, que el IVF/GA es una técnica diferente a un algoritmo Genético Canónico y nueva de acuerdo a lo revisado en la literatura especializada. Se demuestra que los cromosomas con baja aptitud al recombinarse

con un cromosoma de valor alto inciden en la convergencia del algoritmo. Es necesario explorar los efectos de los operadores de cruzamiento en el algoritmo IVF/GA, esto puede modificar la repetitividad.

Como trabajo a futuro se plantea el diseño otros esquemas de regulación de voltaje de los capacitores flotados de un convertidor multicelular tales como el control difuso y las Redes Neuronales Artificiales.

Referencias

1. Gazzam, N., Benalia A: Observability Analysis and Observer Design of Multicellular Converters. In: 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC-2016), IEEE, Algiers, Algeria (2016)
2. Rossano Díaz, I. O.: Sistema digital aplicado a un convertidor multinivel estático. Tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Toluca, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Toluca, Estado de México, México (2009)
3. Flores Fuentes, A. A.: Generador de RF de alta potencia por medio de un inversor multinivel. Tesis de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Toluca, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Toluca, Estado de México, México (2009)
4. Flores Fuentes A. A.: Algoritmo Genético implementado en la optimización de los parámetros de un controlador PID aplicado a un convertidor estático de energía. En: Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica Electro, pp. 89–94, Instituto Tecnológico de Chihuahua, Chihuahua, México (2013)
5. Yang, X. S.: Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. United Kingdom: Luniver Press (2011)
6. Mitchell, M.: An introduction to genetic algorithms. MIT Press, USA (1998)
7. Gen, M., Cheng, R.: Genetic algorithms and engineering optimization. John Wiley and Sons (2000)
8. Camilo, C., Yamanaka, K.: In Vitro Fertilization Genetic Algorithm Applied to Multidimensional 0-1 Knapsack Problem. In: Proceedings of the 2011 World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing (2011)
9. Oliva, R.: Genética Humana. 3er edn. Edicions Universitat Barcelona (2004)
10. Elder, K.: In Vitro Fertilization. 3er edn Cambridge University Press, United Kingdom (2010)
11. Takahashi, M.: A Crossover Operator Using Independent Component Analysis for Real-Coded Genetic Algorithms. In: Proceedings of the 2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (2011)

Visión por computadora en un robot móvil tipo oruga

Uriel González Escalona, Elsa Rubio Espino, Juan Humberto Sossa Azuela

Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación,
Ciudad de México,
México

a150158@sagitario.cic.ipn.mx, {erubio,hsossa}@cic.ipn.mx

Resumen. En este artículo se realiza un estudio comparativo entre tres tipos diferentes de detectores y descriptores de rasgos sobre un robot móvil tipo oruga. Los detectores y descriptores son SIFT, SURF y ORB. Las métricas utilizadas como comparación son: tiempo de procesamiento, resistencia al ruido e invarianza a la rotación. Los experimentos muestran que la técnica de ORB es la más rápida obteniendo resultados similares en la resistencia al ruido y a la invarianza a la rotación. Por lo cual, para robots móviles utilizados en ambientes no estructurados, donde la velocidad de procesamiento es un factor primordial, esta técnica es la más recomendable.

Palabras clave: robot oruga, visión por computadora, ORB.

Computer Vision in Mobile Tracked Robot

Abstract. In this article a comparative study is carried out between three different types of detectors and feature descriptors on a mobile tracked robot. The detectors and descriptors are SIFT, SURF and ORB. The metrics used as a comparison are: processing time, resistance to noise and invariance to rotation. The experiments show that the ORB technique is the fastest obtaining similar results in the resistance to noise and the invariance to the rotation. Whereby, for mobile robots used in unstructured environments, where the speed of processing is a prime factor, this technique is the most recommendable.

Keywords: tracked robot, computer vision, ORB.

1. Introducción

La visión por computadora fue diseñada para poder simular el sistema de visión humano, donde una de las tareas principales es el reconocimiento del entorno. Lo anterior, significa que es posible saber que objetos se pueden localizar

en una imagen, para lo cual existe una gran diversidad de técnicas que tratan de resolver este problema.

Con el avance de las investigaciones se desarrollaron conceptos como extracción de esquinas, detectores de bordes, reconocimiento de texturas, etc. Estos conceptos ayudaron a mejorar el entendimiento que puede tener una computadora acerca de lo que es un objeto, y por lo tanto poder reconocer el entorno que se le muestra. Para poder extraer estas características se desarrollaron técnicas capaces de distinguirlas y a su vez, de ser lo menos invariantes a aspectos como son el ruido y los cambios de iluminación.

Los robots móviles que utilizan la visión por computadora como herramienta para poder moverse e interactuar con su ambiente, deben poseer algoritmos que sean rápidos y eficientes, ya que se procura que el procesamiento de la imagen se realice en tiempo real [11]. Por lo cual, se debe especificar qué características del entorno son necesarias y cuáles pueden ser desechadas ahorrando tiempo de procesamiento.

2. Trabajo previo

2.1. Visión por computadora

Se han realizado diferentes estudios sobre la eficiencia de los extractores de rasgos algunos de ellos son SIFT, SURF, FAST, ORB, CenSurE, START donde se busca observar la eficiencia, tiempo de procesado y resistencia al ruido [9,6].

Los robots móviles para poder realizar tareas de forma tele-operada o de forma autónoma, necesitan de herramientas que le permitan reconocer el entorno en el que se encuentran, si el operador no puede observar el entorno y reaccionar a este, se le adapta al robot técnicas de visión por computadora que le permiten reconocer el entorno, estas técnicas necesitan ser procesadas en el menor tiempo posible para poder ejecutarse y dar al robot los elementos necesarios para su funcionamiento [8,17].

2.2. Robot móvil tipo oruga

Los avances de la tecnología han hecho posible el diseño y construcción de robots móviles para un amplio rango de aplicaciones. Estos sistemas son diseñados para facilitar algunas tareas como son la inspección y reconocimiento de lugares remotos, donde el uso de los robots liberan al operador a exponerse a situaciones de riesgo.

Los robots tipo oruga de todo terreno, integran bandas laterales para su desplazamiento, ofreciendo una mejor tracción que los robots de ruedas, especialmente en terrenos no estructurados como son la arena y la grava. Por ejemplo, el robot utilizado para la inspección de túneles cableados [19], el cual es un robot capaz de subir peldaños de hasta su propia altura, gracias a la tracción que ofrecen las orugas.

De igual forma, algunas investigaciones han analizado el uso de estos tipos de robot [12], abriendo el debate sobre los tipos de locomoción y las superficies en

donde se desplazan, lo cual ha demostrado las ventajas de los robot tipo oruga sobre otros robots con ruedas.

El uso de sensores incrementa el desempeño y fomenta el diseño de algoritmos avanzados, permitiendo al robot navegar de forma autónoma u optimizar complejas trayectorias de desplazamiento reduciendo así, el tiempo y la energía utilizada [8,17].

3. Detectores y descriptores de rasgos

3.1. Transformación de características invariable de escala

Transformación de características invariable de escala (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) es un método para extraer características distintivas de una imagen. Este método, fue publicado por David G. Lowe en 2004, y es invariante a escalamiento y rotación; puede utilizarse para realizar una relación entre diferentes vistas de un objeto o escena [10], para lo cual utiliza cuatro principales aspectos:

- Scale-space extrema detection: el cual como primer paso, busca sobre todas las escalas y rotaciones de las imágenes para identificar puntos de interés que sean invariantes a escala y rotación.
- Keypoint localization: donde a cada punto candidato se le asigna un modelo que designa la localización y escala.
- Orientation assignment: una o mas orientaciones son asignadas a cada punto clave basado en su dirección de gradiente.
- Keypoint descriptor: los gradientes locales de la imagen son medidos a una escala seleccionada de la región que rodea al punto clave.

3.2. Rasgos robustos y acelerados

Rasgos robustos y acelerados (Speeded up robust features, SURF) es un detector y descriptor de puntos invariantes a escala y rotación, el cual utiliza convoluciones integrales de imagen por imagen usando como base la matriz Hessiana para la identificación de los detectores, además del uso de un descriptor basado en la distribución de los datos [16].

Para poder ser invariante a la rotación se identifican orientaciones posibles del punto de interés, al cual se le calculan las respuestas Haar-wavelet en las direcciones X y Y en un radio de 6 pixeles alrededor del punto, las cuales son representadas como vectores.

En la extracción del descriptor, se construye una región cuadrada centrada en el punto de interés con la orientación previamente asignada con un tamaño de ventana de 20 pixeles; posteriormente se subdivide en regiones de 4×4 pixeles a las cuales se le aplica un vector de descripción.

3.3. Oriented FAST and rotated BRIEF

El detector y descriptor de puntos característicos ORB [15], se desarrolla con la idea de poder tener un descriptor que sea mas rápido y utilice menos procesamiento que SIFT teniendo un rendimiento parecido, para lo cual se utiliza el detector de puntos característicos FAST [13,14], el cual utiliza un círculo de 16 pixeles al rededor del pixel a clasificar como esquina. En la Fig. 1, se observa la intensidad de los 16 pixeles comparada con el pixel a clasificar.

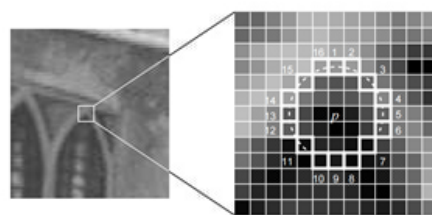


Fig. 1: Círculo de Bresenham.

Una vez que se han detectado las esquinas en la imagen, se utiliza BRIEF [3] para asignar un descriptor. Este descriptor es un código binario. La ventaja de utilizar BRIEF es que al generarse un código binario este puede compararse para observar similitud utilizando la distancia de Hamming, la cual es computacionalmente óptima [2].

4. Uso de la visión por computadora en robots móviles

Los robots móviles tele-operados utilizados para la inspección, planeamiento de rutas o recolección de objetos, necesitan poder buscar de forma eficiente los obstáculos y el terreno viable para moverse, para lo cual el uso de técnicas de visión por computadora son muy necesarias [7,1]. El desempeño de este tipo de robots, es primordial ya que algunas tareas específicas deben realizarse con el menor número de fallos posibles [18]; todo esto para poder realizar el procesamiento a la velocidad requerida [4,5]. En un robot la capacidad de procesamiento está limitada a su sistema embebido, por lo cual los algoritmos que se utilicen deben ser lo menos complejos posible.

5. Experimentos

El robot usado para este trabajo es un robot todo terreno con un chasis totalmente metálico (Fig. 2). Tiene seis ruedas con suspensión independiente que mejora la tracción y la absorción de impactos. El robot contiene un espacio interior donde se alojan los componentes como son los motores eléctricos, el

sistema embebido Raspberry PI, una cámara OV5647 de 5 MPx y un sensor ultrasónico HC-SR04, los cuales son utilizados para poder controlar al robot de forma remota. Además se adaptó al robot un brazo robótico con 4 grados de libertad, el cual permite al robot poder tomar los objetivos en el ambiente de búsqueda.

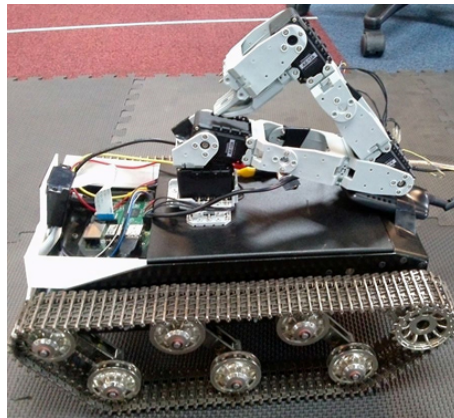


Fig. 2: Robot móvil tipo oruga T-Rex.

Las características principales del robot y el entorno de búsqueda en el cual se desempeña se muestran en la Tabla 1.

Los objetivos como el mostrado en la Fig. 3, son objetos rectangulares de tamaño 10×5 centímetros que se precargan en el sistema para su posterior búsqueda en el entorno, el objeto se encuentra sobre el terreno de prueba del robot el cual deberá detectar al objeto por medio de sus puntos característicos.



Fig. 3: Figura de muestra.

El ejercicio consiste en la activación remota del robot, el cual podrá buscar de forma autónoma el objetivo seleccionado en un rango entre 12 y 60 centímetros, poder tomarlo con el brazo robótico y poder posteriormente localizar el depósito y dejar el objeto.

Tabla 1: Características del robot tipo oruga T-Rex.

Parámetro	Valor
Velocidad	0.5 m/s
Ángulo de visión	60 grados
Peso	4.5 Kg
Comunicación	Wi-Fi
Objetivo	
Ángulo de búsqueda	180 grados
Distancia de búsqueda	60 centímetros
Peso máximo	100 gramos
Depósito	
Ángulo de búsqueda	360 grados
Distancia de búsqueda	60 centímetros

Se realizaron pruebas para determinar el tiempo promedio de búsqueda del objeto en un ambiente de trabajo real (Fig. 4), el cual consiste en terrenos no preparados, donde la superficie de movimiento puede ser arena, tierra o gravilla.



Fig. 4: Objeto en un entorno de busqueda.

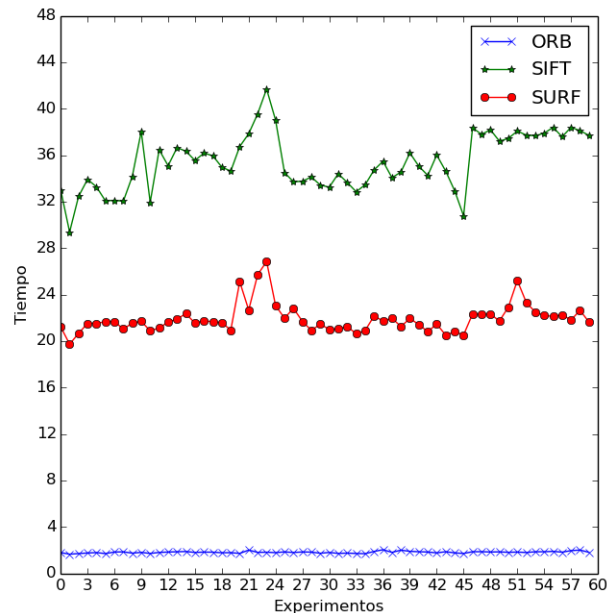


Fig. 5: Tiempo de ejecución en el sistema Raspberry Pi.

Por estudios anteriores, se conoce que otro tipo de locomociones como lo pueden ser las ruedas sobre este tipo de terrenos, presentan problemas serios de desplazamiento. Posteriormente a las imágenes encontradas por el robot, se les añade ruido del tipo Gaussiano en un porcentaje del 5, 10, 15 y 20%; esto con el fin de poder observar la resistencia al ruido que presentan los algoritmos. Finalmente, se gira el objeto en un rango entre 0 grados y 45 grados con pasos de 15 grados para observar el número de puntos característicos que encuentran los diferentes métodos y detectar si todavía es posible reconocer el objeto en el ambiente de búsqueda.

En ambientes no preparados el número de puntos característicos encontrados por los algoritmos son mayores a 10,000 puntos, de los cuales los algoritmos deben poder identificar los puntos del objeto previamente seleccionado, y que se encuentren en un rango de entre 500 a 700 puntos.

Referente al tiempo de búsqueda (Fig. 5), se observa que el algoritmo de ORB se ejecuta en un tiempo constante mucho menor que SIFT o SURF, los cuales tienen resultados variantes respecto a la distancia a la que se encuentra el objeto del robot, lo cual ayuda a que los puntos característicos necesarios para la detección de los objetos sean procesados de forma más rápida, con lo cual el tiempo de ejecución del robot en su tarea programada disminuya.

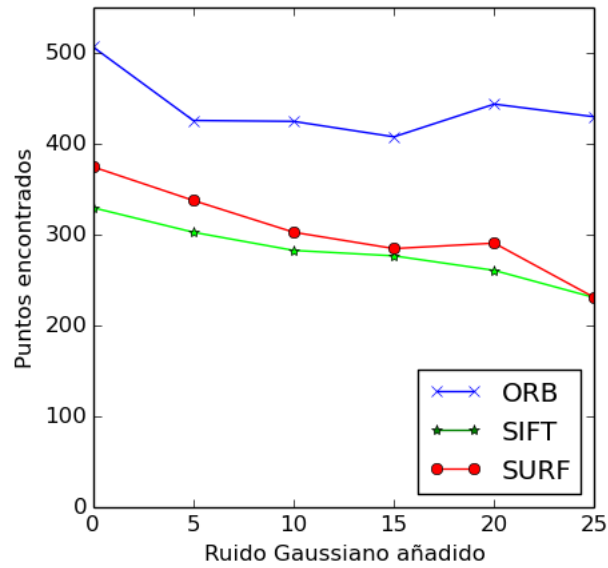


Fig. 6: Resistencia al ruido.

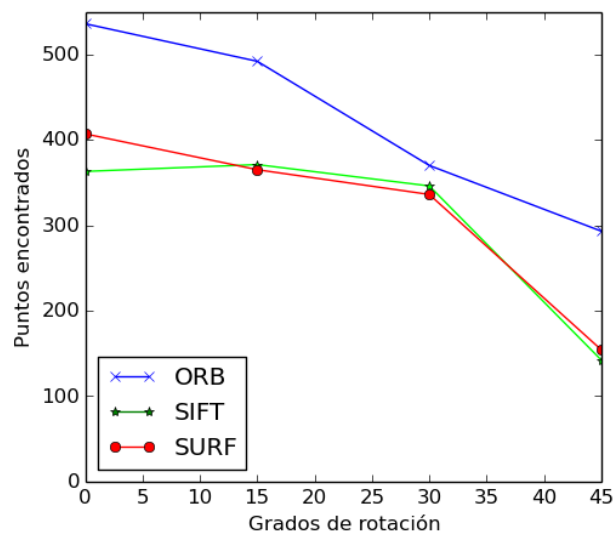


Fig. 7: Rotación del objeto.



Fig. 8: Prueba de ejecución del robot móvil tipo oruga T-Rex.

En la segunda prueba, a las imágenes encontradas por el robot se le agrega ruido Gaussiano en porcentajes de 5 %, 10 %, 15 % , 20 % y 25 % (Fig. 6), esto con el fin de poder observar la resistencia al ruido de los algoritmos ya que en

ambientes con partículas en el aire como son la arena y tierra, la cámara puede verse obstruida. Se puede observar que el algoritmo de ORB para todos los casos encuentra mas de 400 puntos característicos, mientras que SIFT y SURF no encuentran más de 400 puntos característicos aún sin ruido y esta cantidad disminuye hasta menos de 250 puntos característicos cuando el ruido Gaussiano es mayor a 25 %, por lo cual se observa que ORB es más resistente al ruido.

Finalmente se realizaron pruebas para observar la invarianza a la rotación del objetivo, esto en un rango de 0 grados a 45 grados con pasos de 15 grados (Fig. 7). Cuando el objetivo no tiene rotación (0 grados), el número de puntos encontrados por los algoritmos son 530, 405 y 361 respectivamente, estos números decaen si la rotación aumenta y si la cantidad de puntos característicos decae más de la mitad de cuando se está a 0 grados, se dice que el sistema no puede encontrar al objetivo, por lo cual para los casos en donde los métodos de SIFT y SURF tienen una rotación mayor a 45 grados, éstos no pueden localizar al objetivo.

Tabla 2: Tiempo promedio de ejecución.

Ángulo del objetivo	Tiempo promedio
-90 grados	298.3 s
-45 grados	225.1 s
0 grados	95.6 s
45 grados	153.8 s
90 grados	211 s

Dado que el algoritmo de ORB muestra un mejor desempeño en el tiempo de procesado, se obtiene una cantidad mayor de puntos característicos aún en presencia de ruido y para cuando el objeto presenta una rotación de hasta 45 grados este algoritmo puede detectarlo. Por lo que ORB es el método que se decidió implementar en el robot tipo oruga. Para observar el desempeño del robot al realizar la tarea de buscar el objetivo, recogerlo y dejarlo en el depósito como se muestra en la Fig. 8, se realizaron una serie de experimentos donde se mide el tiempo de ejecución y el porcentaje de acierto. El terreno de prueba consiste en una superficie de tierra y arenisca con una inclinación no mayor a 20 grados, los objetos se colocaron de forma aleatoria en un rango de 180 grados frente al robot con una inclinación no mayor a 40 grados y el deposito se posicionó en un rango de 360 grados al rededor del robot a una distancia entre 30 y 60 centímetros.

En la Fig. 9 se muestra el tiempo obtenido de los resultados de una serie de pruebas, de acuerdo a la gráfica generada, el tiempo de ejecución varía dependiendo de la posición del objeto respecto del robot.

Por lo que es posible observar que el tiempo promedio para esta tarea es proporcional a la posición del objetivo. Lo anterior se puede ver en la Tabla 2.

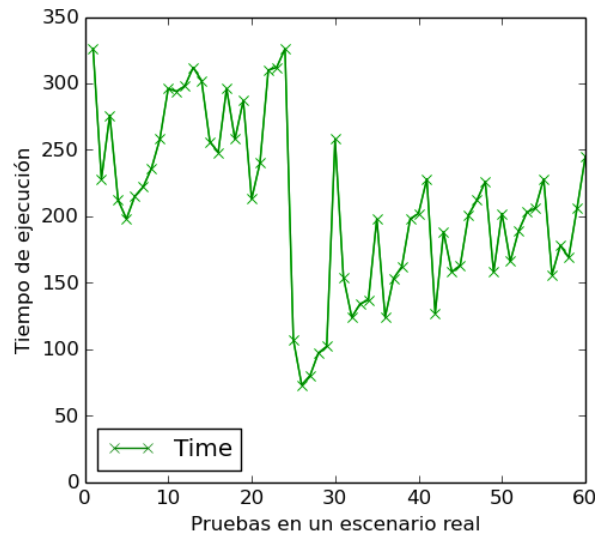


Fig. 9: Tiempo de ejecución del robot móvil tipo oruga T-Rex.

Si el objeto se encuentra frente al robot, se tiene un tiempo mínimo; cuando el objeto se localiza a la derecha del robot el tiempo aumenta en un rango aproximado del 60 %, pero si el objeto se encuentra a la izquierda del robot, el tiempo aumenta hasta un 200 %.

6. Conclusiones y trabajo futuro

De acuerdo a los resultados de los experimentos, el detector y descriptor de rasgos que tiene un procesamiento más rápido es ORB, el cual tiene un promedio de búsqueda de puntos clave de 1.7621 segundos; mientras que SIFT es de 34.2433 segundos y SURF de 21.6925 segundos, además de que de acuerdo a las pruebas realizadas con ruido se observó que ORB puede encontrar más relaciones que SIFT o SURF aún cuando el ruido es mayor. En cuanto a la rotación del objeto, los tres algoritmos decaen de manera similar, por lo que se elige el detector y descriptor de rasgos ORB para su uso en el robot oruga ya que aún con interferencias se puede encontrar el objeto en su entorno de búsqueda (Fig. 10).

El robot móvil tipo oruga es capaz de poder detectar, tomar y depositar un objeto en terrenos no preparados en un tiempo óptimo el cual para los casos de mayor complejidad no es mayor a 300 segundos. Además de presentar un margen de error no mayor al 8 %, por lo cual este robot constituye una herramienta de búsqueda con un alto índice de acierto.

En el futuro se propone el uso de técnicas de redes neuronales para poder procesar los rasgos de los objetos a buscar y así tener un rango de búsqueda

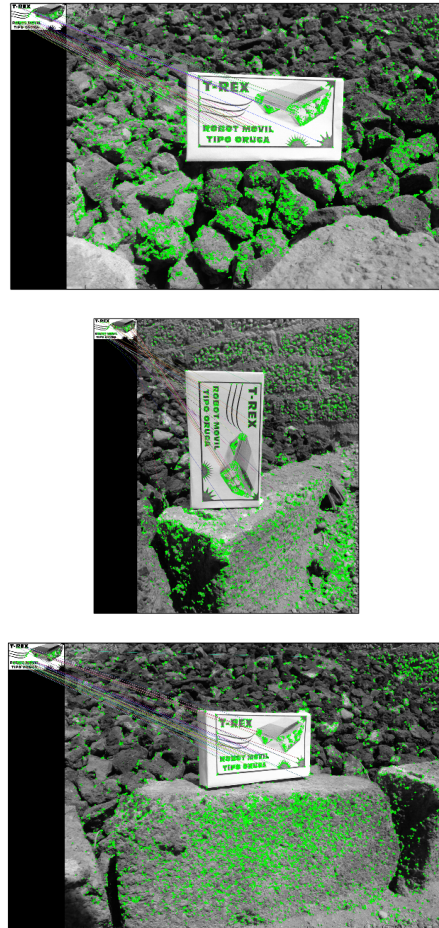


Fig. 10: Relaciones entre el objeto de prueba y el ambiente real.

mayor, con lo cual el robot será capaz de poder seguir rutas en las cuales se encuentren los objetivos, y que el robot pueda recolectarlos de manera secuencial de acuerdo a la distancia entre el objetivo y el robot. Además de la integración de sensores que permitan al robot maniobrar diferentes tipos de objetos con tamaños y formas diferentes.

Agradecimientos. E. Rubio y H. Sossa agradecen el soporte provisto por el Instituto Politécnico Nacional y la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) en la realización de esta investigación. Este trabajo fue apoyado económicamente por SIP-IPN (20171548 y 20170901) y CONACYT (155014 y 65). U. Escalona agradece al CONACYT por la beca para realizar sus estudios de Maestría.

Referencias

1. Al-Mutib, K., Mattar, E., Alsulaiman, M.: Implementation of fuzzy decision based mobile robot navigation using stereo vision. *Procedia Computer Science* Volume 62 (2015)
2. Atallah, M.J., Duket, T.W.: Pattern matching in the hamming distance with thresholds. *Information Processing Letters* Volume 111 (2011)
3. Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C., Fua, P.: Brief: Binary robust independent elementary features. *European Conference on Computer Vision* (2011)
4. Conde, B.C., Fuentes, S., Caron, M., Xiao, D., Collman, R., Howell, K.S.: Development of a robotic and computer vision method to assess foam quality in sparkling wines. *Food Control* Volume 71 (2017)
5. Cunha, J., Ferreira, R., Lau, N.: Computer vision and robotic manipulation for automated feeding of cork drillers. *Materials & Design* Volume 82 (2015)
6. Ferreira, F., Veruggio, G., Caccia, M., Bruzzone, G.: A comparison between different feature based methods for rov vision based speed estimation. *IFAC Proceedings Volumes* (2010)
7. Gryaznov, N., Lopota, A.: Computer vision for mobile on-ground robotics. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (2014)
8. Huang, C., Zhou, W.: A real-time image matching algorithm for integrated navigation system. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* (2014)
9. Kashif, M., Deserno, T., Haak, D., Jonas, S.: Feature description with sift, surf, brief, briesk or freak? a general question answered for bone age assessment. *Computers in Biology and Medicine* (2015)
10. Lowe, D.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 (2004)
11. Miura, J., Ikeda, S.: A simple modeling of complex environments for mobile robots. *Int. J. Intelligent Systems Technologies and Applications* (2009)
12. Nastaran, T.A., Majid, M.: Driving performance analysis of a tracked mobile robot on different terrains. *International Conference on Robotics and Mechatronics* (2015)
13. Rosten, E., Drummond, T.: Machine learning for high speed corner detection. *European Conference on Computer Vision* (2006)
14. Rosten, E., Porter, R., Drummond, T.: Faster and better: A machine learning approach to corner detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2010)
15. Rublee, E., Rabaud, V., Koolige, K., Bradski, G.: Orb: an efficient alternative to sift or surf. *International Conference on Computer Vision* (2011)
16. Tinne, H.B., Gool, T.L.V.: Surf: Speeded up robust features. *European Conference on Computer Vision* (2006)
17. Vincent, I., Sun, Q.: A combined reactive and reinforcement learning controller for an autonomous tracked vehicle. *Robotics and Autonomous Systems* (2012)
18. Zhao, Y., Gong, L., Huang, Y., Liu, C.: A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot. *Computers and Electronics in Agriculture* (2016)
19. Zou, M., Bai, H., YangWang, Yu, S.: Mechanical design of a self-adaptive transformable tracked robot for cable tunnel inspection. *International Conference on Mechatronics and Automation* (2016)

Control con rechazo activo de perturbaciones para el equilibrio de robots humanoides

S.M. Orozco-Soto, J.M. Ibarra-Zannatha

Centro de Investigación y Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV),
México

orozco@ctrl.cinvestav.mx, jibarra@cinvestav.mx

Resumen. En este trabajo se presenta una estrategia de control para el equilibrio de robots humanoides mientras se encuentra de pie sin caminar, utilizando rechazo activo de perturbaciones. Dicha técnica de control regula la posición del ZMP del humanoide para mantenerlo dentro del polígono de soporte por medio de un regulador cuadrático lineal en tiempo discreto adicionado con detección y corrección de perturbaciones en línea basadas en un observador de estado extendido. La estrategia de control propuesta se implementó en un robot humanoide Nao utilizando lenguaje *Python*, mostrando resultados satisfactorios al mantener el robot de pie a pesar de ser sometido a fuerzas externas que alteran la posición de su ZMP. Los resultados antes mencionados motivan al uso de esta técnica de control para el rechazo de perturbaciones durante otras actividades complejas que realizan los robots humanoides, como el caminar, o su aplicación en el control de otro tipo de sistemas robóticos.

Palabras clave: robots humanoides, control ADRC, control basado en ZMP, control de equilibrio.

Active Disturbance Rejection Control for Humanoid Robots Balance

Abstract. This paper presents a control strategy for the balance of humanoid robots while they are standing without walking, using the active disturbance rejection control approach. Such control technique regulates the position of the ZMP of the humanoid in order to keep it within the support polygon by means of a discrete-time linear quadratic regulator enhanced with on-line disturbance detection and correction using an extended-state observer. The proposed control strategy was implemented on a Nao humanoid robot using *Python* and showing successful results by keeping the robot standing despite of external forces that affect the position of its ZMP. The results encourage the use of this controller for disturbance rejection meanwhile other complex activities are performed by humanoids, such as walking, or its application in the control of different kinds of robots.

Keywords: humanoid robots, ADRC control, ZMP-based control, balance control.

1. Introducción

Los robots humanoides son máquinas desarrolladas para operar en los mismos entornos en los que los seres humanos llevan a cabo sus actividades [1], en los cuales sufren diferentes perturbaciones inherentes a las tareas que realizan mientras están de pie o mientras caminan, además de que dichos entornos son dinámicos y por tal motivo, el humanoide debe ser capaz de reaccionar para mantenerse en equilibrio. En la literatura se encuentran reportadas diversas técnicas que le permiten a un robot humanoide permanecer en equilibrio mientras está de pie, como los controladores reportados en [2,3,4], en los cuales se utilizan los conceptos de centro de presión y reguladores cuadráticos lineales, además de otras técnicas que se utilizan mientras el robot camina, tales como las reportadas en [5], y otras más que se han utilizado para el rechazo de perturbaciones como las presentadas en [1,6,7,8].

En este trabajo, se propone el uso de una técnica de control llamada *Control con rechazo activo de perturbaciones* para garantizar el balance de robots humanoides mientras está de pie realizando alguna tarea. Esta técnica ha sido utilizada recientemente para distintas aplicaciones debido a que ofrece resultados satisfactorios con un costo computacional bajo, implementación rápida y con análisis matemático moderado debido a que está basada en las formas canónicas y en observadores de estado para la detección y corrección en línea de las señales de perturbación [9,10].

El controlador propuesto regula la posición del punto de momentos cero (ZMP) para mantenerla dentro del polígono de soporte del robot y así asegurar su equilibrio mientras está de pie; asimismo, la estrategia de control fue diseñada utilizando modelos simplificados de robots humanoides reportados en la literatura, además de incluir técnicas de control óptimo adicionadas con el rechazo activo de perturbaciones basado en observadores de estado extendido en tiempo discreto. La estrategia de control abordada se implementó en un robot humanoide Nao de *Aldebaran Robotics* y fue programada en lenguaje *Python* por la compatibilidad con dicha plataforma robótica.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se aborda brevemente la teoría del control con rechazo activo de perturbaciones. En la sección 3 se describe el robot humanoide y su modelo matemático. La sección 4 está dedicada al diseño del controlador propuesto. En la sección 5 se presentan los resultados de la implementación y, finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

2. Control con rechazo activo de perturbaciones

El Control con Rechazo Activo de Perturbaciones (ADRC por *Active Disturbance Rejection Control*) es una estrategia de control capaz de manejar diversas incertidumbres paramétricas y perturbaciones de forma eficiente desde el punto de vista energético y de implementación de un sistema de control, debido a que está basado en el aprovechamiento de dos de las mejores prestaciones de la teoría de control moderna: la representación de sistemas en formas canónicas y los observadores de estado [9]. En la Fig. 1 se ilustra un diagrama a bloques del esquema de control ADRC en donde se puede apreciar que el controlador utiliza dos tipos de realimentación: la perturbación estimada o detectada por el observador de estado extendido y la salida de la planta.

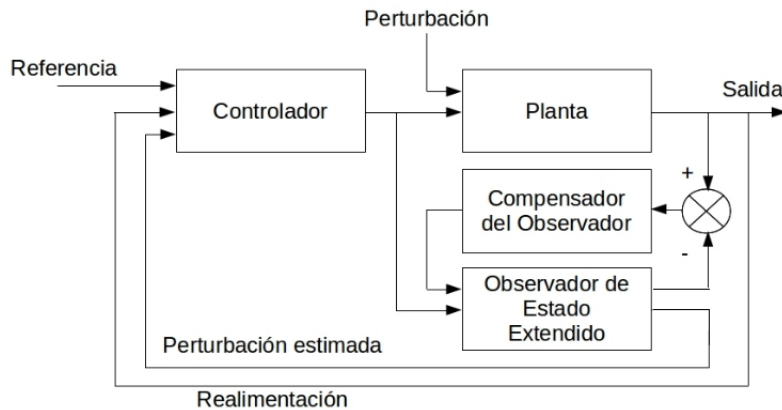


Fig. 1. Diagrama a bloques del ADRC.

2.1. Teoría general del ADRC

Sea el siguiente sistema dinámico sometido a perturbaciones:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(t, x, u, w), \\ y &= h(t, x, u, w),\end{aligned}\tag{1}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas y $w \in \mathbb{R}^q$ es el vector de perturbaciones, el cual es usualmente desconocido pero acotado. Independientemente de su naturaleza lineal o no lineal, este sistema puede ser representado bajo ciertas transformaciones difeomórficas del tipo $z = T(x)$ como una cadena de integradores de la forma:

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2, \\
&\vdots \\
\dot{z}_{n-1} &= z_n, \\
\dot{z}_n &= g(t, x, u, w), \\
y &= h(z).
\end{aligned} \tag{2}$$

Considerando $\dot{z}_n$ como una perturbación total, es posible construir un observador de estado extendido (ESO), como el mostrado en la Fig. 1, expresado como:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{z}}_1 &= \hat{z}_2 - l_1(\hat{e}), \\
&\vdots \\
\dot{\hat{z}}_{n-1} &= \hat{z}_n - l_{n-1}(\hat{e}), \\
\dot{\hat{z}}_n &= g(\hat{z}, t, u, w) - l_n(\hat{e}),
\end{aligned} \tag{3}$$

donde $\hat{e} = \hat{z} - z$ y $l(\hat{e})$ es una función vectorial que hace $\hat{z} \rightarrow z$ asintóticamente. Entonces, se propone una ley de control basado en el observador (3) de la forma:

$$u = u_0 - K_s \hat{z}, \tag{4}$$

donde K_s es la ganancia del controlador con realimentación de estados observados y u_0 es un controlador para una de cadena de integradores tal que:

$$u_0 \approx \dot{z}_{n-1}. \tag{5}$$

Cabe mencionar que u_0 considera la transformación difeomórfica inversa $x = T^{-1}(z)$. Además, este controlador no requiere un conocimiento preciso de la perturbación generalizada ni de los parámetros del modelo de la planta, solo del orden de la misma.

3. Descripción del sistema robótico

Un robot humanoide es un sistema altamente no lineal con dinámicas acopladas y complejas, el cual, además, cuenta con múltiples grados de libertad (GDL) que conforman una cadena cinemática arborescente. Debido a dichas características, la tarea de modelar matemáticamente este tipo de sistemas robóticos adquiere un grado de complejidad significativamente alto, por lo que se utilizan métodos de tipo *coarse graining* para simplificar los modelos y que continúen siendo de utilidad en el diseño de los sistemas de control.

Algunos de los modelos más representativos que se encuentran en la literatura son los tipo péndulo invertido lineal (PIL) o los modelos tipo carro-mesa [5],[11]. En este trabajo se utiliza el modelo tipo carro-mesa debido a que los experimentos se llevaron a cabo en un robot humanoide Nao de *Aldebaran Robotics*, el cual cumple con las condiciones requeridas por este modelo de ser un robot completamente actuado y con sus articulaciones controladas en posición [11].

3.1. Robot humanoide Nao

El robot Humanoide Nao es una plataforma de pequeño formato y altas prestaciones conformado por un par de piernas con 5 GDL en cada una, un par de brazos de 3 GDL (versión *Robocup*), una cabeza con 2 GDL y el torso, al cual se le asocia el referencial principal y el cual también está actuado por dos servomotores que ejecutan consignas de 2 GDL simultáneamente. En la Fig. 2 se ilustra el cuerpo completo del humanoide y de las articulaciones de la pelvis que accionan el torso, debido a que son las que se utilizan para la ejecución del controlador propuesto en este artículo. Además, el robot Nao está equipado con un sistema de percepción que incluye diferentes sensores como unidad de medición inercial (IMU), sensores de fuerza resistivos (FSR) en los pies, entre otros, los cuales se utilizan para realimentación del controlador de este trabajo.

3.2. Modelo del robot humanoide

Para llevar a cabo el diseño del controlador para equilibrio, se utilizó el modelo de tipo carro-mesa, el cual considera la masa total del robot como un carro en donde se concentra la masa total del humanoide, el cual corre sobre una mesa de masa despreciable, tal como se ilustra en la Fig. 3, en donde se puede apreciar una altura constante z_c del centro de masa, así como las coordenadas generalizadas de posición y aceleración del carro. A pesar de que el pie de la mesa es significativamente pequeño, si el carro se desplaza con cierta aceleración es posible conseguir balanceo instantáneo; asimismo, la posición x del carro determina el centro de presión que actúa en el suelo, situación que conduce a la siguiente definición:

Definición 3.1: Punto de momentos cero (ZMP) *Punto donde las componentes horizontales del momento de las fuerzas de reacción con el suelo es igual a 0, expresado matemáticamente, en el caso del eje x como:*

$$p_x = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x}. \quad (6)$$

Para garantizar que el robot permanezca equilibrado de pie, el ZMP, mismo que tiene unidades de distancia, siempre debe existir dentro del polígono de soporte formado por sus huellas. En la Fig. 3 se ilustra también la ubicación del punto p_x , el cual determina si el par $\tau_{ZMP} = 0$, indicando si el robot está o no balanceado. El sistema carro-mesa se puede representar de la siguiente forma a partir de la ecuación (6) utilizando $ZMP = p_x$ como estado y $u = \ddot{x}$ como entrada de control [5]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_x \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1/T & 1/T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -z_c/g \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \\ y &= [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} p_x \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

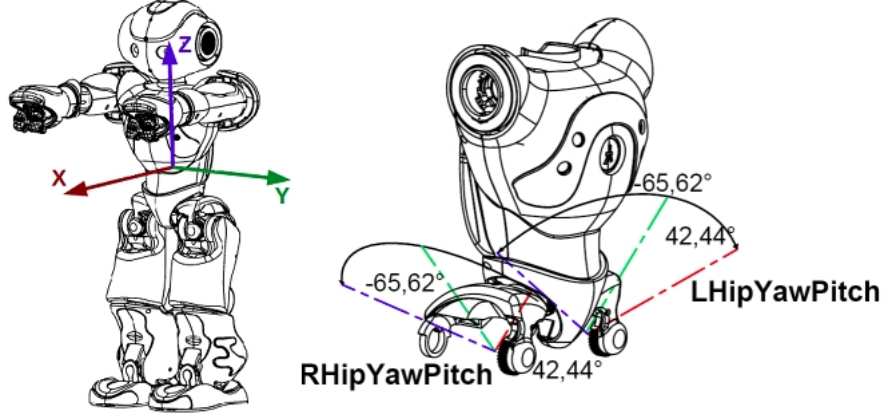


Fig. 2. Cuerpo completo del humanoide Nao y sus articulaciones de la pelvis [12].

4. Diseño del controlador

Considerar los estados del sistema (7) representados en tiempo discreto: $x_1(k) = p_x(k)$ es el ZMP, $x_2(k) = x(k)$ es la posición instantánea del centro de masa (carro), $x_3(k) = \dot{x}(k)$ es la velocidad del carro y $x_4(k) = w(k)$ es la perturbación detectada. De esta forma, representación de estado extendido es:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} (1-T) & T & T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -(z_c T^3)/(6g) \\ T^2/2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix} u(k), \quad (8)$$

donde T es el periodo de muestreo. A continuación se presenta la forma en como se calculan los estados a partir de las mediciones de los sensores del robot.

4.1. Cálculo del ZMP y de la posición del centro de masa

La ubicación del ZMP para el robot humanoide Nao se calcula de la siguiente forma:

$$zmp = \frac{1}{\sum_1^4 F_{Lfsr_i}} \begin{bmatrix} \sum_1^4 F_{Lfsr_i} dL_{x_i} \\ \sum_1^4 F_{Lfsr_i} dL_{y_i} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sum_1^4 F_{Rfsr_i}} \begin{bmatrix} \sum_1^4 F_{Rfsr_i} dR_{x_i} \\ \sum_1^4 F_{Rfsr_i} dR_{y_i} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

donde F_{Lfsr_i} es la fuerza del i -ésimo FSR del pie izquierdo, F_{Rfsr_i} representa dicha fuerza para el pie derecho, dL_{y_i} es la ubicación en el eje y del i -ésimo FSR del pie izquierdo respecto a un referencial arbitrario, dL_{x_i} es la ubicación mencionada pero en el eje x , dR_{y_i} y dR_{x_i} son sus contrapartes del pie derecho.

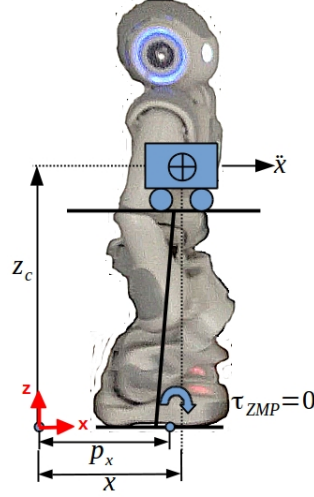


Fig. 3. Humanoide Nao representado como un sistema carro-mesa.

En este trabajo, solo se considera el ZMP en el eje x , por lo que se consideran las componentes en $y = 0$ y se asumirá que $p_x = (6)$. En la Fig. 4 se ilustra el concepto de ubicación de los FSR utilizado para el cálculo del ZMP, además, se puede observar el referencial a partir de donde se calculan las distancias de dichas ubicaciones. Asimismo, la posición instantánea $x(k)$ del carro sobre la mesa se calcula de la siguiente forma a partir de la ecuación (6):

$$x(k) = p_x(k) + \frac{z_c}{g} acc_x(k), \quad (10)$$

donde $acc_x(k)$ se obtiene a partir de las mediciones realizadas con el acelerómetro integrado en la IMU del robot. La velocidad $\dot{x}(k+1)$ se puede obtener con técnicas de filtrado, pero en este caso, se utiliza la señal calculada con el observador.

4.2. Diseño del controlador ADRC

Considerar el modelo del robot humanoide (8), para el cual, se propone el siguiente (ESO):

$$\hat{x}(k+1) = \begin{bmatrix} (1-T) & T & T^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(k) + \begin{bmatrix} -(z_c T^3)/(6g) \\ T^2/2 \\ T \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} \tanh(x_1(k) - \hat{x}_1(k)) \\ \tanh(x_2(k) - \hat{x}_2(k)) \\ \tanh(x_3(k) - \hat{x}_3(k)) \\ \tanh(w(k) - \hat{w}(k)) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

donde $w(k) = x_1(k) - \hat{x}_1(k)$. Para rechazar las perturbaciones detectadas se propone la siguiente ley de control:

$$u(k) = u_0(k) - K_o \hat{w}(k), \quad (12)$$

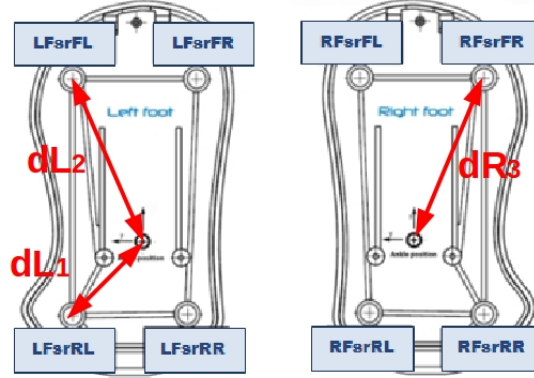


Fig. 4. Ubicación y distancias de los FSR del robot.

donde $K_o \in \mathbb{R}^+$ y u_0 es un controlador para las variables de estado detallado a continuación.

4.3. Diseño del controlador por realimentación de estado

Considerar el sistema (8), el cual es una representación en tiempo discreto extendida de (7). Si se omite el estado $w(k)$, es decir, el sistema sin perturbaciones, se obtiene la siguiente representación de estado:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) &= [1 \quad 0 \quad 0] x(k) = p_x(k), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{donde } A = \begin{bmatrix} (1-T) & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ y } B = \begin{bmatrix} -(z_c T^3)/(6g) \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}.$$

Entonces, para que el ZMP del robot siga al ZMP objetivo p_x^{ref} y de esta manera mantener al robot balanceado mientras está de pie, con consumo de energía óptimo, se propone minimizar la siguiente función de costo [5]:

$$J = \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ Q(p_{x_j}^{ref} - p_{x_j})^2 + Ru_j^2 \right\}, \quad (14)$$

donde $Q \geq 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ y $R \geq 0$ son constantes de ponderación. Minimizar la función de costo J se traduce en resolver la siguiente ecuación de Riccati:

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0. \quad (15)$$

Con lo cual se asegura la estabilidad del sistema en el sentido de Lyapunov. Además, $S = S^T > 0$ es una incógnita. Con esta solución, es posible calcular la ganancia K del regulador cuadrático lineal en tiempo discreto (DLQR) $u_0(k) = Kx(k)$ de la forma:

$$K = R^{-1}B^TS. \quad (16)$$

Finalmente, el controlador ADRC + DLQR general se puede expresar como:

$$u(k) = Kx(k) - K_o\hat{w}(k). \quad (17)$$

4.4. Implementación del controlador

Para llevar a cabo la implementación del control de seguimiento de ZMP, se utilizaron los parámetros del modelo del robot humanoide Nao mostrados en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros del modelo del robot humanoide.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Masa total del robot	m	5.182530	Kg
Altura del CdM	z_c	0.335	m
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²
Periodo de muestreo	T	100	ms

Los parámetros del DLQR utilizados son los siguientes:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 1e-3, P = \begin{bmatrix} 480.026 & 234.299 & 22.775 \\ 234.299 & 1244.482 & 46.328 \\ 22.775 & 46.328 & 34.337 \end{bmatrix},$$

$$K = [6.2917(g/z_c)T \quad 37.7014T \quad 32.5359T], \quad (18)$$

$$z = \begin{bmatrix} 0.96887 \\ 0.99889 + 0.00044i \\ 0.99889 - 0.00044i \end{bmatrix},$$

donde z son los polos en lazo cerrado del sistema, los cuales son estables, además, como Q y R ponderan el efecto de la dinámica de la planta y el gasto de energía asociado a la señal de control respectivamente, se eligieron tales que dicha entrada de control consuma la menor cantidad de energía posible.

Cabe mencionar que el controlador se programó en lenguaje *Python* debido a que es compatible con la plataforma Nao. La señal de control se implementó utilizando los actuadores para mover las articulaciones de la cadera mostradas en la Fig. 2, las cuales, una vez detectada la perturbación por medio del ESO, calculan la aceleración que debe suministrarse en sentido contrario dicha perturbación.

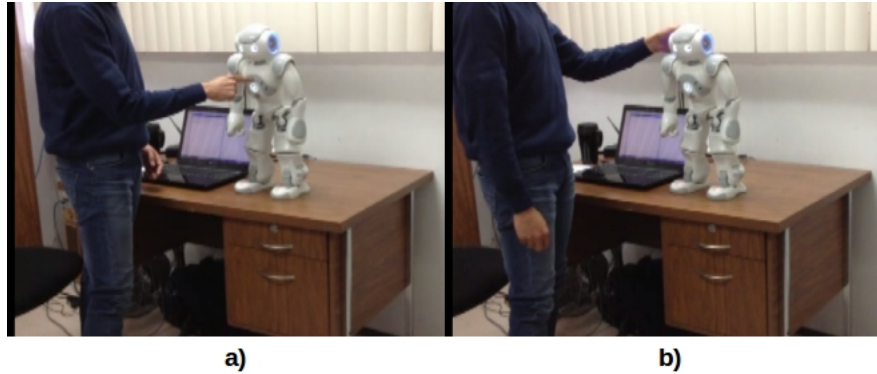


Fig. 5. Perturbaciones aplicadas al humanoide. a) Perturbación frontal. b) Perturbación trasera. Video disponible en https://www.youtube.com/watch?v=B9_J0H3KX0I.

5. Resultados

Como se mencionó en la sección anterior, el controlador ADRC propuesto se implementó utilizando lenguaje *Python* en el robot humanoide. Se propuso una posición objetivo del ZMP en $p_x^{ref} = 0.02m$ respecto al referencial de la IMU del robot. El experimento consistió en llevar el ZMP del robot por medio de la inclinación del torso a la consigna mencionada anteriormente, para posteriormente, aplicar una fuerza relativamente constante empujando al robot durante 2 segundos en el pecho como se muestra en la Fig. 5 a), al igual que en la espalda del robot también durante 2 segundos, tal como se ilustra en la Fig. 5 b), con el objetivo de perturbar la posición del ZMP y que el robot se mantenga de pie. Este experimento se ejecutó durante 20 segundos con el control DLQR y 20 segundos con el controlador ADRC propuesto.

En la Fig. 6 a) se presentan los resultados del experimento realizado con control DLQR, en donde se puede apreciar que el humanoide presentó oscilaciones posteriores a la perturbación frontal, además de presentar mayor número de oscilaciones y de mayor amplitud al aplicarse la perturbación trasera.

Asimismo, se puede observar la señal de perturbación detectada en la Fig. 6 b). En la Fig. 6 c) y d) se presentan los estados calculados y estimados tanto de posición como velocidad respectivamente, en donde se aprecia que el observador propuesto funciona correctamente para la estimación de posición.

En la Fig. 7 a) se presenta el comportamiento del ZMP con control ADRC, en donde se observan menor cantidad de oscilaciones y de menor magnitud para ambas perturbaciones, mismas que se ilustran en la Fig. 7 b). En la Fig. 7 c) se ilustra el observador funcionando correctamente para la estimación de posición.

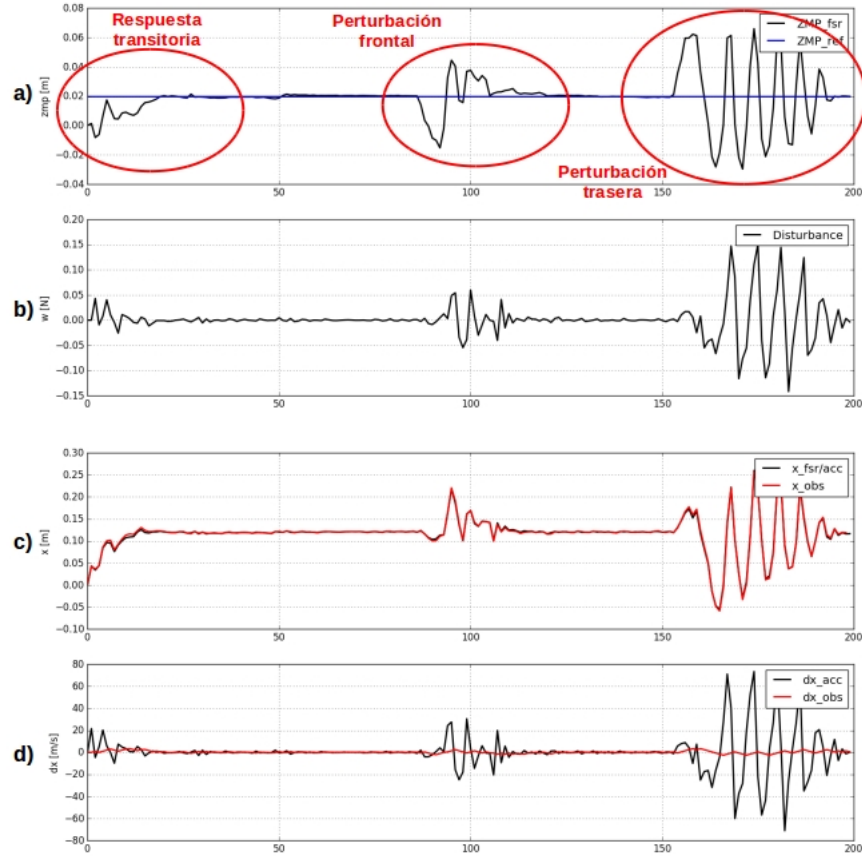


Fig. 6. Resultados con control DLQR. a) Control del ZMP. b) Perturbación detectada $w(k)$. c) Posiciones $x(k)$ medida y estimada. d) Velocidades $x(k+1)$ medida y estimada.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó un controlador en tiempo discreto para el equilibrio de robots humanoides utilizando la técnica ADRC. Este controlador es capaz de detectar las perturbaciones a las que está sometido un sistema en línea y de corregirlas gracias a un observador de estado extendido.

Dicha estrategia de control se diseñó utilizando el modelo carro-mesa de robots humanoides con el objetivo de regular la posición del ZMP y así garantizar el equilibrio del robot aún en presencia de perturbaciones. El controlador propuesto se implementó en un robot humanoide Nao programado en lenguaje *Python* y se comparó su desempeño con un regulador cuadrático lineal, mostrando mejores

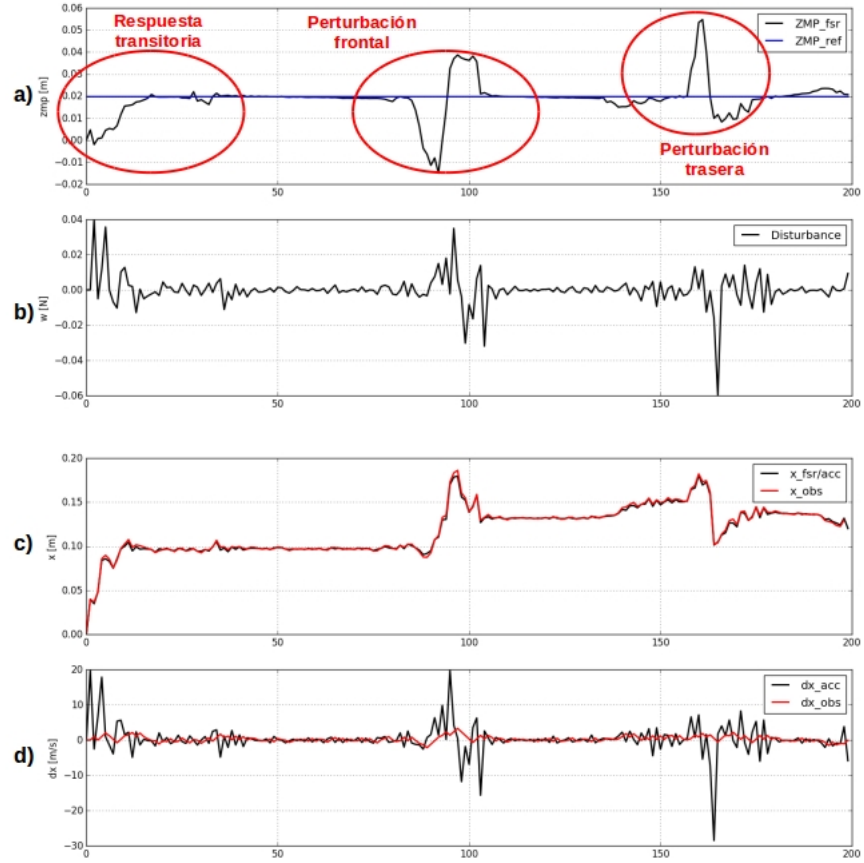


Fig. 7. Resultados con control DLQR. a) Control del ZMP. b) Perturbación detectada $w(k)$. c) Posiciones $x(k)$ medida y estimada. d) Velocidades $x(k+1)$ medida y estimada.

resultados el ADRC debido a que el robot oscila en menor cantidad y con menor magnitud ante las perturbaciones gracias a que el observador de estado detecta las perturbaciones y suministra la energía adecuada para corregirlas.

Estos resultados satisfactorios de la implementación del control ADRC para el equilibrio de robots humanoides motivan a su implementación para el caminado del robots Nao, así como para su uso en otros humanoides instrumentados adecuadamente.

Referencias

1. Orozco-Soto, S. M., Núñez-Cruz, R. S., Ibarra-Zannatha, J. M.: Active disturbance rejection control for humanoid stable walking. In: 13th IEEE International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, pp. 1–6, IEEE Press, Ciudad de México (2016)
2. Nakaura, S., Sampei, M.: Balance control analysis of humanoid robot based on ZMP feedback control. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3 pp. 2437–2442, IEEE Press, Suiza (2002)
3. Stephens, B.: Integral control of humanoid balance. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4020–4027, IEEE Press, San Diego (2007)
4. Lee, S. H., Goswami, A.: Ground reaction force control at each foot: A momentum-based humanoid balance controller for non-level and non-stationary ground. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3157–3162, IEEE Press, Taipei (2010)
5. Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K., Yokoi, K.: Introduction to humanoid robotics. Springer, Heidelberg (2014)
6. Hyong, S., Cheng, G.: Disturbance rejection for biped humanoids. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2668–2675, IEEE Press, Roma (2007)
7. Alcaraz-Jiménez, J. J., Missura, M., Martínez-Barberá, H., Behnke, S.: Lateral disturbance rejection for the Nao robot. In: RoboCup 2012: Robot Soccer World Cup XVI, 1–12, Springer, Heidelberg (2012)
8. Orozco Soto, S.M., Ibarra Zannatha, J.M.: Control con rechazo activo de perturbaciones para el caminado estable de humanoides basado en el pndulo invertido lineal. En: XVIII Congreso Mexicano de Robótica, pp. 1–6, Asociación Mexicana de Robótica e Industria, Mazatlán (2016)
9. Huang, Y., Xue, W.: Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis. ISA Transactions 53(4), 963–976 (2014)
10. Zheng, Q., Gao, Z.: On practical applications of active disturbance rejection control. In: IEEE 29th Chinese Control Conference, pp. 6095–6100, Beijing (2010)
11. Dallali, H., Brown, M., and Vanderborght, B.: Using the torso to compensate for non-minimum phase behaviour in ZMP bipedal walking. In: Advances in Robotics Research, pp. 191–202, Springer, Heidelberg (2009)
12. NAO Software 1.14.5 documentation <http://doc.aldebaran.com/1-14/contents.html>

Comparación experimental de controladores PID clásico, PID no lineal y PID difuso para el caso de regulación

Luis Fidel Cerecero Natale^{1,3,4}, Eduardo Campos Mercado^{2,3},
Julio Cesar Ramos Fernández³, Marco Antonio Marqués Vera³, Irvin Arlin Chan Ac⁴

¹Instituto Tecnológico de Cancún, Cancún, Quintana Roo,
México

²CONACYT-UNISTMO, Tehuantepec, Oaxaca,
México

³Universidad Politécnica de Pachuca, Zempoala, Hidalgo,
México

⁴Universidad Tecnológica de la Riviera Maya, Quintana Roo,
México

lcerecero@itcancun.edu.mx, ecampos@conacyt.mx,
jramos@upp.edu.mx, marquez@upp.edu.mx, irvin.chan@utrivieramaya.edu.mx

Resumen. Este artículo presenta los resultados experimentales al comparar los Controladores PID Clásico, PID No Lineal y PID Difuso de Ganancias Programables usados en controladores de posición. Para la sintonización del PID clásico fue usado el segundo método de Ziegler-Nichols, el PID No Lineal fue diseñado basado en funciones de saturación con parámetros variables y el PID Difuso de Ganancias Programables fue propuesto por experiencia para minimizar el sobreimpulso. La serie de experimentos realizados mostraron que el PID Clásico presenta inestabilidad en los cambios de referencia abruptos, debido a esto se implementó el PID No Lineal con el que se logran seguir todas las referencias, presentando ligero sobreimpulso en las regiones que el control clásico se vuelve inestable, finalmente al implementar el PID Difuso se logró seguir todas las referencias sin presentar sobreimpulso y consumiendo menor cantidad de energía.

Palabras clave: control PID, difuso, control de posición.

Experimental Comparison of Classical PID, Nonlinear PID and Fuzzy PID Controllers for the Case of Set-point Regulation

Abstract. This article presents the experimental results when comparing the Controllers PID Classic, Nonlinear PID and Fuzzy Gain Scheduling PID used in position controllers, for the tuning of the Classical PID was used the second method

of Ziegler-Nichols, the Nonlinear PID was designed based on saturation functions with variable parameters and the Fuzzy Gain Scheduling PID was Proposed by experience to minimize overshoot. The series of experiments conducted show that the Classic PID presents instability in the abrupt changes of the setpoint, due to this the non-linear PID is implemented with which they are achieved follow all the references, presenting light on impulse in the regions that the classic controller becomes unstable, finally when implementing the Fuzzy PID are managed to follow all the references without overshoot and consuming less amount of energy.

Keywords: PID control, fuzzy, position control.

1. Introducción

En este artículo se presenta un control de posición para un Motor de Corriente Directa de Imán Permanente (MCDIP) es un dispositivo electromecánico que convierte la energía eléctrica e corriente directa en energía mecánica. El primer MCDIP funcional y comercial fue inventado por Zenobe Grame en 1873. Dado que son confiables y operan en distintas potencias desde fracciones de Watt hasta Kilowatts, son usados en varios campos como el automotriz, aeroespacial, robótica, ingeniería biomédica, ingeniería pesada entre otras.

Diversas técnicas de control han sido propuestas para el MCDIP. Es un sistema no lineal, por lo tanto el tradicional controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) sólo permite controlar sistemas que operan en áreas restringidas [7]. La plataforma experimental es un sistema de posicionamiento angular, donde se usa el control PID Clásico. El objetivo del control PID es mantener una posición de referencia a un valor asignado y ser capaz de aceptar de manera dinámica nuevos valores de referencia. Los controles de posición modernos requieren que los controladores sean capaces de hacer frente a variaciones de parámetros e incertidumbres del sistema [11].

La técnica de sintonización de Ziegler-Nichols es ampliamente conocida, como un método heurístico bastante exacto para determinar buenas configuraciones de controladores PI y PID para una amplia gama de procesos industriales comunes. Aunque los controladores PD generalmente no se recomiendan para procesos de carga cero, ya que suelen presentar grandes errores en estado estacionario. Los controladores convencionales no pueden dar buenos resultados para los procesos de carga cero, incluso el controlador PID sintonizado con Ziegler-Nichols no proporciona un rendimiento satisfactorio durante ese tiempo [12]. En tal situación el Controlador PID No Lineal puede mostrar un mejor rendimiento. Sin embargo, se vuelve más complejo para determinar los parámetros tradicionales del PID, no la eficiencia para el control del sistema.

Así que por esta razón, el Controlador PID No Lineal se calcula donde los parámetros dependen de la cantidad de error del sistema. El combinar el controlador clásico más el controlador no lineal, puede proporcionar grados de libertad adicionales para lograr un mejor rendimiento del sistema [1,2,5,9]. Las características de cambio de las funciones no lineales coinciden con el proceso de cambio ideal de los parámetros del control PID No Lineal, logrando buenos resultados de manera estática o dinámica y mejorando la calidad de control [8,3].

El artículo presente está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe brevemente la plataforma de experimentación y el modelo dinámico del MCDIP. La sintonización y experimentos del Controlador PID Clásico se presenta en la sección 3. El diseño y desempeño del Controlador PID No Lineal se describe en la sección 4. La estructura de reglas y pruebas del Controlador PID Difuso de Ganancias Programables se describen en la sección 5. Los resultados experimentales y conclusiones se discuten en la sección 6.

2. Plataforma de experimentación

La plataforma de experimentación es realmente importante, dado que se pueden evaluar los resultados teóricos. Actualmente existen varias opciones para adquirir plataformas experimentales para uso académico, utilizadas para probar diversas técnicas de control, el principal problema de estas son el alto costo y la arquitectura cerrada. En consecuencia fue desarrollada la plataforma de experimentación que se muestra en la Figura 1, donde se observa el diagrama de bloques de los dispositivos que la componen. La principal ventaja de la plataforma experimental es su bajo costo y su arquitectura abierta, ya que está basada en la tarjeta Arduino DUE, la que se encarga de enviar las señales al manejador de potencia tipo puente H L298N, un MCDIP con encoder para obtener la posición angular y una computadora.

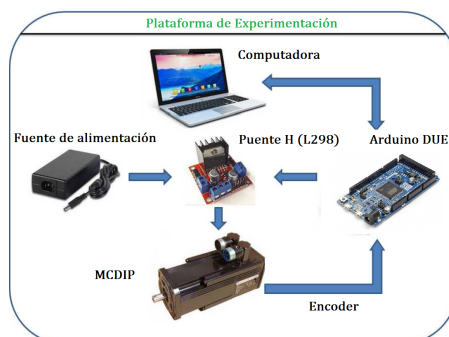


Fig. 1: Componentes de la plataforma de experimentación.

La computadora portátil es usada para programar el Arduino DUE y para graficar los resultados experimentales, con el propósito de observar el comportamiento del sistema. La tarjeta Arduino DUE es usada para leer los pulsos del sensor de posición, basado en un encoder óptico de 256 pulsos por revolución, procesar la estrategia de control usando un cristal oscilador de 84 MHz y generar las señales moduladas en ancho de pulso (PWM) con una resolución de 12 bits, que a su vez polarizan al manejador de potencia tipo puente H modelo L298N. El MCDIP es de la marca PITTMAN, opera a 24V y cuenta con el encoder óptico.

Una plataforma muy similar para probar estrategias de control se muestra en [15], donde se logra implementar un controlador difuso para regular la velocidad de un MCDIP basado en la tarjeta electrónica Arduino DUE. Ahora, el modelo matemático de un MCDIP se puede escribir de la siguiente manera:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = U, \quad (1)$$

donde U es el par torsional generado por la entrada de control, J representa el momento polar de inercia, B es el coeficiente de fricción viscosa, $\dot{\theta}$ y $\ddot{\theta}$ son la velocidad y aceleración angular respectivamente.

De la ecuación (1) se puede obtener la función de transferencia que relaciona la posición angular sobre la entrada de control, esto es:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js^2 + Bs}, \quad (2)$$

Es importante darse cuenta que J y B son parámetros del MCDIP, que pueden ser identificados para usar una estrategia de control basada en el modelo matemático; pero en este artículo el interés se centra en trabajar con el modelo libre para establecer una estrategia de control.

El principal objetivo de los experimentos, es evaluar el comportamiento del sistema en lazo cerrado, es de suma importancia comentar que cada experimento tiene una duración de 15 segundos. Para evaluar el desempeño de los Controladores PID Clásico, PID No Lineal y el PID Difuso de Ganancias Programables, se establecen cambios en la referencia angular deseada θ_d en función del tiempo, cada 3 segundos como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\theta_d(t) = \begin{cases} 20^\circ & \text{si } t \leq 3, \\ 0^\circ & \text{si } 3 < t \leq 6, \\ 90^\circ & \text{si } 6 < t \leq 9, \\ -60^\circ & \text{si } 9 < t \leq 12, \\ 200^\circ & \text{si } 12 < t \leq 15. \end{cases} \quad (3)$$

3. Controlador PID clásico

La técnica usada para sintonizar el controlador PID Clásico (PID-C), es el segundo método de Ziegler-Nichols [13]. Para este método es necesario usar un controlador proporcional y encontrar el valor de la ganancia que genere oscilaciones sostenidas en el sistema. Las ganancias k_p , k_i y k_d son determinadas usando las ecuaciones (4), (5) y (6), que están en función de la ganancia crítica de oscilación $K_{cr} = 100$ y el periodo crítico $P_{cr} = 0.11s$, obtenidos por $\theta_d = 0$, esto es:

$$k_p = 0.6 \cdot K_{cr}, \quad (4)$$

$$t_i = 0.5 \cdot P_{cr}, \quad k_i = k_p / t_i, \quad (5)$$

$$t_d = 0.125 \cdot P_{cr}, \quad k_d = k_p \cdot t_d. \quad (6)$$

Los valores usados en el sistema de control en lazo cerrado son $k_p = 60$ $k_i = 1090.9$ y $k_d = 0.8250$. El resultado experimental del sistema de control en lazo cerrado se muestra en la Figura 2, donde se utiliza el Controlador PID-C, por otra parte en la Figura 3 se muestra la señal de control u . Es de suma importancia hacer notar que el sistema presenta inestabilidad. Dado que la oscilación del sistema es muy grande no se logra apreciar el seguimiento de las referencias de posición, para esto se realizó un corte de la gráfica en los primeros 9 segundos del experimento, con lo que se puede apreciar la respuesta en regulación de posición de las primeras 3 referencias usando el Controlador PID-C, como se muestra en la Figura 4 y en la Figura 5 se puede ver el comportamiento de la variable de control u . De lo que se puede concluir que las últimas dos θ_d están fuera de la zona de operación de la caracterización realizada para el Controlador PID-C. La manera en la que se realiza la derivada del error, es por medio del Filtro *Alpha-Beta* mostrado [10] sin utilizar el término *Gamma*, donde se pueden usar los parámetros unitarios y equivale al método de derivación de Euler.

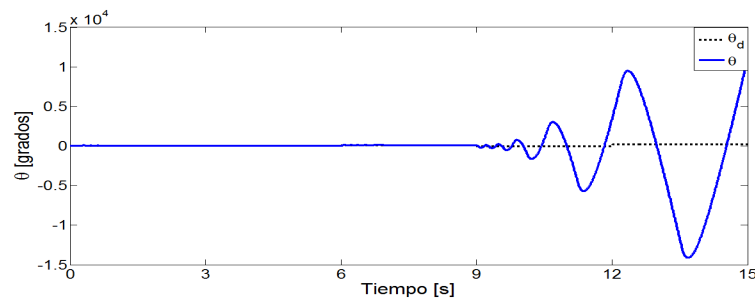


Fig. 2: Respuesta en regulación de posición, comportamiento inestable.

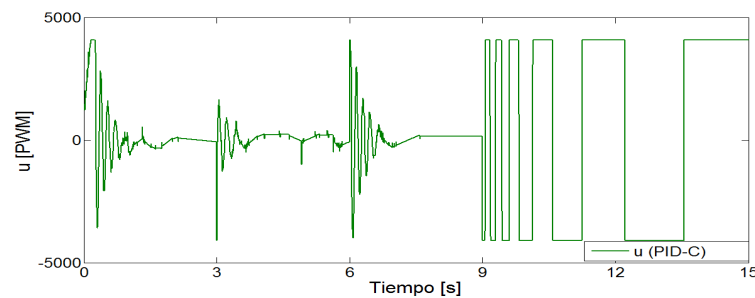


Fig. 3: Respuesta de la variable de control u , comportamiento inestable.

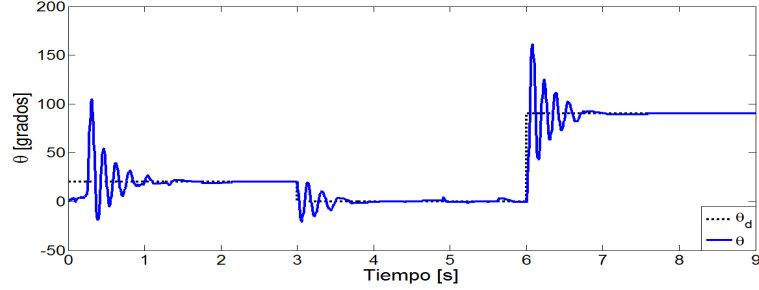


Fig. 4: Respuesta en regulación de posición, comportamiento inestable (9 segundos).

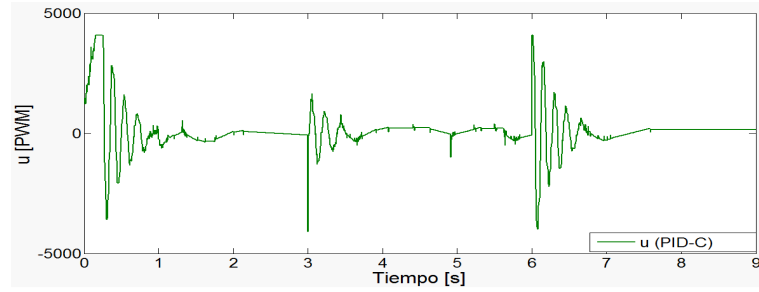


Fig. 5: Respuesta de la variable de control u , comportamiento inestable (9 segundos).

4. Controlador PID no lineal

En esta sección se presenta, un Controlador PID No Lineal (PID-NL) basado en funciones de saturación con parámetros variables, que es propuesto para regular la posición angular del MCDIP. Las funciones de saturación propuestas que son usadas para el controlador, son definidas por el conjunto de ecuaciones (7).

$$\sigma_{\bar{b}}(\varphi) = \begin{cases} \bar{b} & \text{si } \varphi > \bar{b}, \\ \varphi & \text{si } |\varphi| \leq \bar{b}, \\ -\bar{b} & \text{si } \varphi < -\bar{b}, \end{cases} \quad (7)$$

donde $\bar{b}$ es una constante positiva y φ representa una función. En este caso, los términos a los que la saturación debe ser aplicada, son el error y su primera derivada respecto al tiempo.

Entonces, si se introduce la función de saturación dentro del Controlador PID-C se obtiene el Controlador PID-NL que se representa en la ecuación (8).

$$U_{PID-NL} = \sigma_{\bar{b}_p}(k_p e(t)) + \sigma_{\bar{b}_d}(k_d \frac{de(t)}{dt}) + \sigma_{\bar{b}_I}(k_I \int_0^t e(\tau) d\tau), \quad (8)$$

donde $k_p, k_d, k_I \in \mathbb{R}$ son definidos positivos, $e(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ representa el error.

La ecuación (8) puede ser reescrita en su manera compacta usando la ecuación (9).

$$U_{PID-NL} = \sum_{i=1}^3 u_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

donde $u_i = \sigma_{\bar{b}_i}(k_i h_i)$ representa la función de saturación, con $\bar{b}_1 = \bar{b}_p$, $\bar{b}_2 = \bar{b}_d$, $\bar{b}_3 = \bar{b}_I$, $k_1 = k_p$, $k_2 = k_d$, $k_3 = k_I$; $h_1 = e(t)$, $h_2 = \frac{de(t)}{dt}$ y $h_3 = \int_0^t e(\tau) d\tau$. Entonces, para la ecuación (7) u_i puede ser reescrita como:

$$u_i = \begin{cases} \bar{b}_i & \text{si } k_i h_i > \bar{b}_i, \\ k_i h_i & \text{si } |k_i h_i| \leq \bar{b}_i, \\ -\bar{b}_i & \text{si } k_i h_i < -\bar{b}_i. \end{cases} \quad (10)$$

De la ecuación (10) se puede notar que:

$$|k_i h_i| \leq \bar{b}_i, \quad (11)$$

puede ser reescrita como: $|h_i| \leq \bar{b}_i/k_i$. En ese momento, se define:

$$d_i := \bar{b}_i/k_i. \quad (12)$$

En consecuencia se puede reescribir la ecuación (10) en términos de d_i , como se muestra a continuación:

$$u_i = \begin{cases} \bar{b}_i & \text{si } h_i > d_i, \\ k_i h_i & \text{si } |h_i| \leq d_i, \\ -\bar{b}_i & \text{si } h_i < -d_i. \end{cases} \quad (13)$$

Ahora, la ecuación (13) puede ser simplificada como:

$$u_i = \begin{cases} \text{sign}(h_i) \bar{b}_i & \text{si } |h_i| > d_i, \\ \bar{b}_i d_i^{-1} h_i & \text{si } |h_i| \leq d_i. \end{cases} \quad (14)$$

y se puede observar que con esta representación los parámetros de sintonización del controlador son b_i y d_i , $\forall i = 1, 2$. Además, tomando en consideración:

$$\text{sign}(h_i) \bar{b}_i = h_i \text{sign}(h_i) \bar{b}_i h_i^{-1}, \quad (15)$$

que puede simplificarse como:

$$\text{sign}(h_i) \bar{b}_i = |h_i| \bar{b}_i h_i^{-1}, \quad (16)$$

y se tiene que $|h_i| h_i^{-1} = |h_i|^{-1} h_i$, entonces la ecuación (14) puede ser reescrita como:

$$u_i = \begin{cases} \bar{b}_i |h_i|^{-1} h_i & \text{si } |h_i| > d_i, \\ \bar{b}_i d_i^{-1} h_i & \text{si } |h_i| \leq d_i. \end{cases} \quad (17)$$

Consecuentemente, la ley de control (9) puede ser expresada como:

$$U_{PID-NL} = u_1 + u_2 + u_3, \quad (18)$$

entonces

$$U_{PID-NL} = k_p(\cdot)e(t) + k_d(\cdot)\frac{de(t)}{dt} + k_I(\cdot)\int_0^t e(\tau)d\tau, \quad (19)$$

con:

$$k_p(\cdot) = \begin{cases} \bar{b}_p|e(t)|^{-1} & si \quad |e(t)| > d_p, \\ \bar{b}_p d_p^{-1} & si \quad |e(t)| \leq d_p, \end{cases} \quad (20)$$

$$k_d(\cdot) = \begin{cases} \bar{b}_d\left|\frac{de(t)}{dt}\right|^{-1} & si \quad \left|\frac{de(t)}{dt}\right| > d_d, \\ \bar{b}_d d_d^{-1} & si \quad \left|\frac{de(t)}{dt}\right| \leq d_d, \end{cases} \quad (21)$$

$$k_I(\cdot) = \begin{cases} \bar{b}_I\left|\int_0^t e(\tau)d\tau\right|^{-1} & si \quad \left|\int_0^t e(\tau)d\tau\right| > d_I, \\ \bar{b}_I d_I^{-1} & si \quad \left|\int_0^t e(\tau)d\tau\right| \leq d_I. \end{cases} \quad (22)$$

La ventaja de esta formulación es que el par torsional es limitado por los parámetros $\bar{b}_p$, $\bar{b}_d$ y $\bar{b}_I$. Por lo tanto, se asegura la limitación de la entrada de control. Sin embargo, en algunos casos se puede requerir un par torsional ligeramente mayor para corregir los errores del sistema, es por eso que se propone el valor de saturación $\bar{b}_i$ de la ecuación (17) puede cambiar a:

$$\bar{b}_i = b_i|h_i|^{\mu_i} \quad si, \quad |h_i| > d_i, \quad (23)$$

y

$$\bar{b}_i = b_i|d_i|^{\mu_i} \quad si \quad |h_i| \leq d_i, \quad (24)$$

con b_i una constante positiva y $\mu_i \in [0, 1]$.

Ahora, introduciendo las ecuaciones (23) y (24) dentro de (17), se obtiene:

$$u_i = \begin{cases} b_i|h_i|^{\mu_i}|h_i|^{-1}h_i & si \quad |h_i| > d_i, \\ b_i|d_i|^{\mu_i}d_i^{-1}h_i & si \quad |h_i| \leq d_i, \end{cases} \quad (25)$$

$$\forall i = 1, 2, 3 \text{ y } \mu_i \in [0, 1].$$

Los gráficos de la función para diferentes parámetros de μ_i se muestran en la Figura 6.

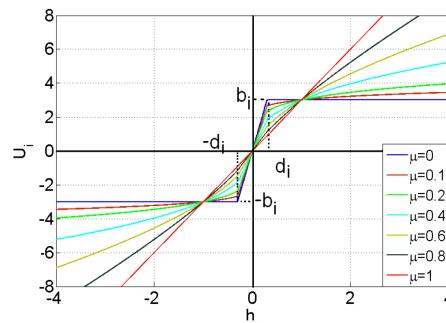


Fig. 6: Función de saturación con diferentes valores del parámetro μ .

Consecuentemente, la ley de control PID-NL basado en funciones de saturación con parámetros variables puede ser expresado como:

$$U_{PID-NL} = k_p(\cdot)e(t) + k_d(\cdot)\frac{de(t)}{dt} + k_I(\cdot)\int_0^t e(\tau)d\tau, \quad (26)$$

con:

$$k_p(\cdot) = \begin{cases} b_p|e(t)|^{(\mu_p-1)} & si \quad |e(t)| > d_p, \\ b_p d_p^{(\mu_p-1)} & si \quad |e(t)| \leq d_p, \end{cases} \quad (27)$$

$$k_d(\cdot) = \begin{cases} b_d|\frac{de(t)}{dt}|^{(\mu_d-1)} & si \quad |\frac{de(t)}{dt}| > d_d, \\ b_d d_d^{(\mu_d-1)} & si \quad |\frac{de(t)}{dt}| \leq d_d, \end{cases} \quad (28)$$

$$k_I(\cdot) = \begin{cases} b_I|\int_0^t e(\tau)d\tau|^{(\mu_I-1)} & si \quad |\int_0^t e(\tau)d\tau| > d_I, \\ b_I d_I^{(\mu_I-1)} & si \quad |\int_0^t e(\tau)d\tau| \leq d_I, \end{cases} \quad (29)$$

$$\forall \mu_p, \mu_d, \mu_I \in [0, 1].$$

De la Figura 6 se puede notar que, si $\mu_p = \mu_d = \mu_I = 1$, el Controlador PID-NL que está dado por la ecuación (26) se degenera el controlador PID lineal. Además, si $\mu_p = \mu_d = \mu_I = 0$, se obtiene el caso de una saturación constante. Para resumir, se puede concluir que el controlador PID lineal y el Controlador PID-NL con una función de saturación simple, definido por la ecuación (7), son casos particulares del controlador propuesto.

La sintonización del Controlador PID-NL fue determinado de manera experimental hasta que se logró un desempeño aceptable desde un punto de vista práctico, obteniendo los valores: $d_p = 0.8$, $\mu_p = 0.1$, $b_p = 300$; $d_d = 3$, $\mu_d = 0.1$, $b_d = 4$; $d_I = 0.1$, $\mu_I = 0$, $b_I = 10$.

La Figura 7 muestra la respuesta de regulación del sistema de lazo cerrado usando el Controlador PID-NL propuesto, que viene dada por la ecuación (26). La Figura 8, es la respuesta en regulación de posición de la señal de control u del Controlador PID-NL. Cabe resaltar que el sistema se muestra estable durante todo el experimento a diferencia del Controlador PID-C, otra característica importante es la suavidad que presenta al adaptarse a los cambios de referencia abruptos.

5. Controlador PID difuso de ganancias programables

En esta sección se presenta, el Controlador PID Difuso de Ganancias Programables (PID-DGP) para regular la posición angular del MCDIP, la estructura es muy similar a la que se logró en [4], pero la principal diferencia es que las reglas fueron pensadas para regular posiciones de referencia constante ante variaciones en la carga y en el trabajo actual están diseñadas para regular la posición ante cambios abruptos de referencias variables. En los controladores de velocidad difuso adaptativo y autosintonizable de [6,16,14] presentan una estructura muy similar en cuanto a las variables utilizadas para entradas y salidas. Para la implementación de este controlador difuso se utiliza una estructura de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO) son definidas dos entradas:

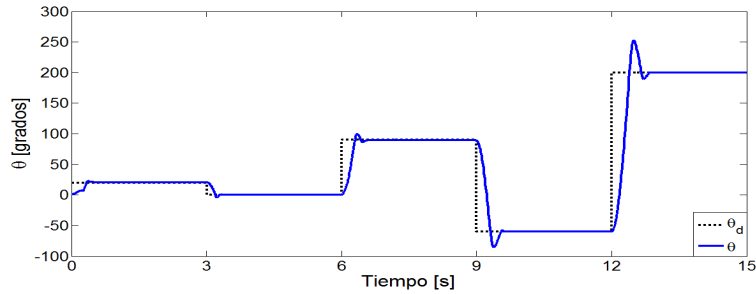


Fig. 7: Respuesta en regulación de posición.

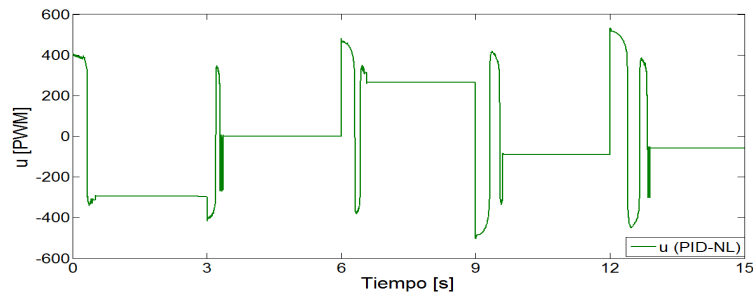


Fig. 8: Respuesta de la variable de control u .

el error e y su primera derivada respecto del tiempo $\dot{e}$; y tres salidas: las ganancias difusas proporcional K_{pF} , integral K_{iF} y derivativa K_{dF} . La Figura 9 representa el controlador PID-DGP, donde claramente se aprecia que las ganancias difusas afectan a las ganancias de un controlador PID-C, que para este caso en particular, las ganancias clásicas tienen asignados los valores $K_{pC} = 90$, $K_{iC} = 2$ y $K_{dC} = 3$, que fueron determinados de manera experimental de acuerdo al desempeño del sistema.

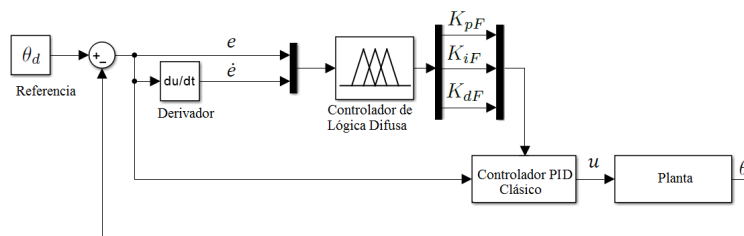


Fig. 9: Diagrama a bloques del sistema de control PID Difuso de Ganancias Programables.

Las entradas e y $\dot{e}$, son definidas por tres particiones difusas estáticas tipo Gaussianas, que son mostradas en la Figura 10, representa los valores de las funciones de pertenencia al instante dentro del ciclo de control. La estructura de reglas del controlador difuso se representan con la ecuación (30) el número de reglas por la ecuación (31) y el mecanismo de inferencia por la ecuación (32).

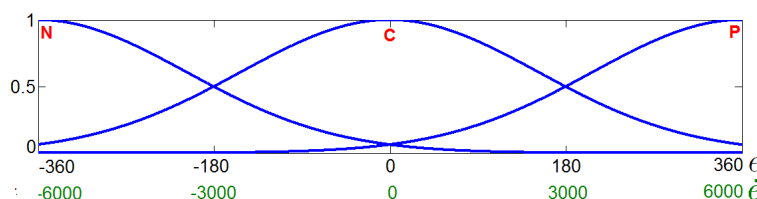


Fig. 10: Conjuntos difusos tipo Gaussianos para e y $\dot{e}$.

$$R_j : \text{si } e \text{ es } A_j \text{ y } \dot{e} \text{ es } B_j \text{ entonces } K_{pF(j)} = a_j \text{ y } K_{iF(j)} = b_j \text{ y } K_{dF(j)} = c_j, \quad (30)$$

$$R = \prod_{j=1}^n x_j, \quad (31)$$

$$\beta = (\mu_e \cdot \mu_{\dot{e}}). \quad (32)$$

En la Figura 11 se muestran las superficies de control no lineal para las ganancias K_{pF} , K_{iF} y K_{dF} , básicamente es la representación tridimensional de las 9 reglas planteadas.

En la Tabla 1 se muestran las 9 reglas del controlador de lógica difusa para las entradas e y $\dot{e}$ que corresponden a los valores constantes de los consecuentes lineales Singleton de orden cero, que se relacionan de manera directa con cada una de las ganancias, proporcional, integral y derivativa difusas que son acotadas K_{pF} , K_{iF} y $K_{dF} \in [0, 1]$.

La Figura 12 muestra la respuesta de regulación del sistema en lazo cerrado usando el Controlador PID-DGP, a diferencia del PID-NL aquí se logran seguir las referencias sin presentar sobreimpulso, sin importar que tan abrupto sea el cambio entre cada referencia asignada. La Figura 13, es la respuesta en regulación de posición de la señal de control u del Controlador PID-DGP, donde se puede ver un comportamiento muy suave, que claramente consume mucho menor cantidad de energía en comparación con los controladores PID-C y PID-NL. Por último en la Figura 14 se muestra la variación de las ganancias programables difusas, que se generan al realizar el producto de las ganancias del controlador difuso con las ganancias del controlador clásico, como se muestra en la ecuación (33) cabe mencionar que la actividad de estas se hace más pronunciada a medida que los cambios de referencia son más abruptos. Otra característica que se puede notar de manera evidente, es el minúsculo error en estado estacionario debido a la atenuación paulatina de la ganancia K_{iF} a medida que el error tiende a cero:

$$K_p = K_{pF} \cdot K_{pC} \quad K_i = K_{iF} \cdot K_{iC} \quad K_d = K_{dF} \cdot K_{dC}. \quad (33)$$

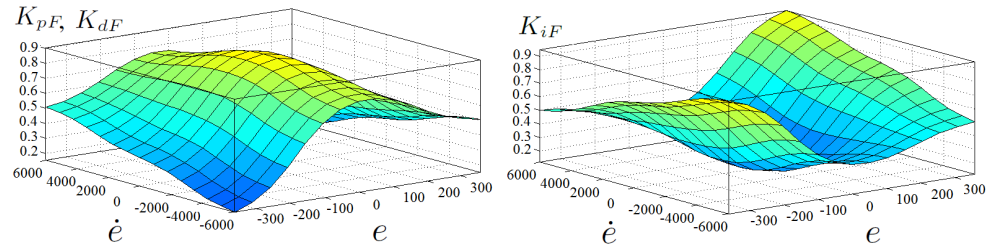


Fig. 11: Superficies de control no lineal para las ganancias difusas K_{pF} , K_{iF} y K_{dF} .

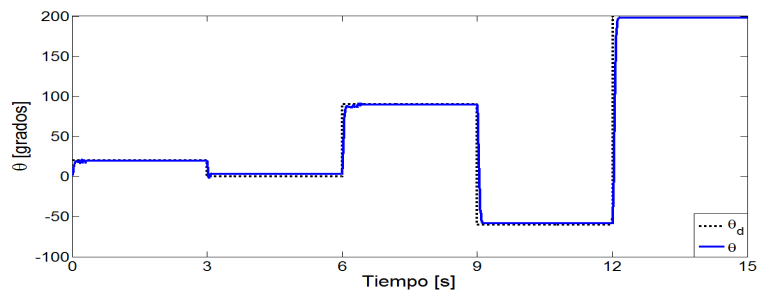


Fig. 12: Respuesta en regulación de posición.

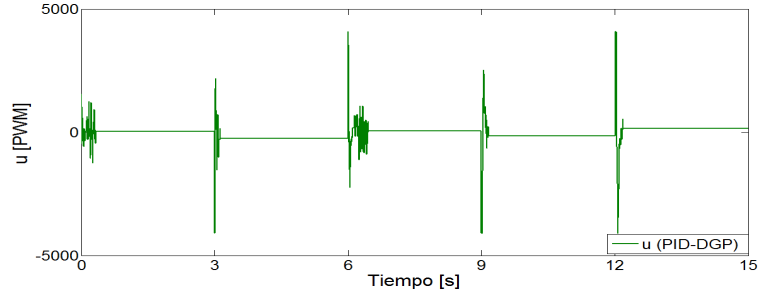


Fig. 13: Respuesta en regulación de posición de la variable de control u .

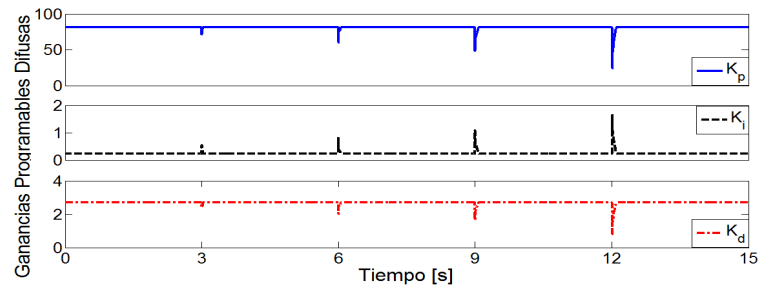


Fig. 14: Respuesta en regulación de posición (ganancias programables difusas K_p , K_i y K_d).

Tabla 1: Reglas difusas de sintonización para las ganancias K_{pF} , K_{iF} y K_{dF} .

e	$\dot{e}$	K_{pF}	K_{iF}	K_{dF}
N	N	0.1	1.0	0.1
N	C	0.3	0.8	0.3
N	P	0.5	0.5	0.5
C	N	0.8	0.3	0.8
C	C	1.0	0.0	1.0
C	P	0.8	0.3	0.8
P	N	0.5	0.5	0.5
P	C	0.3	0.8	0.3
P	P	0.1	1.0	0.1

6. Resultados experimentales

Para evaluar el desempeño del sistema en lazo cerrado se calcula la integral del error absoluto (IAE), expresada mediante la ecuación (34):

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (34)$$

Una forma de conocer la energía consumida durante los experimentos es calculando la integral del valor absoluto de la entrada de control (E), como se muestra en la ecuación (35):

$$E = \int_0^t |U(\tau)| d\tau. \quad (35)$$

En la Tabla 2 se muestra la comparación de la respuesta de los controladores para el caso de regulación de posición, la última columna (S/s) representa la cantidad de muestras por segundo de cada controlador. Cabe mencionar que para lograr una comparación precisa fue necesario utilizar la herramienta *timeseries* de *MATLAB*, dado que la cantidad de muestras por segundo difiere en cada controlador y por ende el número de datos del vector.

Tabla 2: Comparación de la respuesta de los controladores para el caso de regulación.

Controlador	IAE	E	S/s
PID-C	6943300	7667500	187
PID-NL	38810	793580	241
PID-DGP	12544	769100	203

7. Conclusiones

Con los resultados experimentales se logró realizar el estudio comparativo de las estrategias de control propuestas, evaluando principalmente tres aspectos: el error absoluto acumulado, el consumo total de energía y el número de muestras por segundo. El controlador PID-DGP presentó un mejor desempeño con respecto al control PID-NL en los primeros dos aspectos y es más lento en velocidad de procesamiento, como resultado final de este análisis experimental, se observó que al agregar ganancias variables a la estructura del control PID, se obtuvo una mejora significativa del sistema en lazo cerrado.

En otras palabras, al introducir ganancias variables al controlador PID, se obtuvo un controlador robusto ante cambios en el puntos de operación, pero al utilizar ganancias programables difusas el desempeño resulta ser mucho mejor. Como trabajo futuro se va a realizar una comparación experimental con los mismos controladores, para el caso de seguimiento de trayectoria. Adicionalmente se pretende incluir un sensor de corriente para calcular el par torsional del MCDIP y estimar la potencia eléctrica consumida en cada experimento.

Referencias

1. Armstrong, B., Neevel, D., Kusik, T.: New results in npid control: tracking, integral control, friction compensation and experimental results. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 9, 399–406 (2001)
2. Armstrong, B., Wade, B.: Nonlinear pid control with partial state knowledge: damping without derivatives. *Int. J. Robotics Research* 19, 715–731 (2000)
3. Aydogdu, O., Korkmaz, M.: A simple approach to design of variable parameter nonlinear pid controller. In: *International Conference on Electrical Engineering and Applications*, Chennai, India. pp. 81–85 (2011)
4. Cerecero-Natale, L.F., Ramos-Fernández, J.C., Marquéz-Vera, M., Campos-Mercado, E.: Control pi difuso de ganancias programables para un sistema mecatrónico de posicionamiento angular-lineal. *Research in Computing Science* 116, 157–169 (2016)
5. Chen, W., abd P.J. Gawthrop, D.B., Gribble, J., O'Reilly, J.: Nonlinear pid predictive controller. *IEEE Proc. Control Theory Appl.* 146, 603–611 (1999)
6. El-samahy, A.A., Shamseldin, M.A.: Brushless dc motor tracking control using self-tuning fuzzy pid control and model reference adaptive control. *Ain Shams Engineering Journal* (2016)
7. Graffin, I.: On-line PID controller tuning using Genetic Algorithms. *DCU* (2003)
8. Gu, J., Zhang, Y., Gao, D.: Application of nonlinear pid controller in main steam temperature control. In: *Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China. pp. 1–5 (2009)
9. Han, J.: Nonlinear pid controller. *Acta Automatica Sinica* 20, 487–490 (1994)
10. Khin, H.N., Che, F.Y., Eileen Lee, M.S., Liang, X.W.: Alpha beta gamma filter for cascaded pid motor position control. *Engineering Procedia* 41, 244–250 (2012)
11. Lin, P., Hwang, S., Chou, J.: Comparison on fuzzy logic and pid controls for a dc motor position controller. *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE* 3, 1930–1935 (1994)
12. Vasu, N., Srinivasulu, G.: Comparative study of fuzzy pd controller and conventional controllers. *Intelligent Agent and Multi-Agent Systems, IAMA*, July pp. 22–24 (2009)

13. Visioli, A.: Optimal tuning of pid controllers for integral and unstable processes. *Proceedings of the IEEE, Part D* 148(2), 180–194 (2001)
14. Ying, W., Hang, J., Min, Z.: The research on fuzzy pid control of the permanent magnet linear synchronous motor. *Physics Procedia* 24, 1311–1318 (2012)
15. Zaki, A.M., El-Bardini, Mohammad, S.F.S.M.M.: Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for dc motor speed control. *Ain Shams Engineering Journal* (2015)
16. Zhen-Yu, Z., Masayoshi, T., Satoru, I.: Fuzzy gain scheduling of pid controllers. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 23, 1392–1398 (1993)

Desempeño de un regulador-estabilizador neurodifuso en un sistema multimáquinas

Jacob Efrain Diaz Lavariega, David Romero Romero

Instituto Politécnico Nacional,
Ciudad de México, México

jediazl@ipn.mx, dromero@ipn.mx

Resumen. En este trabajo se aplica un sistema de control neurodifuso a un sistema de potencia multimáquinas que durante su operación puede ocasionar un colapso de voltaje u oscilaciones electromecánicas, locales o interárea y que puede generar la pérdida del servicio eléctrico hacia un mercado eléctrico cada vez más demandante. El regulador automático de voltaje mantiene el voltaje terminal del generador en un valor estable durante diferentes tipos de eventos (cambios de carga y estado transitorio); el estabilizador de potencia genera una señal para amortiguar las oscilaciones electromecánicas generadas por los cambios en el sistema. El control neurodifuso propuesto cumple con estas dos funciones y se obtiene mediante un entrenamiento fuera de línea de una red neurodifusa basada en la Teoría de Resonancia Adaptable (ART, por sus siglas en inglés). Al concluirse el entrenamiento de esta red neurodifusa, se obtienen los elementos de un control difuso convencional: funciones de membresía, base de reglas y sintonización óptima de la funciones de membresía. El control se instala en uno de los generadores del sistema de potencia interconectado, en sustitución del sistema de excitación convencional tipo ST1A IEEE, el cual está conformado por el regulador automático de voltaje y el estabilizador de potencia. Durante las pruebas, el control neurodifuso diseñado mejora el desempeño global del sistema de potencia durante condiciones de cambio de carga y fallas trifásicas en el sistema, la pruebas muestran un mejor desempeño del sistema cuando uno de los generadores opera con este tipo de control.

Palabras clave: Sistemas de potencia multimáquinas, Estabilidad transitoria, Control difuso, Sistemas neurodifusos, Regulador automático de voltaje, Estabilizador de sistemas de potencia.

Performance of a Neuro Fuzzy Excitation System in a Mutimachine Power System

Abstract. In this work the application of a neurofuzzy control system in a multimachine power system is presented. The neurofuzzy control is obtained by the off-line training of a fuzzy neural network based on

Adaptive Resonance Theory (ART). Once the training is concluded, the control elements such as: membership functions, rules base and membership functions optimal tuning are obtained. The neurofuzzy control is installed in one of the generators connected to the system in substitution of its conventional ST1A IEEE excitation system which is constituted by an automatic voltage regulator and by a power system stabilizer. During the operation of the test power system, the designed neurofuzzy control improves the power system performance during load increments and transients disturbs. The system stability is maintained in operation points in which a higher load is demanded from the system generators. When compared with a standard ST1A IEEE excitation system the designed control ART neurofuzzy system enhances the robustness and margins faults of the test power system.

Keywords: Multimachine power systems, Transient stability, Fuzzy control, Neurofuzzy systems, Automatic voltage regulator, Power system stabilizer.

1 Introducción

El sistema de excitación de un generador ha sido objeto de estudio al ser sustituido por redes neuronales que logran mejorar el comportamiento de sistemas de potencia multimáquinas durante diferentes condiciones de operación. Un sistema de excitación lo constituyen el regulador automático de voltaje (RAV) y estabilizador de potencia (ESP) y ambos sistemas, han sido sustituidos por controles difusos para mejorar la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia con generadores interconectados [7,13,15]. El estabilizador de potencia, que es el medio para amortiguar las oscilaciones electromecánicas de un sistema eléctrico de potencia, también ha sido sustituido por sistemas neuronales artificiales para mejorar la estabilidad de sistemas de potencia interconectados [6, 16, 19, 20].

Los estabilizadores diseñados con sistemas neuronales, se denominan estabilizadores inteligentes, para diferenciarlo del estabilizador convencional. También, los estabilizadores se diseñan con sistemas de redes neurodifusas para dar como resultado estabilizadores inteligentes neurodifusos [18], estos estabilizadores inteligentes se insertan en los sistemas eléctricos de potencia multimáquinas para observar su comportamiento. Las redes neurodifusas unifican la teoría difusa y los sistemas de redes neuronales artificiales en sus algoritmos. Permiten obtener sistemas de control robustos que son de gran valor cuando se aplican a sistemas dinámicos que deben mantener la estabilidad durante disturbios severos. En [17] se realiza un estudio que sustituye el ESP con un sistema neuronal (Identificador y ESP neuronal) para mejorar la estabilidad del sistema de potencia estudiado. En este trabajo se presenta el comportamiento de un sistema de potencia multimáquinas que genera oscilaciones locales e interárea durante su operación. En este sistema, se ha sustituido el estabilizador (ESP) y regulador (RAV) convencionales por un sistema neurodifuso en uno de los generadores del sistema interconectado con el objetivo de lograr un mayor amortiguamiento

de las oscilaciones generadas durante disturbios de cambio de carga y una recuperación más rápida del voltaje terminal de todos los generadores durante eventos transitorios. Para lograr esto, se implementó el sistema de potencia multimáquinas en la herramienta digital de análisis de sistemas de potencia [5], la cual permite integrar segmentos de código del usuario dentro del programa principal. Los datos de este sistema se integran en el Apéndice A [9–11, 14]. Para el diseño del control, se entrena -fuera de línea- una red neurodifusa basada en la Teoría de Resonancia Adaptable [1–4] (ART, por sus siglas en inglés.); la cual proporciona las funciones de membresía, la base de reglas de decisión y la sintonización correcta de los parámetros del sistema de control difuso [12]. Basándose en algoritmos de la Teoría de Resonancia Adaptable, esta red neurodifusa particiona el espacio difuso y el ajusta de parámetros mediante el algoritmo de retropropagación del error [8]. Los beneficios de usar este sistema inteligente es minimizar el tiempo de entrenamiento y obtener, una vez finalizado el entrenamiento, los elementos de un control difuso convencional y que puede integrarse al control de un generador eléctrico el cual que forma parte de un sistema eléctrico interconectado. La mejoría del sistema eléctrico en general, puede comprobarse al verificar los índices de comportamiento del voltaje terminal de cada uno de los generadores. El amortiguamiento de las oscilaciones del sistema eléctrico pueden observarse en el comportamiento de la velocidad y de las potencias activas y reactivas. Los resultados de la pruebas indican que la integración de un estabilizador inteligente logra una mejoría global en todo el sistema con diferentes condiciones de operación.

En la sección II se presentan las ecuaciones y parámetros que gobiernan la red neurodifusa y la sección III muestra arquitectura fundamental de entrenamiento. La sección IV incluye una descripción del sistema de prueba mediante un diagrama unifilar. La sección V contiene aspectos generales de diseño del control inteligente desarrollado en este trabajo, como son: el tipo de entradas y salidas de la planta que se estudia, la cantidad y características de datos para el entrenamiento, también contiene la estructura final del control que se obtiene como resultado del entrenamiento fuera de línea. La sección VI presenta las pruebas realizadas al sistema eléctrico de potencia de prueba para verificar su desempeño cuando uno de los generadores del sistema opera con el control neurodifuso. La sección VII presenta las conclusiones del trabajo y el trabajo futuro.

2 Red de control de aprendizaje difuso basado en la teoría de resonancia adaptable (ART)

2.1 Regla de aprendizaje

La red se gobierna por una regla de aprendizaje supervisado. Para el entrenamiento son necesarios los pares de vectores $(\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{y}^{(1)}), (\mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{y}^{(2)}), \dots, (\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{y}^{(k)})$ que son las entradas $[\mathbf{x}(t)]$ y salidas $[\mathbf{y}(t)]$ del sistema actual. Cada par de vectores se presenta simultáneamente a la red, la cual para cada par de vectores

$(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ generará un error entre la salida actual de la red $\hat{y}^{(k)}$ y $y(t)$ la salida deseada. La señal de error se envía a la red y por medio de un algoritmo de retropropagación del error, se ajustan los pesos de la red para disminuir el error del mismo vector en la presentación siguiente. En este esquema de aprendizaje, se supone que se conoce con anticipación las salidas deseadas $\mathbf{y}(t)$ para cada vector de entrada $\mathbf{y}^{(k)}$.

2.2 Estructura

La Fig. 1 muestra los componentes de la red. Las capas son:

- *Capa 1*: Variables lingüísticas del espacio de entrada.
- *Capa 2*: Genera las funciones de membresía de entrada.
- *Capa 3*: Base de reglas de decisión y consecuencias.
- *Capa 4*: Genera las funciones de membresía de salida.
- *Capa 5*: Variables lingüísticas del espacio de salida.

Las flechas en la capa 5, operan en ambos sentidos durante la etapa de entrenamiento, y en la etapa de producción las señales fluyen solo en el sentido de las flechas oscuras.

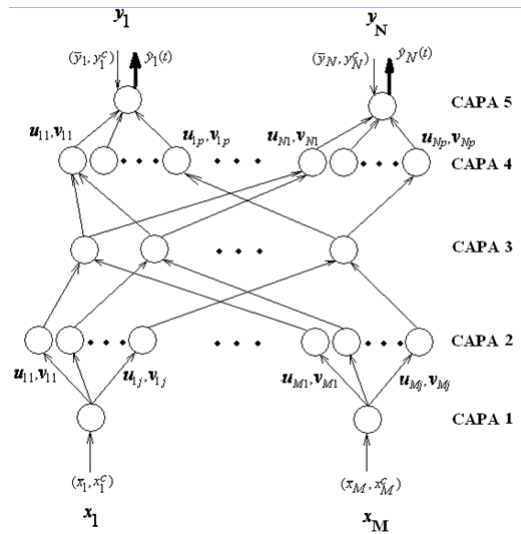


Fig. 1. Estructura general de la red.

2.3 Preprocesamiento de vectores

Los vectores de entrada, $\mathbf{x}(t)$ y $\mathbf{y}(t)$, se normalizan y complementan antes de ser clasificados. La normalización permite lograr una magnitud constante en estos vectores, esto es:

$$|\mathbf{x}| = \text{constante}, \quad |\mathbf{y}| = \text{constante}. \quad (1)$$

La complementación se obtiene tomando $\mathbf{x}(t)$ y $\mathbf{y}(t)$ como:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= (\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^c) = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_M, \bar{x}_c^1, \dots, \bar{x}_M^c), \\ \mathbf{y}' &= (\bar{\mathbf{y}}, \mathbf{y}^c) = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N, \bar{y}_c^1, \dots, \bar{y}_N^c), \end{aligned} \quad (2)$$

donde $\bar{\mathbf{x}}$ y $\bar{\mathbf{y}}$ son los vectores normalizados y M es la dimensión del vector $\mathbf{x}(t)$ y N es la dimensión del vector $\mathbf{y}(t)$. Los vectores complementados $\mathbf{x}^c$ y $\mathbf{y}^c$ son, respectivamente:

$$\begin{aligned} x_i^c &= 1.0 - \bar{x}_i, \\ y_i^c &= 1.0 - \bar{y}_i. \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 Funciones de activación

Las funciones de activación se definen como sigue: *Capa 1*: Envía a la capa 2 los valores de las variables lingüísticas:

$$a^{capa1} = (\bar{x}^i, 1.0 - \bar{x}^i) = (u_{ij}^{capa2}, v_{ij}^{capa2}). \quad (4)$$

Capa 2: Esta capa es una función de activación rampa:

$$a^{capa2} = [1.0 - g(\bar{x}_i - v_{ij}^{capa2}, \gamma) - g(u_{ij}^{capa2} - \bar{x}_i, \gamma)], \quad (5)$$

donde:

$$g(s, \gamma) = \begin{cases} 1, & \text{si } s\gamma > 1, \\ s\gamma, & \text{si } 0 \leq s\gamma \leq 1, \\ 0, & \text{si } s\gamma < 0, \end{cases} \quad (6)$$

y γ es parámetro de sensibilidad.

Capa 3: Esta capa verifica el cumplimiento de la precondiciones de las reglas difusas, y lo lleva a cabo realizando la operación producto:

$$a^{capa3} = \prod_{i=1}^n a^{capa2}. \quad (7)$$

Capa 4: Esta capa lleva a cabo la operación OR sobre las reglas activadas que tienen la misma consecuencia:

$$a^{capa4} = \max[a_1^{capa3}, a_2^{capa3}, \dots, a_p^{capa3}]. \quad (8)$$

Capa 5: En esta capa se salida se usan las funciones siguientes para realizar el método de centro de gravedad:

$$a_j^{capa5} = \frac{\sum_j m_{ij}^{(5)} a_j^{capa4}}{\sum_j a_j^{capa4}}, \quad (9)$$

donde $m_{ij} = [u_{ij}^{capa4} + (1.0 - v_{ij}^{capa4})]/2$.

Los términos u_{ij} y v_{ij} son los pesos de memoria de largo plazo y que se encuentran en las capa 2 y 4, y se ajustan en la etapa de aprendizaje, estos representan los valores que se muestran en la Fig. 2, que es una función de membresía trapezoidal.

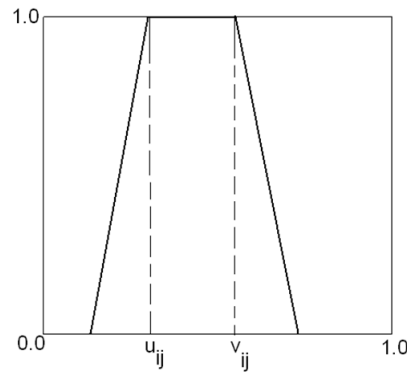


Fig. 2. Función de membresía trapezoidal en capas 2 y 4.

2.5 Aprendizaje ART de parámetros

El propósito del aprendizaje de los parámetros de la red es minimizar la función del error cuadrática, Ec. 10, donde $y(t)$ es la salida deseada, y $\hat{y}(t)$ es la salida actual de la red. El algoritmo de propagación del error hacia atrás se aplica a las funciones de activación de cada una de las capas:

$$E = \frac{1}{2}[y(t) - \hat{y}(t)]^2. \quad (10)$$

3 Arquitectura de entrenamiento

Para el entrenamiento de la red, se establece la arquitectura de la Fig. 3, el sistema incluye como vector de entrada: la velocidad, el error de la velocidad, el voltaje terminal, el error del voltaje terminal. El vector de salida del sistema es el voltaje de campo que provee el sistema de excitación al generador. La señal de voltaje de campo se retroalimenta y es la señal de salida de red. La finalidad de la retroalimentación es mejorar y acelerar el aprendizaje.

Los vectores de entrada/salida (E/S) a la red se obtuvieron simulando el sistema de potencia de la Fig. 4 y que se describe en la Sección 4.

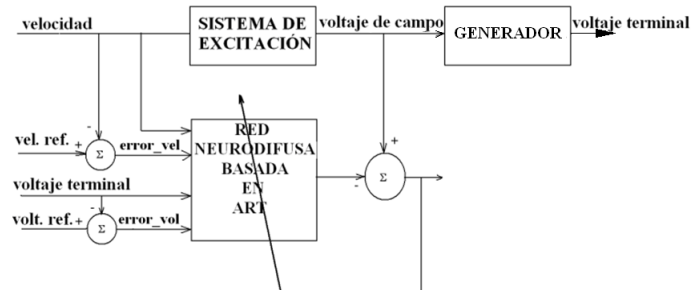


Fig. 3. Arquitectura de entrenamiento.

4 Sistema de prueba

El sistema de potencia de prueba utilizado se muestra en la Fig. 4. El sistema está diseñado para exhibir modos locales e interárea [14] presentes en los sistemas de potencia grandes y pequeños, además, los parámetros y estructura del sistema son realistas. Este sistema es inestable a pequeños disturbios aún sin uno de los estabilizadores de potencia, lo que significa que se generan oscilaciones electromecánicas inestables de baja frecuencia (0.5-2.5 Hz). El diagrama unifilar del sistema de potencia de la Fig. 4, es un sistema de dos áreas, es simétrico y conecta al área 1 y área 2. Cada una de las áreas contiene dos máquinas síncronas de 900 MVA y 22 kV. Cada uno de los generadores tiene un transformador con una impedancia de $0+j0.0167$ por unidad a una base de 22/230 kV, con un tap nominal de 1. Los transformadores en el nodo 4 y 14, tienen una impedancia de $0+j0.005$ por unidad a una base de 230/115 kV, con un tap nominal de 1. El voltaje nominal del sistema de transmisión es de 230 kV, las longitudes de las líneas se muestran en la 4. Los parámetros de las líneas en p.u. se muestran en la Tabla 1 a una base de 100 MVA, 230 kV.

5 Diseño del control

El control que se diseña en este trabajo está enfocado a sustituir el sistema de excitación instalado en el generador GEN 1 del sistema de prueba (Fig. 4). Para lograr esto, se registraron las entradas y salidas del sistema de excitación de la Fig. 3, que se describen como sigue:

- ENTRADAS: velocidad, voltaje terminal, y
- SALIDAS: voltaje de campo

Adicionalmente a estas señales se generaron durante el entrenamiento, el error del voltaje terminal y el error de la velocidad; todas estas señales se agruparon en un total de 200000 pares de entrada/salida. El sistema de excitación del

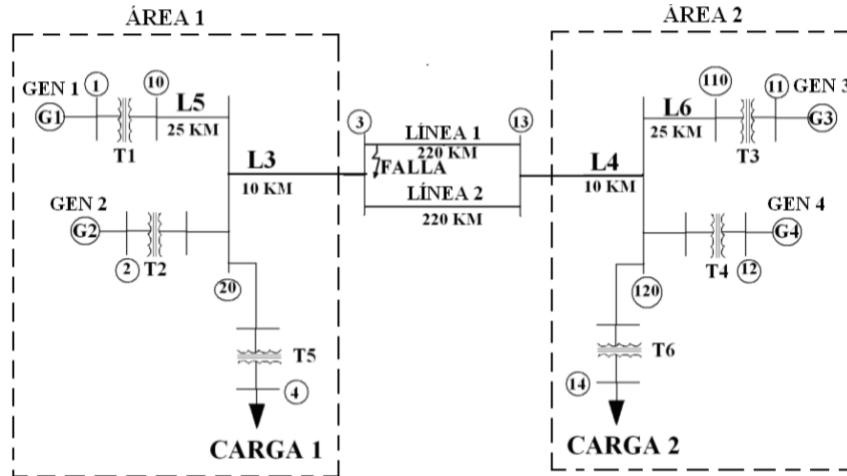


Fig. 4. Sistema de potencia interconectado utilizado en la pruebas.

generador GEN 1, se sometió a diferentes condiciones de operación, estas condiciones se obtuvieron al operar el sistema de prueba en diferentes condiciones de operación, que abarcaron: Cambios en el voltaje de referencia en el rango de $[-0.01, 0.01]$, fallas trifásicas en ambas líneas (línea 1 y línea 2), cambios de carga activa y reactiva (carga 1 y carga 2). La sintonización del control se llevó a cabo fuera de línea y durante el entrenamiento se alimentó al algoritmo utilizando la arquitectura de la sección 3 teniendo como vector de entrada: *velocidad*, *error de velocidad*, *voltaje Terminal*, *error del Voltaje terminal*; y el vector de salida estaba formado por el *voltaje de campo*.

Las funciones de membresía utilizadas por el algoritmo son funciones trapezoidales (Fig. 2), cuyos *hombros* son valores que la red neurodifusa utiliza para crear el centro de gravedad de cada una de las funciones de membresía (Ec. 9) para la defusificación de las salidas del control y que también son ajustados de acuerdo al algoritmo de propagación del error. Durante el entrenamiento, la red crea el número necesario de funciones de membresía de acuerdo a los criterios de la ART.

Los parámetros introducidos al algoritmo para la etapa de entrenamiento es el número de entradas ($M = 4$) y el número de salidas ($N = 1$), la sensibilidad del control difuso a sintonizar: $\gamma = 1$, el número total de patrones (200000) y el número de veces (Épocas) a realizar el entrenamiento que para este caso de estudio fue de 50 Épocas.

Terminada la sintonización del control, todas las variables, de entrada y de salida, tienen el mismo número de funciones de membresía, y se definen a como sigue: **MA** = Muy Alto; **MeA** = Medio Alto; **A** = Alto; **M** = Medio; **B** = Bajo; **MeB** = Medio Bajo; **MB** = Muy Bajo. Estas funciones de membresía se relacionan en una base de reglas difusas que, una vez finalizado el entrenamiento,

Tabla 1. Datos de líneas para el sistema de potencia de la Fig. 4.

LINES			
from bus	to bus	R p.u.	X p.u.
1	10	0	0.0167
2	20	0	0.0167
3	4	0	0.005
3	20	1.00E-03	0.01
3	101	0.011	0.11
3	101	0.011	0.11
10	20	0.0025	0.025
11	110	0	0.0167
12	120	0	0.0167
13	101	0.011	0.11
13	101	0.011	0.11
13	14	0	0.005
13	120	1.00E-03	0.01
110	120	0.0025	0.025

pueden enlistarse como sigue:

1. Si (velocidad es **M**) y (err_vel es **MA**) y (volt_term es **MB**) y (err_volt_term es **MA**) entonces (volt_campo es **A**).
2. Si (velocidad es **A**) y (err_vel es **B**) y (volt_term es **MeB**) y (err_volt_term es **MeA**) entonces (volt_campo es **M**).
3. Si (velocidad es **MeB**) y (err_vel es **A**) y (volt_term es **B**) y (err_volt_term es **A**) entonces (volt_campo es **MeA**).
4. Si (velocidad es **MB**) y (err_vel es **MeA**) y (volt_term es **M**) y (err_volt_term es **M**) entonces (volt_campo es **MB**).
5. Si (velocidad es **B**) y (err_vel es **M**) y (volt_term es **A**) y (err_volt_term es **B**) entonces (volt_campo es **MA**).
6. Si (velocidad es **MeA**) y (err_vel es **MeB**) y (volt_term es **MeA**) y (err_volt_term es **MeB**) entonces (volt_campo es **B**).
7. Si (velocidad es **MA**) y (err_vel es **MB**) y (volt_term es **MA**) y (err_volt_term es **MB**) entonces (volt_campo es **MeB**).

Pesumiendo los detalles del control, entradas, salidas, funciones de membresía y conjunto de reglas difusas, pueden agruparse gráficamente en una estructura similar a la presentada en la Fig. 1, y que se muestra en la Fig. 5.

El segmento de código *Algorithm 1*, se implementa en una herramienta digital de análisis de sistemas de potencia, para realizar las pruebas. El algoritmo requiere como entradas: la velocidad, el error de la velocidad, voltaje terminal, error del voltaje terminal, definidas en el algoritmo como: *Speed*, *SpeedDev*, *TermVolt*, *TermVoltDev*, respectivamente. Así, como también la señal de retroalimentación, el voltaje de campo, definida en el algoritmo como *FeedBack*. En la Fig. 5, puede verse que cada una de las entradas tiene 7 funciones de membresía, por lo que existen en total 35 u_{ij} 's y 35 v_{ij} 's, las cuales dependiendo

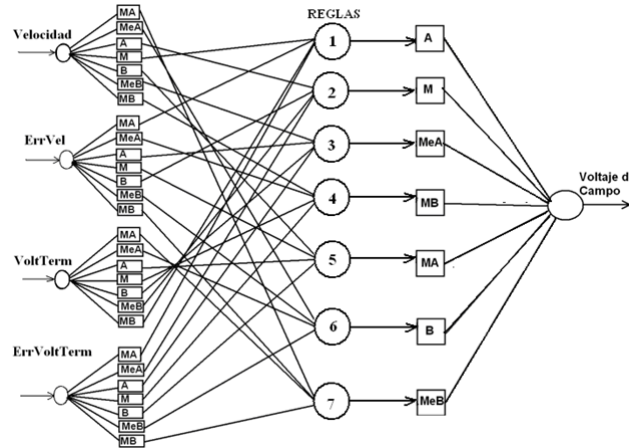


Fig. 5. Estructura del control difuso convencional obtenido.

de la entrada son seleccionadas de su arreglo unidimensional correspondiente, por ello en el algoritmo se define solamente como u_i 's y v_i 's. Adicionalmente se han calculado previamente los centroides m_{ij} de la Ec. 9. Todos estos parámetros permanecen sin cambios, una vez terminado el entrenamiento.

6 Pruebas efectuadas

El control diseñado en la sección 5 se incluyó en el generador GEN 1 como sistema de excitación para observar su desempeño. Las pruebas efectuadas al sistema consisten en: cambios de carga, cambios en el voltaje de referencia y falla trifásica a tierra de 6 ciclos, pruebas estándar para un sistema de excitación. Los cambios de carga es para observar el desempeño del control en eventos que pueden generar oscilaciones electromecánicas en el sistema y hacerlo colapsar. Los cambios en el valor de referencia del voltaje terminal, verifican el desempeño del control diseñado al funcionar con regulador automático de voltaje. La falla trifásica a tierra de 6 ciclos es para verificar la velocidad con la cual se recupera el voltaje terminal después de una falla muy severa.

6.1 Cambios de carga

Como condición inicial para esta prueba, la carga 1 y carga 2 (Fig. 4) se establecieron de acuerdo con la Tabla 2:

Las condiciones de carga de la Tabla 2 definen los puntos de operación de los generadores conectados al sistema que se indican en la Tabla 3. Con estas condiciones iniciales el sistema se pone en operación y después de 5 segundos se efectúa una serie programada de elevaciones de carga en la carga 1 acuerdo con la Tabla 4.

Algorithm 1 Calculo de Voltaje De Campo (*FieldVoltage*)**Require:** {vector de entrada $\mathbf{x}, u_i, v_i, \text{centroide}_i$ }

```

 $\mathbf{x} = (\text{Speed}, \text{SpeedDev}, \text{TermVolt}, \text{TermVoltDev}, \text{FeedBack})$ 
 $u_i, i = 1, \dots, 35$ 
 $v_i, i = 1, \dots, 35$ 
 $\text{centroid}_i, i = 1, \dots, 7$  {el centroide ( $m_{ij}$ ) se define en la Sección 2.4}
 $\bar{\mathbf{x}} \leftarrow \mathbf{x} / \|\mathbf{x}\|$  {vea Sección 2.3}
 $NA \leftarrow 7$  {NA es el número de funciones de membresía para cada una de las entradas}
 $NB \leftarrow 7$  {NB es el número de funciones de membresía para cada una de las salida}
 $DIM \leftarrow 5$  {DIM es el número de entradas a la red neurodifusa}
 $DIMB \leftarrow 1$  {DIMB es el número de salidas de la red neurodifusa}
 $L = 1$  {L es una variable auxiliar}
for  $k = 1$  to  $NA$  do
  for  $i = 1$  to  $DIM$  do
     $s(1) = [\bar{x}(i) - v(L)] * \text{gamma}$ 
    {Se evalúan los componentes de la ecuación 6}
     $s(2) = [u(L) - \bar{x}(i)] * \text{gamma}$ 
     $L = L + 1$ 
    for  $n = 1$  to  $2$  do
      if  $s(n) < 0.0$  then
         $s(n) = 0$ 
      else if  $s(n) = 1.0$  then
         $s(n) = 1.0$ 
      end if
    end for
     $\text{neta}(i) = (1.0 - s(1) - s(2))$  {se evalúa la ecuación 5}
  end for
   $\text{producto}(k) = \text{product}(\text{neta})$  {en esta línea se evalúa cada regla de la base, ecuación 7}
end for
{valor inicial de la salida de la red neurodifusa}
 $\text{fneta} = 0.0$ 
for  $j = 1$  to  $DIMB$  do
   $\text{suma} = 0.0$  {se calcula numerador y denominador de la ecuación 9}
  for  $j = 1$  to  $NB$  do
     $\text{fneta}(i) = \text{fneta}(i) + (\text{centroid}(j) * \text{producto}(j))$ 
     $\text{suma} = \text{suma} + \text{producto}(j)$ 
  end for
   $\text{fneta}(i) = \text{fneta}(i) / \text{suma}$  {se evalúa la ecuación 9}
end for
 $\text{FieldVoltage} = \text{fneta}(1)$  {se obtiene la salida de la red, el voltaje de campo}

```

Tabla 2. Cargas iniciales del sistema.

	CARGA 1	CARGA 2
P(MW)	1350	1350
Q(MVARS)	60	100

Tabla 3. Condiciones de Carga en los Generadores definidas por las Cargas Iniciales de la 2.

	P (MW)	Q (MVAR)	δ (grad)	Vt (p.u.)	% CAP
GEN 1	691.94	138.4	47.64	1.03	78.41
GEN 2	693.32	285.69	44.01	1.005	83.32
GEN 3	692.43	103.6	49.66	1.022	77.79
GEN 4	693.7	286.21	43.05	0.998	83.38

Entre otras variables, la variable monitoreada es el voltaje terminal del generador que opera con el control neurodifuso, que se muestra en la Fig. 6, la respuesta de esta variable muestra que el generador logra un mejor desempeño durante esta prueba al operar con el control diseñado, de los dos índices de desempeño de la Fig. 7, el de menor valor indica que el control diseñado supera al control convencional IEEE ST1A.

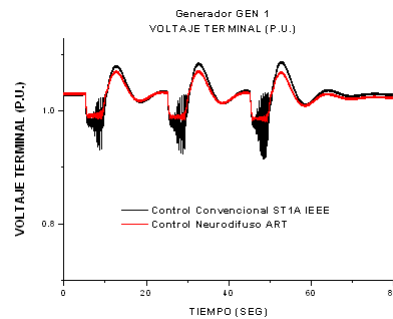


Fig. 6. Voltaje terminal (P.U.) del Generador GEN 1.

Tabla 4. Secuencia de Aumentos de Cargas.

t (seg)	P (MW)	Q (MVAR)
5	60	15
25	60	15
45	60	15

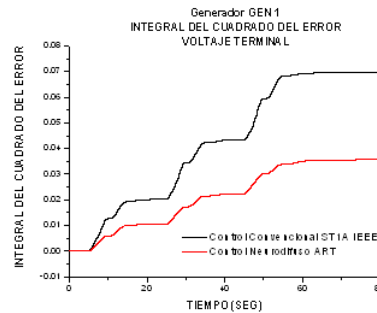


Fig. 7. Índice de comportamiento $\int e^2 dt$ del voltaje terminal del GEN 1.

6.2 Cambios en el voltaje de referencia

Para esta prueba, las condiciones iniciales del sistema se mantuvieron en el punto de operación de la sección 6.1. Con el sistema en operación se indica un cambio en el voltaje de referencia del Generador GEN 1 del ± 2 . El primer cambio del voltaje de referencia se efectúa en $t = 5.0$ segundos, el segundo cambio, al voltaje de referencia inicial, se efectúa en $t = 16.0$ segundos.

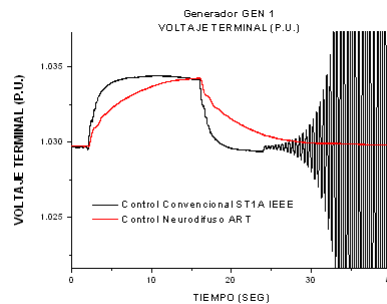


Fig. 8. Voltaje Terminal del Generador GEN 1.

Las variables monitoreadas en esta prueba fue el voltaje terminal y la velocidad el Generador GEN 1 (Fig. 8 y Fig. 9), respectivamente, ya que son las variables que muestran el desempeño del sistema de excitación, el voltaje terminal en función del regulador automático de voltaje y el velocidad que muestra la magnitud de las oscilaciones en el sistema. De una manera cualitativa, las oscilaciones que se generan con el control neurodifuso son de menor amplitud. Estas gráficas permiten verificar la estabilidad del sistema durante el disturbio de cambios en el voltaje de referencia, el sistema se mantiene estable con el control neurodifuso operando en el generador GEN 1.

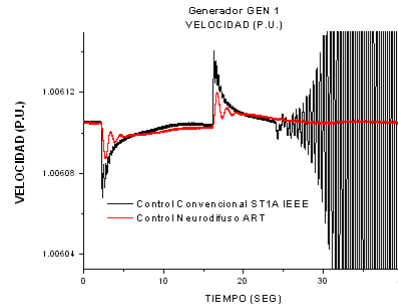


Fig. 9. Velocidad del Generador GEN 1.

6.3 Falla trifásica a tierra de 6 ciclos de duración

Para esta prueba se efectuó una falla trifásica a tierra de 6 ciclos de duración sobre la línea 1 del sistema de la Fig. 4, la falla se realiza para el punto de operación con las condiciones iniciales definidas en la sección 6.1. La falla trifásica a tierra se aplica en el bus de la línea de enlace línea 1 que se ubica en el área 1, y se indica en la Fig. 5 como FALLA. Para la prueba, una vez que el sistema se pone en operación, en $t = 2.0$ segundos se aplica una falla de 6 ciclos de duración, con este evento el interruptor que se ubica más cerca de la falla libera el extremo correspondiente de la línea de enlace. El interruptor en el extremo opuesto libera la línea 3 ciclos más tarde. En la Fig. 10 se puede observar el comportamiento en el tiempo del voltaje terminal durante esta prueba, y en la Fig. 11 se grafica el índice de comportamiento del voltaje, este índice indica que durante la prueba el voltaje del generador que opera con el sistema de excitación inteligente mejora su comportamiento en comparación con el sistema de excitación convencional.

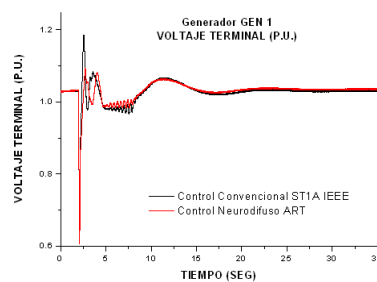


Fig. 10. Voltaje Terminal del Generador GEN 1.

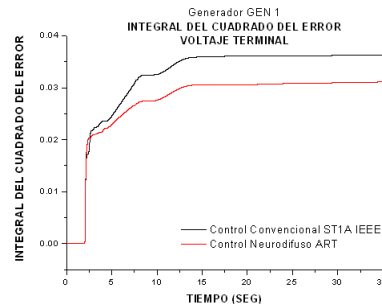


Fig. 11. Índice de comportamiento $\int e^2 dt$ del Voltaje terminal del Generador GEN 1.

Durante la prueba, el índice de comportamiento indica que el voltaje terminal del generador tiene una recuperación más rápida cuando el generador opera con el control neurodifuso diseñado.

7 Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de excitación inteligente basado en la ART que no necesita un estabilizador de sistemas de potencia convencional. Este sistema de excitación incluye características de regulador y estabilizador. Al equiparse un generador del sistema con el control diseñado, el sistema mostró más robustez al compararse con un sistema de excitación estándar IEEE ST1A. Se presentaron pruebas de cambios de carga en las cuales el índice de comportamiento del voltaje terminal permite verificar que el desempeño del sistema se mejora al instalar el control neurodifuso diseñado en el generador GEN 1. Durante la prueba de cambios en el voltaje de referencia, el sistema mantiene la estabilidad durante este tipo de disturbios. La prueba se llevó a cabo en puntos de operación en los que los generadores deben alimentar una mayor carga.

Las pruebas de falla trifásica mostraron que el sistema de control neurodifuso mejora el desempeño del sistema de prueba en periodos de estado transitorio. En general, la introducción del control diseñado mejoró en el desempeño del sistema eléctrico de potencia en todas las pruebas realizadas.

Un trabajo derivado de los resultados presentados, es el diseño de controles inteligentes que se puedan obtener con un entrenamiento en línea. La actividad a desarrollar es elaborar y ejecutar algoritmos inteligentes en herramientas digitales para el análisis de sistemas complejos a controlar, como lo son los sistemas eléctricos de potencia.

Referencias

1. Carpenter, G.A., Grossberg, S., Rosen, D.B.: Fuzzy art: an adaptive resonance algorithm for rapid, stable classification of analog patterns. In: IJCNN-91-Seattle

- International Joint Conference on Neural Networks. vol. ii, pp. 411–416 vol.2 (Jul 1991)
2. Carpenter, G., Grossberg, S.: A self-organizing neural network for supervised learning, recognition, and prediction. *Communications Magazine, IEEE* 30(9), 38–49 (Sept 1992)
3. Carpenter, G., Grossberg, S., Markuzon, N., Reynolds, J., Rosen, D.: Fuzzy art-map: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. *Neural Networks, IEEE Transactions on* 3(5), 698–713 (Sep 1992)
4. Carpenter, G.A., Grossberg, S.: The art of adaptive pattern recognition by a self-organizing neural network. *Computer* 21(3), 77–88 (Mar 1988), <http://dx.doi.org/10.1109/2.33>
5. Centre, M.H.R.: Pscad v4.2 (2005)
6. Chaturvedi, D., Malik, O.: Generalized neuron-based adaptive pss for multimachine environment. *Power Systems, IEEE Transactions on* 20(1), 358–366 (Feb 2005)
7. El-Metwally, K., Malik, O.: Application of fuzzy logic stabilisers in a multimachine power system environment. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* 143(3), 263–268 (May 1996)
8. Gupta, M.M., Homma, N., Jin, L.: *Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1st edn. (2003)
9. Klein, M., Rogers, G.J., Kundur, P.: A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 6(3), 914–921 (Aug 1991)
10. Klein, M., Rogers, G.J., Moorty, S., Kundur, P.: Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 7(3), 382–390 (Sep 1992)
11. Kundur, P.: *Power System Stability and Control*. EPRI (1994)
12. Lin, C.J., Lin, C.T.: An art-based fuzzy adaptive learning control network. In: *Fuzzy Information Processing Society Biannual Conference, 1994. Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference, and the NASA Joint Technology Workshop on Neural Networks and Fuzzy Logic*, pp. 357–362 (Dec 1994)
13. Lu, J., Nehrir, M., Pierre, D.: A fuzzy logic-based adaptive power system stabilizer for multi-machine systems. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. vol. 1, pp. 111–115 vol. 1 (2000)
14. Rogers, G.: *Power System Oscillations*. Kluwer Academic Publishers, U.S.A. (2000)
15. Salem, M., Zaki, A., Mahgoub, O., Abu El-Zahab, E., Malik, O.: Studies on a multi-machine power system with a neural network based excitation controller. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. vol. 1, pp. 105–110 vol. 1 (2000)
16. Senjyu, T., Yoshiteru, M., Uezato, K.: Online learning recurrent neural network stabilization controller for multi-machine power system. In: *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*. vol. 1, pp. 223–228 vol.1 (2000)
17. Shamsollahi, P., Malik, O.P.: Application of neural adaptive power system stabilizer in a multi-machine power system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 14(3), 731–736 (Sep 1999)
18. You, R., Eghbali, H., Nehrir, M.: An online adaptive neuro-fuzzy power system stabilizer for multimachine systems. *Power Systems, IEEE Transactions on* 18(1), 128–135 (Feb 2003)

19. Zhang, Y., Chen, G., Malik, O., Hope, G.: A multi-input power system stabilizer based on artificial neural networks. In: WESCANEX 93. 'Communications, Computers and Power in the Modern Environment.' Conference Proceedings., IEEE. pp. 240–246 (1993)
20. Zhang, Y., Malik, O., Chen, G.: Artificial neural network power system stabilizers in multi-machine power system environment. Energy Conversion, IEEE Transactions on 10(1), 147–155 (Mar 1995)

Navegación jerárquica de un robot humanoide usando redes de Petri y lógica difusa

Federico Furlán Colón, Elsa Rubio Espino, Juan Humberto Sossa Azuela,
Víctor Hugo Ponce Ponce

Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación, CDMX,
México
ffurlan_b11@sagitario.cic.ipn.mx, {erubio,hsossa,vponce}@cic.ipn.mx

Resumen. En este artículo se presenta un sistema de control supervisado que planea los movimientos de un robot humanoide. El sistema propuesto es una estructura de supervisión formada por dos niveles jerárquicos de un sistema a eventos discretos. La parte superior está representada por una red de Petri que se comporta como un supervisor que indica la secuencia de movimientos que el robot debe realizar. Por otro lado, el nivel inferior está representado por un robot humanoide en un ambiente controlado. Las decisiones del robot durante la fase de exploración es modelada mediante una configuración de lógica difusa que utiliza un Sistema Difuso de Inferencia (SDI).

Palabras clave: redes de Petri, lógica difusa, robot humanoide, navegación de robots, técnicas híbridas.

Hierarchical Navigation of a Humanoid Robot Using Petri Nets and Fuzzy Logic

Abstract. This paper presents a supervisory control system for humanoid robot motion planning. The proposed system is a supervisory structure formed by two hierarchical levels of a discrete event system. The high level system is represented by a Petri net. This Petri net behaves as a supervisor that indicates the sequence of motions that the robot has to make. A robot walking in a closed space forms the lower level. The robot decisions are modeled by a fuzzy logic configuration using a Fuzzy Inference System (FIS).

Keywords: Petri nets, fuzzy logic, humanoid robot, robot navigation, hybrid techniques.

1. Introducción

Hoy en día, las máquinas inteligentes son empleadas en una gran variedad de situaciones relacionadas con la vida moderna, debido a su habilidad

de interactuar dinámicamente y eficientemente dentro de ambientes comunes [4]. Los robots humanoides inteligentes son dispositivos complejos enfocados a la funcionalidad y diseñados para realizar un conjunto de tareas diversas. Estos dispositivos, son propensos a moverse de manera segura dentro de ambientes específicos, siendo capaces de obtener información y procesarla para realizar tareas complejas. La navegación en ambientes comunes es un problema importante dentro del campo de los robots móviles, la cual consiste básicamente en planear y ejecutar los movimientos, desde un punto inicial hacia un objetivo específico, dentro de un ambiente comunmente lleno de obstáculos [7].

En las últimas décadas, la navegación de robots ha sido un campo emergente de investigación donde diversos algoritmos han sido usados para resolver el problema. Estos algoritmos tienen como base algunas de las técnicas de la inteligencia artificial; como lo son la lógica difusa, los algoritmos genéticos, las redes neuronales y las técnicas híbridas; entre otras, ver [9]. La investigación de este trabajo se centra en la implementación de una estrategia de navegación en un robot humanoide, para que éste sea capaz de moverse a un lugar específico dentro de un ambiente controlado y que además realice una tarea predeterminada al finalizar su recorrido.

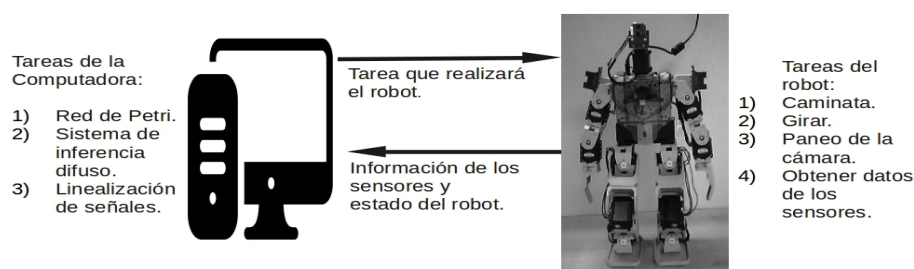


Fig. 1. Diagrama de la metodología.

La estrategia propuesta (Fig. 1) consiste de un sistema difuso, usado como un bloque de toma de decisión para el problema de navegación. El sistema difuso responde a la información de los sensores ejecutando una acción específica como puede ser girar a la izquierda o a la derecha. Adicionalmente una red de Petri es usada para supervisar y controlar algunas tareas del robot [6], incluyendo la activación del sistema difuso durante la fase de exploración; mejorando así el desempeño del robot [3,12]. La plataforma que se utilizó fue un robot BIOLOID. A este robot se le montaron tres sensores infrarrojos (IR) para medir la distancia entre él mismo y los obstáculos que pueden haber durante su desplazamiento hacia el objetivo final.

Al robot humanoide se le adaptó un módulo de visión (MV) que es usado para aislar regiones específicas de color presentes en el ambiente mediante un algoritmo embebido. El MV fue usado solamente como un sensor de detección de color. La información obtenida de los sensores infrarrojos, al igual que el

color detectado por el MV, se envían de manera inalámbrica a una computadora. El uso de una plataforma externa de cómputo es necesario, debido a las limitadas capacidades del microprocesador del robot, además de que mejora el desempeño del sistema difuso y de la red de Petri. Desafortunadamente, bajo esta metodología no se puede evitar la posibilidad de que se presente un cuello de botella relacionado con el flujo de información entre el robot humanoide y la computadora. Para probar la estrategia de control del movimiento del robot se acondicionó una superficie lisa y rígida, además se limitó el número de colores presentes en el entorno.

Este artículo está organizado de la siguiente manera, en la sección 2 se explica el trabajo realizado durante la investigación comenzando por describir, los sensores usados en el robot. A continuación se define el sistema difuso, los conjuntos difusos usados y las reglas que lo gobiernan. Finalmente se presenta el modelo de la red de Petri y se realiza un análisis de sus propiedades estructurales. En la sección 3 se muestra la interfaz desarrollada con la cual se llevaron a cabo las pruebas. En la sección 4 se discute sobre dos casos de prueba que se realizaron para verificar el desempeño de la metodología. En la sección 5 se mencionan las conclusiones obtenidas y los posibles trabajos futuros.

2. Desarrollo

2.1. Sensores y cámara

Los sensores infrarrojos usados pueden operar en un intervalo de distancias que van desde los 2 cm hasta los 130 cm. Para calcular la distancia entre el robot y el objetivo específico, se usó el MV. El enfoque usado consiste en obtener el número de píxeles que forman la región del color que está siendo buscada. Para poder implementar este método se requiere de una fase previa de calibración, la cual consiste de un conjunto de mediciones del objeto que buscará el robot colocado a diferentes distancias.

De esta manera, se puede observar que existe una relación empírica entre el número de píxeles y la distancia a la cual se encuentra el objeto de la cámara. Una representación experimental de lo anterior puede verse en la Fig. 2 de esta manera es posible aproximar un polinomio que en función del número de píxeles nos indique la distancia a la que está el objeto.

El robot realiza la búsqueda del objeto mediante movimientos de pánico del módulo de visión. En cuanto el objetivo es localizado el robot realiza una serie de movimientos para posicionarse frente a él, una vez hecho esto el robot comienza a acercarse al objetivo.

2.2. Sistema difuso de inferencia

Un sistema difuso puede ser usado para resolver de manera similar a la humana problemas complejos si es que existe algún conocimiento heurístico de la solución en forma de reglas lingüísticas de la forma si-entonces. Un sistema

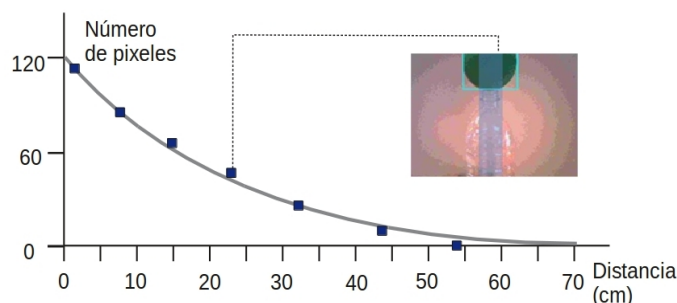


Fig. 2. Relación entre el número de píxeles y la distancia entre el objeto y la cámara.

difuso de inferencia (SDI) ver Fig. 3, es un sistema que usa la teoría de los conjuntos difusos para mapear entradas a salidas deseadas. Un SDI está dividido en tres bloques principales: Fusificación, donde las entradas son convertidas a valores difusos al asignarles un valor de membresía, para todos los conjuntos difusos definidos de cada variable de entrada. Lo siguiente es un proceso difuso de inferencia, donde las reglas difusas son evaluadas.

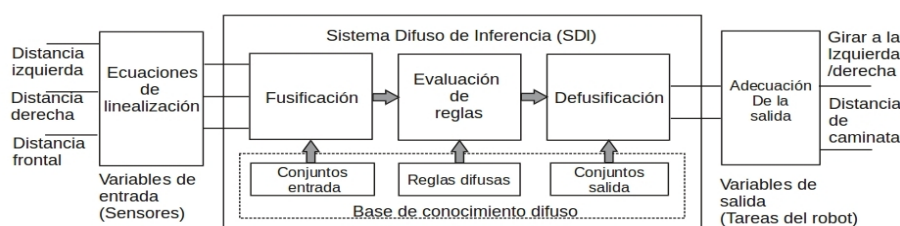


Fig. 3. Diagrama del sistema difuso de inferencia usado para la navegación del robot.

Finalmente, un proceso de defusificación es definido para asignar valores a los conjuntos difusos de salida obtenidos del cálculo de las reglas difusas. Los controladores difusos son diseñados tomando en consideración problemas con la eficiencia computacional cuando son implementados en robots móviles, debido a las inherentes limitaciones de las capacidades de cómputo. Por lo tanto es preferible el uso de conjuntos de entrada de forma trapezoidal, así como el uso de singletons para definir conjuntos difusos de salida. Además, los operadores difusos como MIN y MAX son más convenientes, dada su simplicidad computacional. Los sistemas difusos de inferencia han sido ampliamente y satisfactoriamente usados en áreas como el control automático, la clasificación de la información, el análisis de decisiones, los sistemas expertos y la visión por computadora [11,10,5].

El SDI implementado se encarga de la navegación del robot, mientras el objetivo no ha sido encontrado. En base a la información de los sensores, el

robot móvil debe ser capaz de desplazarse dentro del ambiente evadiendo los obstáculos, moviéndose siempre hacia adelante y al mismo tiempo buscando un camino despejado mientras explora el entorno tratando de localizar el objetivo. El SDI consiste en un sistema Mamdani. Se definieron tres variables de entrada, de acuerdo a las distancias frontal, izquierda y derecha obtenidas de los sensores del robot. Bajo estas condiciones, se diseñó un conjunto de reglas difusas para que el robot funcione como un seguidor de paredes. El proceso del sistema difuso concluye con un comando de salida que indica al robot el siguiente movimiento que debe realizar, como por ejemplo, un giro a la derecha o izquierda, o una caminata larga e incluso en situaciones especiales un giro de 180°.

2.3. Conjuntos difusos

Las variables de entrada, que significan distancia del robot en direcciones específicas (izquierda o derecha) del SDI, fueron particionadas en tres conjuntos difusos, nombrados como: Cerca, Media y Lejos. Usando un proceso heurístico, se ajustaron los conjuntos difusos dando como resultado las formas curvo-trapezoidal de los conjuntos difusos, ver Fig. 4. De manera similar, para el sensor frontal, cuatro conjuntos difusos fueron definidos.

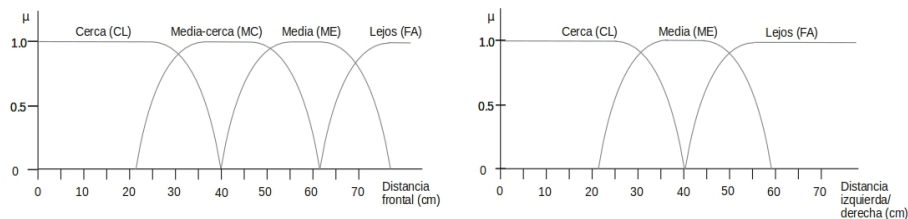


Fig. 4. Conjuntos difusos definidos para las señales de entrada de los sensores infrarrojos.

Las instrucciones de salida corresponden a tres diferentes tareas, giro a la derecha, giro a la izquierda y caminata; como se puede ver en la Fig. 5. La acción de caminata, esta definida por los términos lingüísticos Corta, Media y Larga. Al defusificar los comandos de salida de la tarea caminata, es posible que el movimiento del robot sea de diferentes distancias, definidas por los términos del universo de discurso, entre los centros de los conjuntos difusos singleton nombrados caminata corta, caminata media y caminata larga como se muestra en la Fig. 5. Lo anterior depende de las limitaciones mecánicas (avance mínimo) del robot móvil.

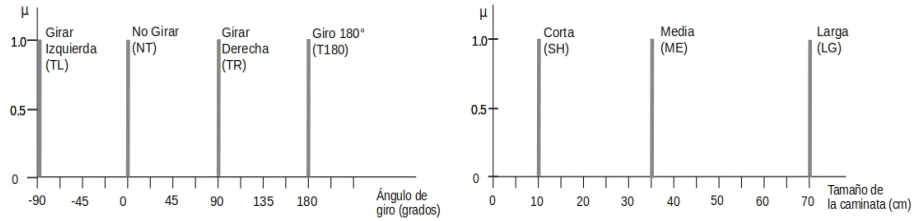


Fig. 5. Conjuntos difusos de salida definidos como acciones del robot.

2.4. Reglas difusas

Las reglas difusas fueron definidas para que el robot realice la tarea de caminar hacia adelante, tratando de seguir un camino libre de obstáculos, dentro del entorno de pruebas, compuesto por paredes rectas, las cuales sirven como referencia para la orientación del robot. El robot puede girar 180° si no le es posible evadir algún obstáculo o en caso de que no exista camino para seguir desplazándose hacia adelante. Como resultado del análisis de la estrategia del sistema difuso, se definió un conjunto de 36 reglas difusas, las cuales se presentan en la Fig. 6. Es posible que se presenten situaciones en las cuales el robot necesite realizar un giro para evadir un obstáculo, pero es común que el espacio libre en ambos lados haga viable girar hacia la derecha o izquierda. En este caso, el robot lo considerará un caso especial, éste último referenciado en la Fig. 6 como: *Caso Esp.* Si es así, el robot adoptará la dirección del último giro que ha realizado para continuar su desplazamiento. Para implementar la norma-t y la norma-s, los operadores MIN y MAX fueron usados ya que se empleó un sistema Mamdani por su simplicidad.

Variables de entrada			Variables de salida		Variables de entrada			Variables de salida			
#	Distancia frontal	Distancia izquierda	Distancia derecha	Giro izq / der	Distancia caminata	#	Distancia frontal	Distancia izquierda	Distancia derecha	Giro izq / der	Distancia caminata
1	CL	CL	CL	T180	----	8	MC o CL	FA	CL	TL	----
2	FA	CL	CL	----	LG	9	MC o CL	FA	ME	TL	----
3	ME	CL	CL	----	ME	10	MC o CL	CL	ME	TR	----
4	MC	CL	CL	----	SH	11	MC o CL	CL	FA	TR	----
5	MC	ME	ME	----	SH	12	MC o CL	ME	FA	TR	----
6	MC	FA	FA	----	SH	13	CL	ME	ME	Caso Esp.	Caso Esp.
7	MC o CL	ME	CL	TL	----	14	CL	FA	FA	Caso Esp.	Caso Esp.

Fig. 6. Reglas definidas para el sistema difuso de inferencia.

2.5. Red de Petri

Las redes de Petri (RdP) son un interesante lenguaje gráfico y formal el cual es apropiado para el modelado de sistemas con concurrencias, caracterizados por ser asíncronos, distribuidos, paralelos, no deterministas y estocásticos [2,1,8]. Las

RdP pueden ser usadas como una herramienta gráfica en la descripción de un sistema, similar a los diagramas de flujo o de bloques. En las RdP, se utilizan tokens para simular actividades dinámicas y concurrentes del sistema. También pueden ser usadas como una herramienta de descripción matemática, ya que es posible definir una ecuación de estado o ecuación fundamental, una ecuación algebraica de la secuencia de eventos y otros modelos matemáticos que gobiernan a los sistemas.

La RdP que representa el control supervisor del sistema, indica la secuencia de movimientos que el robot debe realizar. Ver la Fig. 7.

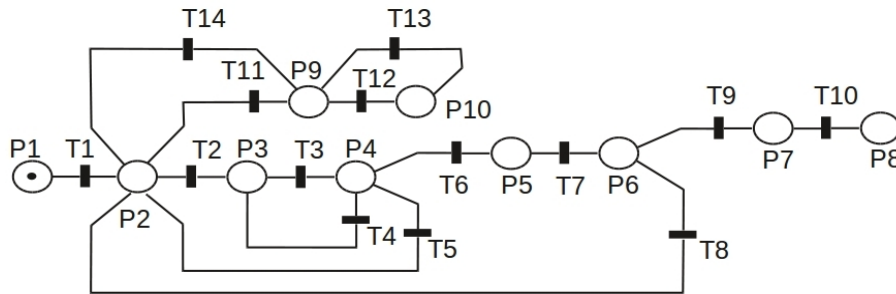


Fig. 7. Red de Petri.

La descripción de las transiciones y lugares de la RdP se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de lugares y transiciones de la RdP.

Lugares			
P_1	Robot esperando instrucción	P_6	Robot caminando al objetivo
P_2	Robot buscando objetivo	P_7	Robot derribando el objetivo
P_3	Robot girando	P_8	Tarea del robot completada
P_4	Robot alineado con objetivo	P_9	Robot explorando
P_5	Calculando distancia al objetivo	P_{10}	Robot cambiando dirección

Transiciones			
T_1	Instrucción recibida	T_8	Caminata completada
T_2	Objetivo encontrado	T_9	Objetivo alcanzado
T_3	Giro realizado	T_{10}	Objetivo derribado
T_4	Objetivo no alineado	T_{11}	Objetivo no detectado
T_5	Objetivo perdido	T_{12}	Acción indicada por el SDI
T_6	Objetivo centrado	T_{13}	Nueva dirección fijada
T_7	Tarea del robot seleccionada	T_{14}	Nueva búsqueda requerida

La matriz de incidencia es:

$$W = W^+ - W^- = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

y su marcaje inicial está dado por: $m_0 = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$.

Entonces la RdP obtiene su marcaje siguiente de la ecuación fundamental:

$$m_k = m_i + W \cdot s, \quad (2)$$

donde s es el vector característico y su dimensión es igual al número de lugares de la RdP, y su subíndice indica la transición disparada, ver Fig. 7.

Si elegimos $s_1^T = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$, entonces $(W \cdot s)^T = (-1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$, tal que el nuevo marcaje es $m_1 = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$. De la misma manera, si disparamos las transiciones t_2 y t_{11} , sus vectores característicos son $s_2^T = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$ y $s_{11}^T = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)$. Se obtiene ahora $(W \cdot s_2)^T = (0\ -1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$ y $(W \cdot s_{11})^T = (0\ -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0)$, por lo tanto el nuevo marcaje es $m_2 = (0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$ y $m_{11} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0)$ respectivamente. Con estos cambios en el marcaje de la RdP, puede verse que la RdP de la Fig. 7, representa todos los posibles movimientos del robot en el espacio de trabajo.

2.6. Propiedades de la red de Petri

En esta sección, serán analizadas algunas propiedades estructurales y de comportamiento de la RdP mostrada en la Fig. 7. Primeramente, una de las principales propiedades estructurales que se observan, es que la RdP es *pura*, debido a que no tiene ciclos.

En relación a las propiedades del comportamiento, esta RdP es *ordinaria*, porque todos los arcos tienen pesos unitarios. Estas propiedades están estrechamente relacionadas al hecho de que la RdP también es *segura*, debido a que todos sus lugares están limitados a tener solo un token a la vez. Esto prueba que la RdP esta describiendo tareas secuenciales, porque el robot no es capaz de realizarlas en paralelo; adicionalmente está limitado a realizarlas una a la

vez. En este sentido, la RdP es *quasiviva*, ya que la mayoría de sus transiciones pueden ser disparadas por lo menos una vez durante la evolución de la red.

Esta propiedad describe cómo el robot siempre tiene la posibilidad de encontrar el objetivo y derribarlo; tal y como se muestra en la Fig. 7. En esta misma figura, se puede ver que la transición T_9 , se utiliza para darle al robot la posibilidad de finalizar su tarea en cualquier momento. Las implicaciones de la propiedad anterior son importantes, y hace evidente el poder de descripción que tienen las redes de Petri, a pesar de la sencillez de su uso. Hay que dejar en claro que aunque lo anterior no asegura que el robot completará de manera correcta todos los experimentos, debido a que esta RdP no modela algunos de los eventos que pueden afectar el desempeño del robot como pueden ser las fallas en la comunicación inalámbrica con la computadora, las fallas que pueden ocurrir por una inadecuada marcha del robot o que la batería se agote, sí se asegura que en caso de que no ocurra una falla no modelada y que exista un objetivo dentro del área de trabajo, entonces el robot encontrará y terminará su tarea en un tiempo finito, aunque este tiempo pueda ser muy grande.

Por otro lado, cuando T_{10} es disparada, la RdP se bloquea porque el robot ha finalizado su tarea y no tiene sentido que siga buscando el objetivo o explorando su entorno. Para finalizar, se debe resaltar que esta RdP, puede regresar al marcaje inicial M_1 desde cualquier lugar mientras no se haya disparado la transición T_9 . Lo cual significa que siempre existe una secuencia de transiciones que llevarán al robot a seguir buscando el objetivo. A continuación se mostrará el análisis de los P-invariantes y los T-invariantes de la RdP. En [8], estos invariantes son denotados como propiedades estructurales. Se iniciará con los P-invariantes, por lo que es necesario resolver la ecuación siguiente:

$$x^T \cdot W = 0, \quad (3)$$

donde

$$x^T \cdot W = \begin{pmatrix} -x_1 + x_2 \\ -x_2 + x_3 \\ -x_3 + x_4 \\ x_3 - x_4 \\ x_2 - x_4 \\ -x_4 + x_5 \\ -x_5 + x_6 \\ x_2 - x_6 \\ -x_6 + x_7 \\ -x_7 + x_8 \\ -x_2 + x_9 \\ -x_9 + x_{10} \\ x_9 - x_{10} \\ x_2 - x_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

lo cual significa que:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = a,$$

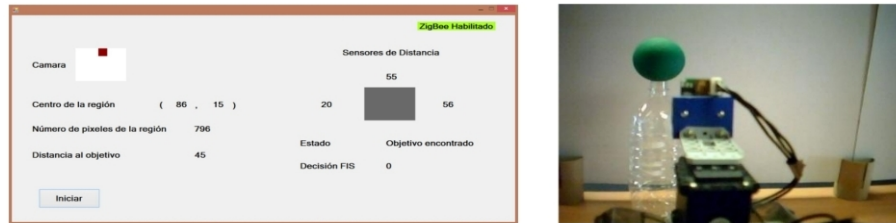


Fig. 8. Interfaz desarrollada para monitorear el desempeño del robot.

3. Resultados

Se realizaron varias pruebas para evaluar el desempeño del modelo híbrido propuesto, se usaron diferentes configuraciones del ambiente de trabajo. El comportamiento esperado es que el robot se mueva hacia el objetivo, sin chocar con las paredes u obstáculos que puedan obstruir su camino, ésto se espera para todas las configuraciones. Se seleccionaron dos configuraciones para ser analizadas en este artículo, pero si se quieren consultar más pruebas y configuraciones, se puede consultar [1], ahí se encontrarán más pruebas y con mayor detalle. La configuración 1 de los ambientes de prueba, es mostrada en la Fig. 9, con este escenario, se llevaron a cabo 15 experimentos. Durante las pruebas se observó que el robot completó 12 recorridos sin ningun problema y que los 3 recorridos incompletos pero fueron debidos a fallas en la comunicación con la computadora. Una secuencia del movimiento del robot en este ambiente de pruebas es presentado en la Fig. 10.

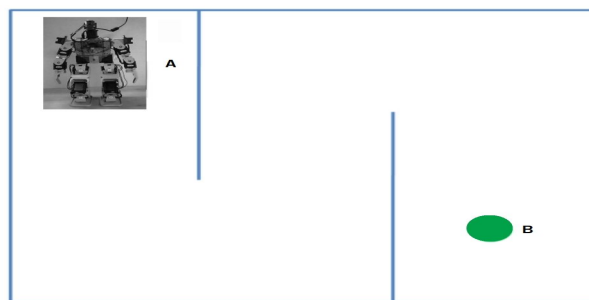


Fig. 9. Configuración 1, usada para probar el desempeño de la metodología propuesta.

La configuración 2 es similar a la usada en [9], ver Fig. 11. Esta configuración puede servir para comparar el desempeño de la solución propuesta en ambos trabajos. Aunque los tipos de robots son distintos, debido a que uno es un robot humanoide y el otro un robot con ruedas, los resultados muestran un comportamiento similar en ambos casos.

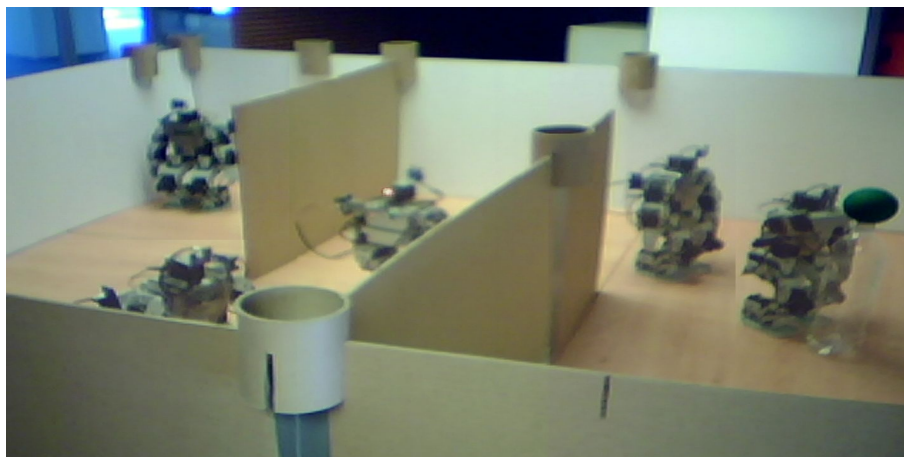


Fig. 10. Trayectoria seguida por el robot durante las pruebas en la configuración 1.

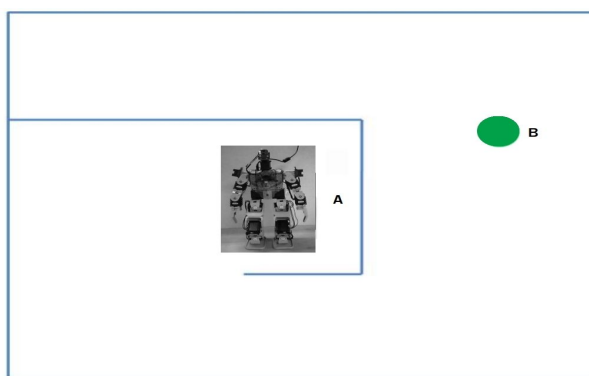


Fig. 11. Configuración 2, usada para probar el desempeño de la metodología propuesta.

En esta segunda configuración, ver Fig. 12, se realizaron 10 experimentos. De los cuales 8 fueron recorridos completos. Como en el caso de la primera configuración. Las dimensiones del área de trabajo fueron $2\text{m} \times 1.9\text{m}$.

4. Conclusiones

Se propuso e implementó un método de navegación basado en la combinación de la lógica difusa y las redes de Petri. Esto representa una propuesta de un control supervisado, donde la RdP funge como supervisor y el robot como un dispositivo supervisado.

El uso de la lógica difusa, permite darle la oportunidad al robot de mejorar su desempeño al caminar; ya que el robot se va aproximando al objetivo de una

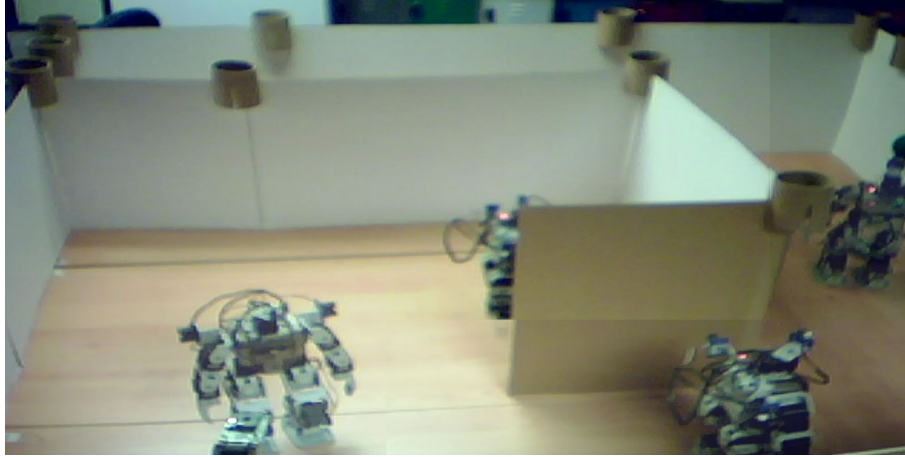


Fig. 12. Trayectoria seguida por el robot durante las pruebas en la configuración 2.

manera suave y gradual para disminuir las posibilidades de choque y/o de derribo involuntario.

Finalmente este uso combinado de dos técnicas de inteligencia artificial permite describir al sistema en conjunto, como un modelo híbrido con jerarquía, además de que como puede observarse en los experimentos, mejora el desempeño del robot al realizar las tareas recibidas a través de la computadora.

Resumiendo, el modelo híbrido propuesto en este trabajo fue adecuado para la plataforma en la cual se probó, ya que el SDI fue capaz de tolerar los problemas causados por las perturbaciones de la marcha del robot y los errores de sensado, mientras que la RdP proporciona al robot la posibilidad de completar su tarea de manera correcta para todos los experimentos realizados. La metodología propuesta cuenta con la versatilidad de poder ser implementada en diferentes plataformas de robots móviles, sin necesitar de cambios mayores ya que no depende del modelo dinámico del robot.

Agradecimientos. Los autores agradecen el apoyo recibido por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP), por el apoyo económico brindado para llevar a cabo esta investigación. Así mismo, se agradece el apoyo económico a la SIP-IPN (números 20171548, 20170901 y 20170693), y CONACYT (número 155014 (Investigación Básica) y número 65 (Fronteras de la Ciencia)). Federico Furlán agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de sus estudios de posgrado, así como el apoyo del programa BEIFI-IPN.

Referencias

1. Furlán, F.: Navegación de un robot humanoide mediante redes de Petri y lógica difusa. Instituto Politécnico Nacional, CIC, Tesis de Maestría (2013)
2. David, R., Alla, H.: Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets. Springer, Berlin (2010)
3. Farinelli, A., Iocchi, L., Nardi, D., Ziparo, V. A.: Assignment of Dynamically Perceived Tasks by Token Passing in Multi-Robot Systems. Proceedings of the IEEE, Special issue on Multi-Robot Systems, Vol. 94, No. 7, pp. 1271–1288 (2006)
4. Katić, D., Vukobratović, M.: Survey of Intelligent Control Techniques for Humanoid Robots. Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 37, No. 2, pp. 117–141 (2003)
5. Lee, Kwang Hyung: First Course On Fuzzy Theory And Applications. Springer Verlag (2004)
6. Milutinovic, D., Lima, P.: Petri net models of robotic tasks. In: Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292), Vol. 4, pp. 4059–4064 (2002)
7. Mohanta, J. Ch., Parhi, D. R., Patel, S.K.: Path Planning Strategy for Autonomous Mobile Robot Navigation Using Petri-GA Optimisation. Comput. Electr. Eng., Vol. 37, No. 6, pp. 1058–1070 (2011)
8. Murata, T.: Petri nets: Properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 4, pp. 541–580 (1989)
9. Parhi, D.R., Mohanta, J.Ch.: Navigational Control of Several Mobile Robotic Agents Using Petri-potential-fuzzy Hybrid Controller. Appl. Soft Comput., Vol. 11, No. 4, pp. 3546–3557 (2011)
10. Perera, L. P., Carvalho, J. P., Guedes Soares, C.: Fuzzy logic based decision making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 84–99 (2011)
11. Terano, T., Asai, K., Sugeno, M.: Fuzzy Systems Theory and Its Applications. Academic Press Professional, Inc. (1992)
12. Wai, Rong-Jong, Liu, Chia-Ming, Lin, You-Wei: Robust path tracking control of mobile robot via dynamic petri recurrent fuzzy neural network. Soft Computing, Vol. 15, No. 4, pp. 743–767 (2010)

Ecuaciones inversas de filtros de reconstrucción perfecta

Oscar Herrera-Alcántara¹, María del Carmen E. Macías-Sánchez¹,
Miguel González-Mendoza²

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México,
México

² Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México,
México

oha@correo.azc.uam.mx, marycar81@hotmail.com, mgonza@itesm.mx

Resumen. En este trabajo presentamos las ecuaciones de filtros ortogonales de reconstrucción perfecta dependientes de un solo parámetro para el caso de longitud 4, así como sus ecuaciones inversas. Reportamos resultados experimentales que usan las ecuaciones inversas a fin de recuperar los valores de los parámetros. Los experimentos indican que sí es posible determinar los valores de los parámetros con alta precisión.

Palabras clave: wavelets, ecuaciones inversas de filtros paramétricos, respuesta al impulso, reconstrucción perfecta.

Inverse Equations of Perfect Reconstruction Filters

Abstract. We present the equations of four length perfect reconstruction orthogonal filters that depend of a single parameter, as well as their inverse equations. We report experimental results where the parameters are recovered with minimal error by applying the inverse equations.

Keywords: wavelets, inverse equations of parametric filters, response to the impulse, perfect reconstruction.

1. Introducción

Uno de los resultados más interesantes en el ámbito de la Transformada Wavelet Discreta (TWD) diádica es que se puede implementar con un banco de filtros que consta de un filtro pasabajas y un filtro pasaaltas. Estos filtros ortogonales de reconstrucción perfecta (FORP) suelen expresarse mediante un conjunto de coeficientes reales. Ejemplo de ello es el filtro Haar [12] de longitud dos, en donde el filtro pasabajas es $h = (h_0, h_1) = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ y el filtro pasaaltas

es $g = (g_0, g_1) = (\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})$. El conjunto de coeficientes de h y g representan la respuesta al impulso de los filtros (en el dominio temporal), que corresponden respectivamente a un filtro pasabajas y a un filtro pasaaltas (en el dominio de la frecuencia).

Un FORP de mayor longitud involucra un número par de coeficientes, y existe un número infinito de filtros que cumplen la propiedad de que al aplicarlos apropiadamente a una señal permiten recuperarla fielmente. La etapa de análisis de la señal consiste en aplicar los filtros h y g , en tanto que la fase de síntesis consiste en aplicar variantes de los filtros h y g al resultado de la fase de análisis, por lo que se puede decir que las fases de análisis y síntesis son procesos inversos.

En la práctica, la señal original y la reconstruida en la fase de síntesis, difieren en el error de precisión de la aritmética de punto flotante, pero en la literatura se les conoce como filtros de reconstrucción perfecta (FRP). Si además cumplen el criterio de ortogonalidad, se les llama filtros ortogonales de reconstrucción perfecta (FORP). Se han publicado varios FRP como los Daubechies, los Coiflets y los Symlets [1][2][14]. Y también se han publicado ecuaciones paramétricas de filtros que permiten generar FRP [11,16,15,13,8,10].

Sin embargo, continúa siendo relevante la siguiente pregunta: Dados los coeficientes de un FRP ¿qué parámetros le corresponden?

De esta forma, en el presente trabajo presentamos las ecuaciones inversas de FORP que devuelven el valor de los parámetros a partir de los coeficientes de la respuesta al impulso, específicamente de filtros de longitud 4.

La parametrización de FORP relacionados con funciones wavelets es de interés porque permite reducir el espacio de búsqueda en conjuntos de coeficientes que cumplan con la condición de reconstrucción perfecta, y toda vez que la construcción de wavelets como bases de funciones es relevante, tanto como lo son las funciones seno y coseno para el análisis de Fourier, solo que en este último las bases son exclusivamente senos y cosenos, y su forma está claramente definida, en tanto que en el análisis wavelets se pueden tener infinitas funciones base, muchas de ellas ligadas a FRP.

Como ya se mencionó, se han propuesto varios métodos para calcular FRP, de los cuales uno se debe a I. Daubechies [1] quien presentó filtros que generan funciones wavelet con el máximo número de sus momentos de desvanecimiento, los cuales se reflejan en la maximización de la regularidad de las funciones wavelet asociadas, es decir, generan las wavelets más “suaves” posiblemente construibles para una longitud de filtro dada.

Otro método de diseño de FRP es el algebraico [7], en donde se propone resolver ecuaciones derivadas de las condiciones de reconstrucción perfecta. El método algebraico da lugar a ecuaciones paramétricas que, para ciertos valores de parámetros, dan cabida a los FORP presentados por I. Daubechies.

Cabe mencionar que las ecuaciones inversas de FRP paramétricos de [7] ya se han aplicado, por ejemplo, en compresión de imágenes [3,4,5]. Lo que en este trabajo presentamos es la metodología de cómo obtener las ecuaciones inversas, una técnica de reparación para que los parámetros se mantengan en el intervalo

$[0, 2\pi)$, y estudios experimentales de algunas de sus propiedades, considerando los resultados obtenidos en [9].

El artículo está organizado de la siguiente manera, en la Sección 2 presentamos la metodología seguida en el presente trabajo de investigación, en la Sección 3 revisamos el método algebraico para obtener las ecuaciones paramétricas, en la Sección 4 calculamos las ecuaciones inversas de filtros de longitud 4, en la Sección 5 presentamos varios experimentos y sus resultados, y finalmente, en la Sección 6 presentamos conclusiones y trabajos futuros.

2. Metodología

En el estudio de las ecuaciones inversas de los FORP seguimos los siguientes pasos:

1. Revisamos las ecuaciones paramétricas que generan coeficientes de FORP,
2. Realizamos cálculos para despejar los parámetros, a partir de las ecuaciones del Paso 1, y les llamamos ecuaciones inversas,
3. Proponemos una técnica de reparación de los valores de los parámetros obtenidos de las ecuaciones inversas, de acuerdo a la periodicidad de las funciones seno y coseno, y a las propiedades de las funciones trigonométricas arco seno y arco coseno,
4. Realizamos experimentos con un programa de computadora para medir los errores de aproximación entre de los parámetros originales y los coeficientes recuperados con ecuaciones inversas.

3. Parametrización de filtros de reconstrucción perfecta

La parametrización de FORP ha sido abordada en trabajos previos. Además, se han propuesto varias parametrizaciones, así como métodos de parametrización. En [11] se discute la parametrización de coeficientes de funciones de escalamiento (ortogonales a las funciones wavelet) con varios momentos de desvanecimiento. En [16] se presentan parametrizaciones de wavelets ortonormales con soporte en el intervalo $[0, 2N - 1)$ en donde N es un entero par que involucra $N - 1$ parámetros que varían en el intervalo $[0, 2\pi)$.

En cuanto a aplicaciones de las ecuaciones paramétricas, en [3] se utilizan parametrizaciones de filtros y se presenta una técnica para calcular la mejor wavelet para una imagen dada. La técnica usada, calcula la relación señal a ruido y ajusta los coeficientes de los filtros (y por ende las funciones wavelet) dinámicamente para mejorar el desempeño en una aplicación de codificación. En [7] se presenta un método algebraico para parametrizar filtros de longitud 4, 6, 8 y 10, y se presentan valores específicos de parámetros que corresponden a los filtros publicados por I. Daubechies.

En [4] se aplica un algoritmo genético para determinar el conjunto de parámetros de filtros de longitud 4, 6, 8 y 10 en donde la función de aptitud maximiza

la cantidad de coeficientes wavelet despreciables, que generen el menor error de reconstrucción en imágenes en escalas de grises.

Ahora, el problema que abordamos consiste en lo siguiente: Dado un conjunto de coeficientes de filtros de reconstrucción perfecta conocer qué parámetros le corresponden.

Al respecto podemos mencionar que en [6] se presentan algunas ecuaciones paramétricas inversas que procuran responder la pregunta anterior, sin embargo, no se contempla el caso en el que los parámetros puedan estar fuera del rango $[0, 2\pi)$, y que por tanto requieran un “mecanismo de reparación”. Dado que este problema aún no ha sido ampliamente abordado, al menos tanto como el estudio de parametrizaciones, y tampoco se ha profundizado en la existencia de múltiples soluciones y sus propiedades, lo hemos tomado como motivación para esta investigación.

De esta forma, trabajamos con filtros de longitud 4, y estudiamos varias alternativas de solución para calcular los parámetros. También se propone un mecanismo de “reparación” para que los parámetros obtenidos con las ecuaciones inversas queden nuevamente en el rango $[0, 2\pi)$, tal como se asume en las ecuaciones paramétricas.

4. Ecuaciones inversas de filtros paramétricos

La parametrización para un cierto filtro no es única y, además, para una parametrización dada se pueden generar varias opciones de ecuaciones inversas, las cuales ponen el valor de los parámetros en función de los coeficientes de la respuesta al impulso. Por ejemplo, para el filtro de longitud 4 se tienen cuatro coeficientes h_0, h_1, h_2 y h_3 dados por:

$$h_0 = \frac{1}{4} + \frac{\cos \alpha}{2\sqrt{2}}, \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{1}{4} + \frac{\sin \alpha}{2\sqrt{2}}, \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{1}{4} - \frac{\cos \alpha}{2\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$h_3 = \frac{1}{4} - \frac{\sin \alpha}{2\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Que dependen del parámetro $\alpha \in [0, 2\pi)$. De (1) a (4) se puede despejar α en cada una de ellas y obtener respectivamente:

$$\alpha = \arccos(2\sqrt{2}(h_0 - \frac{1}{4})), \quad (5)$$

$$\alpha = \arcsin(2\sqrt{2}(h_1 - \frac{1}{4})), \quad (6)$$

$$\alpha = \arccos(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_2)), \quad (7)$$

$$\alpha = \arcsin(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_3)). \quad (8)$$

Cada una de las ecuaciones (5) a (8) puede dar un valor diferente para el parámetro α , inclusive ese valor puede estar fuera de rango $[0, 2\pi)$ dadas las propiedades de las funciones trigonométricas inversas involucradas. A continuación, revisamos el método de parametrización algebraica (ver [7]) para obtener las ecuaciones de FORP de longitud 4, para luego calcular sus respectivas inversas.

4.1. Parametrización de filtros de longitud 4

Se parte de la ecuación de reconstrucción perfecta

$$|H_n(z)|^2 + |H_n(-z)|^2 = 1, \quad (9)$$

en donde $H_n(z) = h_0 + h_1z + h_2z^2 + h_3z^3 + \dots + h_{n-1}z^{n-1}$ es un polinomio trigonométrico con n coeficientes h_i , con $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$. Para cuatro coeficientes se tiene que:

$$H_4(z) = h_0 + h_1z + h_2z^2 + h_3z^3. \quad (10)$$

Entonces, al desarrollar la ecuación (9) se obtiene:

$$2(h_0^2 + h_2^2 + h_1^2 + h_3^2) + 2(h_0h_2 + h_1h_3)z + 2(h_0h_2 + h_1h_3)z^2 = 1. \quad (11)$$

Y para lograr la reconstrucción perfecta se hace:

$$h_0^2 + h_2^2 + h_1^2 + h_3^2 = \frac{1}{2}, \quad (12)$$

además de:

$$h_0h_2 + h_1h_3 = 0. \quad (13)$$

Al sumar (12) con (13) multiplicado por (-2) se obtiene el cuadrado perfecto

$$(h_0 - h_2)^2 + (h_1 - h_3)^2 = \frac{1}{2}. \quad (14)$$

Entonces, por analogía con la identidad trigonométrica $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ se introduce un parámetro α , y se deduce que:

$$h_0 - h_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha \quad (15)$$

y

$$h_1 - h_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \alpha. \quad (16)$$

Puesto que $H_4(z = 1) = 1$ entonces

$$h_0 + h_1 + h_2 + h_3 = 1, \quad (17)$$

y considerando que $H_4(z = -1) = 0$ se obtiene

$$h_0 - h_1 + h_2 - h_3 = 0, \quad (18)$$

entonces, sumando (17) con (18) se tiene

$$h_0 + h_2 = \frac{1}{2}, \quad (19)$$

y substrayendo (18) de (17) se tiene

$$h_1 + h_3 = \frac{1}{2}, \quad (20)$$

que, al combinarlas con (15) y (16), nos llevan a las ecuaciones paramétricas (ver ecuaciones (1) a (4)) del FORP de longitud cuatro:

$$h_0 = \frac{1}{4} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \cos \alpha, \quad (21)$$

$$h_1 = \frac{1}{4} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \sin \alpha, \quad (22)$$

$$h_2 = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \cos \alpha, \quad (23)$$

$$h_3 = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \sin \alpha. \quad (24)$$

4.2. Ecuaciones inversas para parametrizaciones de filtros de longitud 4

Ahora, partiendo de las ecuaciones (21) a (24), determinaremos expresiones para α en términos de los coeficientes h_0 , h_1 , h_2 y h_3 , a las cuales nos referimos como ecuaciones inversas de los FORP.

Para ello, nótese que al restar h_0 y h_2 se tiene:

$$h_0 - h_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \alpha, \quad (25)$$

de donde se puede despejar α , así:

$$\alpha = \arccos(\sqrt{2}(h_0 - h_2)). \quad (26)$$

Restando h_1 y h_3 se tiene

$$h_1 - h_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \alpha, \quad (27)$$

de donde también se puede despejar α , entonces:

$$\alpha = \arcsin(\sqrt{2}(h_1 - h_3)). \quad (28)$$

Como se puede apreciar, existen al menos dos alternativas para calcular α . Otras alternativas para calcular α son mediante el despeje directo en (21) a (24) de donde se obtienen respectivamente:

$$\alpha = \operatorname{acos}(2\sqrt{2}(h_0 - \frac{1}{4})), \quad (29)$$

$$\alpha = \operatorname{asin}(2\sqrt{2}(h_1 - \frac{1}{4})), \quad (30)$$

$$\alpha = \operatorname{acos}(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_2)), \quad (31)$$

$$\alpha = \operatorname{asin}(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_3)). \quad (32)$$

Obsérvese que en (26) y en (28) se involucran dos coeficientes de los FORP en cada ecuación, en tanto que en (29), (30), (31) y (32) se involucra un único coeficiente en cada ecuación, por lo que no esperaríamos que puedan devolver en todos los casos exactamente los mismos valores, y para ello realizaremos resultados experimentales con cada una de ellas en la Sección 5.

4.3. Reparación de los parámetros

Debido a que los valores de los parámetros α obtenidos con las ecuaciones paramétricas inversas no son necesariamente positivos, se propone una técnica de reparación, que consiste en que para cada valor de α , se generen las variantes v siguientes:

$$v = |\alpha|, \quad (33)$$

$$v = (\pi + |\alpha|), \quad (34)$$

$$v = (\pi - |\alpha|), \quad (35)$$

$$v = (2\pi - |\alpha|), \quad (36)$$

$$v = (\frac{3}{2}\pi - |\alpha - \frac{1}{2}\pi|). \quad (37)$$

Y en los casos donde v es positivo, aplicamos la ecuación $v = v \bmod 2\pi$, en donde $\bmod 2\pi$ actúa como una generalización del módulo o residuo de la división entera (que aplica solo a números enteros positivos) pero en este caso se usa en una división con el número real 2π . Esto está justificado por la periodicidad de las funciones trigonométricas seno y coseno, y dado que las funciones trigonométricas inversas arco coseno y arco seno devuelven valores negativos y positivos. Para validar esta técnica de reparación, realizamos los experimentos de la Sección 5.

5. Experimentos y resultados

Acorde con la metodología de la Sección 2, realizamos varios experimentos por computadora con los siguientes pasos:

1. Generar un número aleatorio para α en el intervalo $[0, 2\pi)$ y con ello los coeficientes del FORP correspondiente,
2. Aplicar las ecuaciones paramétricas inversas para calcular los valores de α con varias alternativas dadas por las ecuaciones inversas,
3. Aplicar la reparación de los valores de α ,
4. Con los valores reparados de α calcular nuevamente las respuestas al impulso de los FORP,
5. Comparar los valores de parámetros del paso 1, con los del paso 4, y medir el error RMS,
6. Repetir N veces los pasos 1 a 6 para obtener errores promedio.

En los experimentos tomamos $N = 30^3 = 27000$, por lo que error RMS promedio indicará el error de aproximación entre el parámetro α de referencia y el calculado con las ecuaciones inversas, para las $N = 27,000$ iteraciones. Los seis experimentos realizados tomaron en cuenta las seis ecuaciones (26), (28), (29), (30), (31) y (32), las cuales se identifican como Experimento 1, Experimento 2, Experimento 3, Experimento 4, Experimento 5 y Experimento 6, respectivamente. En la Tabla 1, se muestran los resultados de los seis experimentos.

Tabla 1. Resultados experimentales con las ecuaciones inversas de filtros de longitud cuatro.

Experimento	Ecuación paramétrica inversa	Error RMS promedio entre α y α recuperada con ecuaciones inversas
1	$\alpha = \text{acos}(2\sqrt{2}(h_0 - \frac{1}{4}))$	2.76087359E-30
2	$\alpha = \text{asin}(2\sqrt{2}(h_1 - \frac{1}{4}))$	2.08134790E-29
3	$\alpha = \text{acos}(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_2))$	2.76075449E-30
4	$\alpha = \text{asin}(2\sqrt{2}(\frac{1}{4} - h_3))$	2.08134870E-29
5	$\alpha = \text{acos}(2\sqrt{2}(h_0 - h_2))$	2.76104429E-30
6	$\alpha = \text{asin}(2\sqrt{2}(h_1 - h_3))$	2.08135582E-29

De la Tabla 1 se puede ver que:

- Los errores RMS para los parámetros α son muy pequeños,
- Los RMS más grandes se dan en los Experimentos 2, 4 y 6 que difieren en un orden de magnitud ($E - 30$ vs. $E - 29$) con los Experimentos 1, 3 y 5.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Los filtros ortogonales de reconstrucción perfecta tienen utilidad en el análisis tiempo-frecuencia de señales porque con ellos se puede calcular la transformada wavelet discreta, en forma rápida y eficiente.

Un tema de investigación relacionado con el diseño de filtros digitales de reconstrucción perfecta es conocer ecuaciones paramétricas, a partir de las cuales se puedan obtener funciones wavelets con características específicas para el análisis de señales, y el método algebraico provee una solución a este problema.

Hemos aportado en la investigación de cómo calcular el parámetro que le corresponde a un filtro de reconstrucción perfecta, y presentamos como caso particular el análisis de un filtro de longitud 4 con un único parámetro, sin embargo, la metodología desarrollada puede aplicarse a filtros de mayor longitud.

Los resultados experimentales indican que sí es posible calcular los valores de los parámetros en el intervalo $[0, 2\pi)$ aplicando las ecuaciones inversas y una técnica de reparación validada experimentalmente.

Como trabajo futuro esperamos presentar más resultados con filtros de mayor longitud, y aplicaciones en el procesamiento de multimedios.

Referencias

1. Daubechies, I.: Ten Lectures on Wavelets. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA (1992)
2. Daubechies, I.: Orthonormal bases of compactly supported wavelets ii. variations on a theme. *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 24(2), 499–519 (1993)
3. Hereford, J., Roach, D., Pigford, R.: Image compression using parameterized wavelets with feedback (2003)
4. Herrera, O.: On the Best Evolutionary Wavelet Based Filter to Compress a Specific Signal. In: *Advances in Soft Computing - 9th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2010, Pachuca, Mexico, November 8-13, 2010, Proceedings, Part II*. pp. 394–405 (2010)
5. Herrera, O., González, M.: Optimization of Parameterized Compactly Supported Orthogonal Wavelets for Data Compression. In: *Advances in Soft Computing - 10th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2011, Puebla, Mexico, November 26 - December 4, 2011, Proceedings, Part II*. pp. 510–521 (2011)
6. Herrera, O., Mora, R.: Aplicación de Algoritmos Genéticos a la Compresión de Imágenes con Wavelets. In: *Avances Recientes en Sistemas Inteligentes*. pp. 157–166. Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial (2011)
7. Lai, M.J., Roach, D.W.: Parameterizations of Univariate Orthogonal Wavelets With Short Support. Vanderbilt University Press (2002)
8. Lina, J.M., Mayrand, M.: Parameterizations for Daubechies wavelets. *Phys. Rev. E* 48, R4160–R4163 (Dec 1993), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.48.R4160>
9. Macías, M.C., Herrera, O.: Cálculo de parámetros de filtros paramétricos de reconstrucción perfecta. Tech. rep., UAM (2016)
10. Pollen, D.: Parameterization of compactly supported wavelets. Aware, Inc. (AD890503.1.4) (1989)

11. Regensburger, G.: Parametrizing compactly supported orthonormal wavelets by discrete moments. *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing* 18(6), 583–601 (2007)
12. Resnikoff, H.L., Wells, R.O.: *Wavelet Analysis: The Scalable Structure of Information*. Springer-Verlag (1998)
13. Schneid, J., Pittner, S.: On the parametrization of the coefficients of dilation equations for compactly supported wavelets. *Computing* 51(2), 165–173 (1993)
14. Soman, K., Resmi, N., Ramachandran, K.: *Insight Into Wavelets: from Theory to Practice*. PHI Learning (2010)
15. Wells, R.: Parametrizing smooth compactly supported wavelets. *Trans. Am. Math. Soc.* 338(2), 919–931 (1993)
16. Zou, H., Tewfik, A.: Parametrization of compactly supported orthonormal wavelets. *IEEE Trans. Signal Process.* 41(3), 1428–1431 (1993)

Impreso en los Talleres Gráficos
de la Dirección de Publicaciones
del Instituto Politécnico Nacional
Tresguerras 27, Centro Histórico, México, D.F.
noviembre de 2017
Printing 500 / Edición 500 ejemplares

