

La mecatrónica y sus aplicaciones

Durán-Fonseca, Miguel. PhD

Charre-Ibarra, Saida. PhD

Alcalá-Rodríguez, Janeth. PhD

Gudiño-Lau, Jorge. PhD



ECORFAN®

Autores

Durán-Fonseca, Miguel. PhD
Charre-Ibarra, Saida. PhD
Alcalá-Rodríguez, Janeth. PhD
Gudiño-Lau, Jorge. PhD

Editor en Jefe

Vargas-Delgado, Oscar. PhD

Director Ejecutivo

Ramos-Escamilla, María. PhD

Director Editorial

Peralta-Castro, Enrique. MsC

Diseñador Web

Escamilla-Bouchan, Imelda. PhD

Programador web

Luna-Soto, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

Rosales-Borbor, Eleana. BsC

Filólogo

Ramos-Arancibia, Alejandra. BsC

ISBN: 978-607-8948-47-5

Sello editorial ECORFAN: 978-607-8948

Número de Control B: 2024-06

Clasificación B (2024): 151224-0101

©ECORFAN-México, S.C.

Parque Pedregal Empresarial 3580 - Boulevard Adolfo Ruiz Cortines, CP-01900. San Jerónimo Aculco Álvaro Obregón - Ciudad de México.

Ninguna parte de este escrito protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en forma alguna ni por ningún medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a, los siguientes: Citas en artículos de recopilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos y comentarios bibliográficos. Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor. Infracciones: Estar obligado a perseguir conforme a la legislación mexicana en materia de derechos de autor. El uso de nombres descriptivos generales, nombres registrados, marcas o nombres comerciales en esta publicación no implica, aún en ausencia de una declaración específica, que tales nombres estén exentos de la protección correspondiente en las leyes y reglamentos de México y por lo tanto sean libres para uso general por la comunidad científica internacional. HESPCU forma parte de ECORFAN Media [www.ecorfan.org]. Publicado por ECORFAN-México. Todos los derechos reservados.

Trabajos derivados: Los usuarios pueden reproducir tablas de contenido o preparar listas de capítulos incluyendo resúmenes para circulación interna dentro de sus instituciones o empresas. A excepción de los capítulos publicados bajo la licencia CC BY.

Almacenamiento o uso: Salvo lo indicado anteriormente o lo establecido en la correspondiente licencia de uso, ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en un sistema de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, grabación o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito del editor.

Los Autores. Publicado por ECORFAN-México, S.C. para su Holding México en nombre de Book. Este es un manual de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Books

Definición de Book

Objetivos científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología e Innovación en las áreas de investigación del CONAHCYT y PRODEP.

ECORFAN-México, S.C. es una Empresa Científica y Tecnológica en contribución a la formación de Recursos Humanos enfocada a la continuidad en el análisis crítico de la Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT del CONAHCYT con el número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio en México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación seriada en Nichos Científicos de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de Ciencia y Tecnología - Centros de Investigación del CONAHCYT.

Alcance, Cobertura y Audiencia

Books es un producto editado por ECORFAN-México S.C. en su Holding con repositorio en México, es una publicación científica arbitrada e indizada. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos mediante el método de doble ciego, sobre temas relacionados con la teoría y la práctica de las áreas de investigación del CONAHCYT y PRODEP respectivamente con diversos enfoques y perspectivas, que contribuyen a la difusión del desarrollo de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación que permiten argumentar relacionados con la toma de decisiones e incidir en la formulación de políticas internacionales en el campo de la Ciencia. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá del ámbito académico e integra otros segmentos de investigación y análisis fuera de ese campo, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

Rocha - Rangel, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory

Carbajal - De La Torre, Georgina. PhD
Université des Sciences et Technologies de Lille

Guzmán - Arenas, Adolfo. PhD
Institute of Technology

Castillo - Téllez, Beatriz. PhD
University of La Rochelle

Fernandez - Zayas, José Luis. PhD
University of Bristol

Dector - Espinoza, Andrés. PhD
Centro de Microelectrónica de Barcelona

Teloxa - Reyes, Julio. PhD
Advanced Technology Center

Hernández - Prieto, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

Cendejas - Valdez, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

Hernandez - Escobedo, Quetzalcoatl Cruz. PhD
Universidad Central del Ecuador

Comité Arbitral

Olvera - Mejía, Yair Félix. PhD
Instituto Politécnico Nacional

Loeza - Valerio, Roberto. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Uruapan

Alvarez - Sánchez, Ervin Jesús. PhD
Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada

Salazar - Peralta, Araceli. PhD
Universidad Autónoma del Estado de México

Morales - Carbajal, Carlos. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

Bautista - Vargas, María Esther. PhD
Universidad Autónoma de Tamaulipas

Gaxiola - Pacheco, Carelia Guadalupe. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

González - Jasso, Eva. PhD
Instituto Politécnico Nacional

Flores - Ramírez, Oscar. PhD
Universidad Politécnica de Amozoc

Arroyo - Figueroa, Gabriela. PhD
Universidad de Guadalajara

Cesión de derechos

El envío de una Obra Científica a ECORFAN Books emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones científicas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación de la Obra Científica y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONAHCYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor de la Obra Científica.

Detección de Plagio

Todas las Obras Científicas serán testeadas por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirá de la recepción de la Obra Científica notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todas las Obras Científicas se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONAHCYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del ECORFAN Books con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial-Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de la Obra Científica Modificado para Edición-Publicación

La mecatrónica y sus aplicaciones

El Book ofrecerá contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyen a la actividad de divulgación científica de la Universidad de Colima e Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán en sus áreas de Ingeniería. Además de contar con una evaluación completa, a cargo de los coordinadores de la Universidad de Colima e Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, de la calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada con estándares internacionales [V|LEX, RESEARCH GATE, MENDELEY, GOOGLE SCHOLAR y REDIB], el Book propone así a la comunidad académica, informes recientes sobre nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de Ingeniería.

La mecatrónica y sus aplicaciones

Books

Autores

Durán-Fonseca, Miguel. PhD

Charre-Ibarra, Saida. PhD

Alcalá-Rodríguez, Janeth. PhD

Gudiño-Lau, Jorge. PhD

Universidad de Colima
Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán

Diciembre 2024

DOI: <https://doi.org/10.35429/B.2024.6.1.77>



Prólogo

La mecatrónica, como disciplina integradora de la mecánica, la electrónica, la informática y el control, ha revolucionado el desarrollo tecnológico en múltiples sectores, transformando no sólo la industria sino también la vida cotidiana. Este libro, *La mecatrónica y sus aplicaciones*, reúne cuatro proyectos representativos de cómo esta área del conocimiento puede abordar problemas complejos y ofrecer soluciones innovadoras, sostenibles y de alto impacto.

El primer capítulo se centra en el control de posición angular de un motor de corriente directa (CD) de imanes permanentes. A través de una comparación entre técnicas clásicas, como el controlador proporcional-derivativo (PD), e inteligentes, como las redes neuronales artificiales NARMA-L2, se destacan las ventajas de estas últimas en términos de adaptabilidad y precisión. Este enfoque ilustra el potencial de la inteligencia artificial para mejorar el desempeño de sistemas no lineales.

En el segundo capítulo, se explora el diseño y construcción de un sistema mecatrónico para la limpieza autónoma de superficies horizontales. Este proyecto refleja la integración de tecnologías como la navegación autónoma, la detección de obstáculos y la aspiración eficiente, respondiendo a la creciente demanda de soluciones automatizadas en el ámbito doméstico.

El tercer capítulo aborda un problema ambiental crucial: la conservación de los ecosistemas marinos. A través del diseño de un sistema embebido para la creación y monitoreo de hábitats artificiales marinos, se propone una solución innovadora que combina tecnología fotovoltaica y estructuras modulares para fomentar el crecimiento coralino, demostrando el potencial de la mecatrónica para contribuir al desarrollo sostenible.

Finalmente, el cuarto capítulo presenta un prototipo de robot móvil seguidor de líneas, empleando visión artificial y control PID. Este proyecto no solo resalta el uso de tecnologías accesibles y de código abierto, sino que también busca inspirar a las nuevas generaciones a incursionar en áreas como la robótica y la mecatrónica, promoviendo un aprendizaje práctico y creativo.

A lo largo de estos capítulos, *La mecatrónica y sus aplicaciones* no solo expone los principios técnicos detrás de cada proyecto, sino que también pone de manifiesto cómo esta disciplina puede resolver problemas reales, desde optimizar tareas cotidianas hasta enfrentar desafíos ambientales. Este libro está dirigido a estudiantes, investigadores y profesionales interesados en explorar el impacto transformador de la mecatrónica, sirviendo como un puente entre la teoría y la práctica para impulsar el desarrollo tecnológico en diversos campos.

*Durán-Fonseca, Miguel. PhD
Diciembre 30, 2024*

Contenido

Control de posición angular de un motor de corriente directa de imanes permanentes utilizando redes neuronales	1
Angular position control of a permanent magnet direct current motor using artificial neural networks	1
Abstract	2
Resumen	2
1. Introducción	3
2. Motores de Corriente Directa de Imanes Permanentes	3
3. Control PD de Posición Angular en motores de corriente directa de imanes permanentes	6
4. Controlador basado en redes neuronales NARMA-L2	9
5. Conclusiones	17
Declaraciones	18
Referencias	19
Sistema mecatrónico para limpieza de superficies	21
Mechatronic system for surface cleaning	21
Abstract	22
Resumen	22
1. Introducción	23
2. Robots aspiradores	24
3. Diseño y construcción del prototipo	29
4. Programación del robot	35
5. Resultados	35
6. Conclusiones	38
Diseño de un sistema embebido para el desarrollo y monitoreo de un hábitat artificial	41
Embedded System Design for Developing and Monitoring an Artificial Marine Habitat	41
Abstract	42
Introducción	43
Control de un robot móvil mediante visión artificial: seguidor de líneas	60
Controlling a mobile robot using artificial vision: line follower	60
Abstract	61
Objective	61
Methodology	61
Contribution	61
Resumen	62
Objetivo	62
Metodología	62
Contribución	62
Introducción	63
Conclusiones	76
Declaraciones	76

Control de posición angular de un motor de corriente directa de imanes permanentes utilizando redes neuronales

Angular position control of a permanent magnet direct current motor using artificial neural networks

Durán-Fonseca, Miguel-Angel*^a, Ramos-Vázquez, Dariana^b, Gudiño-Lau, Jorge^c y Jalomo-Cuevas, Jaime^d

^a  Universidad de Colima •  LTD-9495-2024 •  0000-0002-0780-6192

^b  Universidad de Colima •  0009-0008-2359-5082

^c  Universidad de Colima •  Q-6844-2018 •  0000-0002-0585-908X •  122644

^d  Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán •  0000-0003-0246-299X

Clasificación CONAHCYT:

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería Electrónica

Subdisciplina: Control

Key Books

Los autores del libro forman parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Colima (Institución Pública y Autónoma de México) y del cuerpo académicos UCOL-CA-21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos reconocido por la SES-SEP En Consolidación. El nivel habilitación de sus integrantes es: 75% tienen el grado de doctor, el 100% tienen PRODEP y el 25% pertenece al CONAHCYT SNI I. El primer Capítulo aborda la parte de redes neuronales artificiales específicamente el controlador NARMA-L2, mejora significativamente el desempeño en el control de posición angular de motores de corriente directa. Este enfoque supera las limitaciones de métodos clásicos como el controlador PD, al ofrecer mayor precisión y adaptabilidad frente a perturbaciones y variaciones de carga. El sistema mecatrónico para la limpieza de superficies es detallado en Capítulo 2, con el diseño y construcción de un robot aspirador que integra la detección de obstáculos. El sistema propuesto mejora la eficiencia en la limpieza de espacios reducidos y responde a la creciente demanda de soluciones automatizadas en el hogar, además de sugerir futuras líneas de trabajo que incluyen la optimización de la programación de la trayectoria del robot. Un sistema embebido innovador que combina tecnología fotovoltaica y sensores para monitorear y promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales; es mostrado en el Capítulo 3. La principal contribución es la integración de un sistema de monitoreo en tiempo real con estructuras modulares, diseñadas específicamente para optimizar el anclaje y el desarrollo de corales. Este enfoque escalable y sostenible representa un avance significativo en los esfuerzos de regeneración de ecosistemas marinos, abordando de manera efectiva los retos actuales que enfrentan los arrecifes de coral. Y por último, en el Capítulo 4 se desarrolla un robot móvil autónomo de bajo costo con tracción diferencial, diseñado para seguir líneas mediante visión artificial avanzada. Se propone una estrategia robusta para detectar líneas y calcular su posición en píxeles, que alimenta directamente el lazo de control para asegurar la trayectoria del robot. El sistema utiliza un celular para identificar continuamente la línea y ajustar la velocidad del robot. Este libro busca fomentar el interés y la generación de Ciencia y Tecnología en los jóvenes de Educación Media y Superior, en el área de las Ingenierías como Mecatrónica, Electrónica, Robótica, Mecánica e Inteligencia Artificial.

Citación: Durán-Fonseca, Miguel-Angel, Ramos-Vázquez, Dariana, Gudiño-Lau, Jorge y Jalomo-Cuevas, Jaime. 2024. Control de posición angular de un motor de corriente directa de imanes permanentes utilizando redes neuronales. 1-20. ECORFAN.

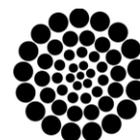
* ✉ mduran@ucol.mx

Book shelf URL: <https://www.ecorfan.org/books.php>



ISBN 978-607-8948-47-5 /© 2009 The Author[s]. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Book MMP. This is an open access book under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee **MARVID**[®] - in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



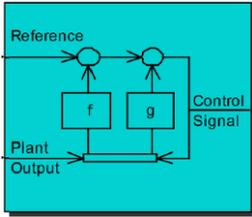
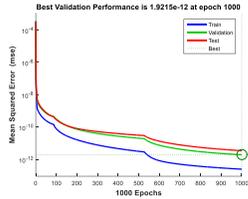
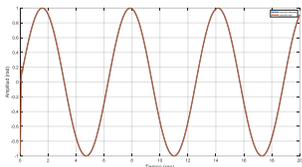
RENIECYT

Registro Nacional de Instituciones y
Empresas Científicas y Tecnológicas

1702902 CONAHCYT

Abstract

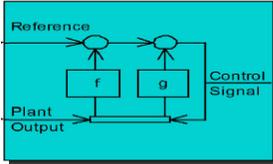
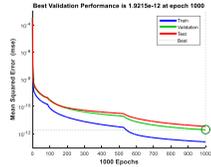
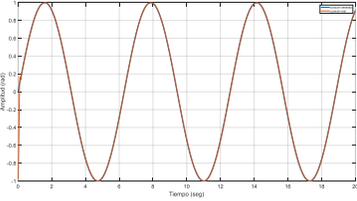
This chapter addresses angular position control in permanent magnet direct current (PMDC) motors. It explores the fundamentals of PMDC motors and the mathematical modeling necessary for their analysis and control. Initially, the proportional-derivative (PD) controller, one of the most widely used methods for position control applications, is presented. The basic principles of the PD controller are discussed, along with simulation and experimental results, highlighting its performance under ideal conditions and its limitations in the presence of external disturbances and load variations. Next, a control approach based on artificial neural networks is introduced, emphasizing its adaptability and accuracy in response to changing operational conditions. The structure of the neural network used for angular position control is described, as well as the training process and key parameters that enable its effective implementation in the motor. Finally, performance comparisons between the two control approaches are presented, demonstrating how neural networks can overcome the limitations of classical controllers in complex and variable scenarios, optimizing system accuracy and stability.

Design and Implementation of an Embedded Data Logger for MAP Sensors in Automotive Systems		
Objetivo	Methodology	Contribution
<p>To present a methodology based on artificial neural networks NARMA-L2, for angular position control in permanent magnet direct current motors</p> <p>NARMA-L2 Controller</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Design of the NARMA-L2 Controller 2. Training and Validation of the Controller 3. Implementation and Simulation 	<p>The implementation of artificial intelligence techniques in dynamic system control</p> 

Neural networks, PD control, PMDC motors

Resumen

Este capítulo aborda el control de posición angular en motores de corriente directa (CD) de imanes permanentes. Se exploran los fundamentos del motor CD de imanes permanentes y su modelo matemático necesario para su análisis y control. En primera instancia, se presenta el control clásico proporcional-derivativo (PD), uno de los métodos más utilizados para aplicaciones de control de posición. Se discuten los principios básicos del controlador PD y se presentan resultados de simulación y experimentales, destacando su desempeño en condiciones ideales y sus limitaciones en presencia de perturbaciones externas y variaciones de carga. A continuación, se introduce el enfoque de control basado en redes neuronales artificiales, destacando su capacidad de adaptación y precisión frente a condiciones operativas cambiantes. Se describe la estructura de la red neuronal empleada para el control de posición angular, así como el proceso de entrenamiento y los parámetros esenciales que permiten su implementación efectiva en el motor. Finalmente, se presentan comparaciones de rendimiento entre ambos enfoques de control, demostrando cómo las redes neuronales pueden superar las limitaciones de los controladores clásicos en escenarios complejos y variables, optimizando la precisión y estabilidad del sistema.

Control de Posición Angular de un Motor de Corriente Directa de Imanes Permanentes Utilizando Redes Neuronales		
Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Presentar una metodología basada en redes neuronales artificiales NARMA-L2, para el control de posición angular en motores de corriente directa de imanes permanentes</p> <p>NARMA-L2 Controller</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diseño del controlador NARMA-L2 2. Entrenamiento y validación del controlador 3. Implementación y simulación 	<p>Implementación de técnicas de inteligencia artificial en el control de sistemas dinámicos</p> 

Redes neuronales, Control PD, Motor de CD de imanes permanentes

1. Introducción

En las últimas décadas, el campo del control automático ha evolucionado significativamente, abriendo nuevas posibilidades para el desarrollo de estrategias avanzadas capaces de enfrentar las demandas de precisión, adaptabilidad y eficiencia de sistemas complejos. Una de las herramientas que ha ganado relevancia en este contexto es el uso de redes neuronales artificiales (RNAs) (Vázquez et al, 2024). Estas redes, inspiradas en el funcionamiento del cerebro humano, ofrecen un enfoque poderoso para el diseño de controladores capaces de aprender y adaptarse a dinámicas no lineales, inciertas y altamente variables, características que son comunes en sistemas industriales y procesos de automatización (Narendra & Parthasarathy, 1990; Hunt et al., 1992).

A diferencia de los métodos de control tradicionales, los cuales requieren un conocimiento detallado del modelo matemático del sistema, las RNAs permiten implementar estrategias de control basadas en aprendizaje. Las redes neuronales pueden ser entrenadas con datos experimentales o simulados, lo que posibilita su aplicación en sistemas cuyo modelo matemático es difícil de obtener o resulta costoso de calcular en tiempo real (Psichogios & Ungar, 1992). Este enfoque basado en datos facilita el diseño de controladores robustos y adaptativos, ajustándose dinámicamente a los cambios en las condiciones de operación y a las variaciones de parámetros internos del sistema.

Entre las principales ventajas de utilizar RNAs en el control de sistemas destacan las siguientes:

1. **Capacidad de Aproximación de Funciones No Lineales:** Las RNAs poseen una estructura adecuada para aproximar funciones no lineales de alta complejidad, lo cual es particularmente útil en aplicaciones de control donde las relaciones de entrada-salida no siguen una forma lineal o son desconocidas (Chen et al., 1990).
2. **Adaptabilidad y Aprendizaje en Línea:** En escenarios donde las características del sistema pueden cambiar con el tiempo, como en procesos industriales o robóticos, las RNAs pueden ajustarse continuamente mediante algoritmos de aprendizaje en línea, optimizando el desempeño del sistema sin necesidad de detener su operación (Miller et al., 1991).
3. **Robustez ante Incertidumbres:** Las RNAs muestran una mayor tolerancia a perturbaciones e incertidumbres en comparación con los controladores tradicionales. Esta propiedad es esencial en sistemas donde las variables externas o los errores de medición pueden afectar significativamente el comportamiento del sistema controlado.
4. **Versatilidad en Diferentes Estrategias de Control:** Las RNAs pueden implementarse en diversas estrategias de control, incluyendo control PID adaptativo, control predictivo, y control en tiempo real, entre otros. Esta flexibilidad permite que se adapten a las necesidades específicas de cada aplicación, maximizando la eficiencia y efectividad del sistema (Hunt et al., 1992).

Como resultado, las redes neuronales artificiales han encontrado aplicaciones exitosas en una variedad de sectores, incluyendo la robótica, la industria automotriz, y el control de sistemas eléctricos. Su uso en el control de motores eléctricos, en particular, ofrece una alternativa eficaz frente a métodos convencionales debido a su capacidad de gestionar la no linealidad inherente y responder con precisión a variaciones en las condiciones de operación. En este capítulo, se explora el control de un motor de corriente directa de imanes permanentes mediante el uso de una red neuronal artificial, describiendo tanto los fundamentos teóricos como los detalles de implementación de esta estrategia.

2. Motores de Corriente Directa de Imanes Permanentes

Los motores de corriente directa de imanes permanentes (PMDC, por sus siglas en inglés) son dispositivos electromecánicos que convierten energía eléctrica en mecánica mediante la interacción entre un campo magnético permanente y la corriente en el bobinado del rotor. En estos motores, el campo magnético es generado por imanes permanentes, lo que elimina la necesidad de devanados en el estator y simplifica el diseño del motor, permitiendo su uso en aplicaciones de precisión, como el control de posición angular (Gilliam, 1990). Los motores PMDC se caracterizan por su eficiencia energética, respuesta rápida y control preciso, siendo ideales para sistemas de posicionamiento en robótica y dispositivos médicos, entre otras aplicaciones (Hendershot & Miller, 1994).

El módulo servo rotatorio SRV02 QUANSER utilizado se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, consiste en un motor de corriente directa de imanes permanentes que está encerrado en una estructura sólida de aluminio con un juego de engranes planetario. El motor tiene su propia caja de cambios interna que maneja mecanismos externos. El SRV02 está equipado con 3 sensores: potenciómetro, encoder y tacómetro. Los sensores potenciómetro y encoder miden la posición angular del engranaje de carga y el tacómetro puede ser usado para medir su velocidad (Apkarian, Lévis, & Gurocak, 2011).

Box 1



Figura 1

Sistema SRV02 de Quanser

Fuente de Consulta: (Apkarian, Lévis, & Gurocak, 2011)

Para el análisis y control de un motor PMDC, se establece un modelo matemático que representa su comportamiento dinámico en términos de su respuesta a entradas de tensión y las relaciones con la velocidad y posición angular del rotor. Este modelo se describe mediante ecuaciones diferenciales que consideran el circuito eléctrico y la dinámica mecánica del sistema (Krause et al., 2010), (Apkarian, Lévis, & Gurocak, 2011).

El diagrama del circuito esquemático de la armadura del motor se muestra en la figura 2, donde V_m es el voltaje aplicado al motor, I_m es la corriente del motor, R_m es la resistencia del motor, L_m es la inductancia del motor, e_b es el voltaje contraelectromotriz, ω_l es la velocidad angular del eje de carga, J_{eq} es el momento de inercia equivalente del sistema, B_{eq} es el coeficiente de fricción viscosa equivalente del sistema y τ_m es el par desarrollado por el motor. El motor incluye un juego de engranes con una relación K_g y una eficiencia η_g .

Box 2

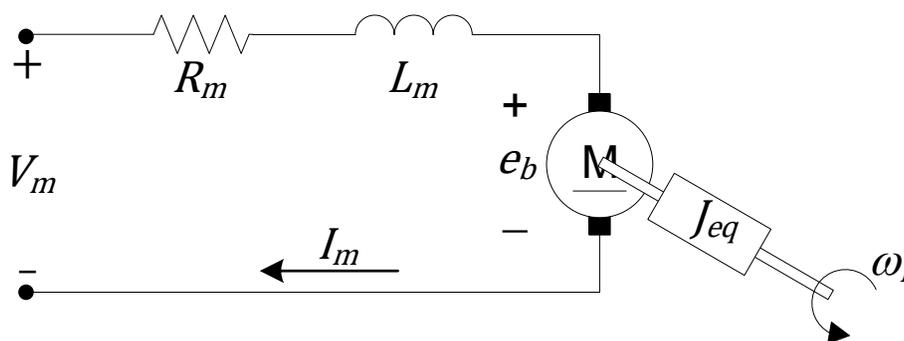


Figura 2

Diagrama del motor

Tomando en cuenta que el voltaje contraelectromotriz está dado por $e_b = k_m K_g \omega_l$, donde k_m es la constante del motor, al aplicar la Ley de Voltaje de Kirchoff se tiene:

$$V_m - R_m I_m - L_m \frac{dI_m}{dt} - k_m K_g \omega_l = 0 \quad (1)$$

Despejando la derivada de la corriente, obtenemos el modelo de la parte eléctrica del motor

$$\frac{dI_m}{dt} = -\frac{R_m}{L_m} I_m - \frac{k_m K_g}{L_m} \omega_l + \frac{1}{L_m} V_m \quad (2)$$

Aplicando la segunda ley de Newton a la parte mecánica del motor, se obtiene:

$$\eta_g K_g \tau_m - B_{eq} \omega_l = J_{eq} \frac{d\omega_l}{dt} \quad (3)$$

El par del motor es igual a $\tau_m = \eta_m k_m I_m$, donde η_m es la eficiencia del motor. Por tanto, al despejar la derivada de la velocidad angular, y agregando la ecuación de la derivada de la posición angular, se obtiene el modelo de la parte mecánica del motor:

$$\frac{d\omega_l}{dt} = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_m}{J_{eq}} I_m - \frac{B_{eq}}{J_{eq}} \omega_l \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_l}{dt} = \omega_l$$

El modelo matemático en espacios de estado del motor está dado por las ecuaciones (2) y (4). Estas ecuaciones representan el modelo completo del motor y proporcionan una base para el diseño de estrategias de control de posición angular. Este modelo es el utilizado en este capítulo para el diseño, sintonización y simulación de controladores para el motor.

Los parámetros proporcionados por el fabricante para el motor se presentan en la Tabla 1.

Box 3

Tabla 1

Parámetros del motor

Variable	Descripción	Valor
R_m	Resistencia de armadura	2.6 Ω
L_m	Inductancia de armadura	0.18 mH
k_m	Constante del motor	7.68×10^{-3} N m/A ó V/(rad/s)
K_g	Relación de los engranajes	70
η_g	Eficiencia de los engranajes	0.90
η_m	Eficiencia del motor	0.69
J_{eq}	Momento de inercia equivalente	9.76×10^{-5} kg m ²
B_{eq}	Coefficiente de fricción equivalente	0.015 N m / (rad/seg)

Fuente de Consulta: (Apkarian, Lévis, & Gurocak, 2011)

Los principales desafíos en el control de posición angular de motores PMDC incluyen:

- **No linealidad en el Comportamiento Dinámico:** Las relaciones no lineales entre la corriente, el torque y la velocidad angular complican el control de precisión.
- **Efecto de las Cargas Variables:** Variaciones de carga afectan la velocidad y posición del rotor, demandando controladores adaptativos para mitigar oscilaciones.
- **Sensibilidad a las Perturbaciones Externas:** Cambios en las condiciones de operación pueden alterar el rendimiento, dificultando el control estable.

- **Requerimientos de Precisión en Control de Posición Angular:** Los sistemas de control deben ser lo suficientemente precisos para corregir cualquier desviación de posición en aplicaciones sensibles.

Algunos de los métodos de control tradicionales aplicados a motores de CD

1. **Control PID:** Este controlador es ampliamente utilizado en aplicaciones de posicionamiento angular debido a su simplicidad y precisión básica. Sin embargo, en presencia de perturbaciones, su rendimiento puede verse comprometido (Astrom & Hagglund, 1995).
2. **Control Adaptativo:** Útil en sistemas con parámetros variables, el control adaptativo ajusta las ganancias en función de las condiciones operativas. Este método permite mantener estabilidad y rendimiento ante cambios de carga, aunque puede limitarse en condiciones de alta incertidumbre (Sastry et al, 1990).
3. **Control por Realimentación de Estado:** Este método permite calcular una entrada de control óptima utilizando las variables de estado del sistema. Requiere un conocimiento detallado del modelo, lo cual es desafiante cuando los parámetros son inciertos o difíciles de medir (Khalil, 2002).

Si bien estos métodos tradicionales pueden satisfacer los requisitos de control en muchos casos, el desempeño se ve afectado por la no linealidad y las incertidumbres en la operación del motor. En consecuencia, las técnicas basadas en redes neuronales ofrecen una solución avanzada para el control de posición angular, al proporcionar mayor robustez y adaptabilidad en situaciones de operación variables.

3. Control PD de Posición Angular en motores de corriente directa de imanes permanentes

El controlador proporcional-derivativo (PD) es un enfoque clásico de control de posición angular ampliamente utilizado debido a su simplicidad y efectividad en aplicaciones de control de posición. En el control PD, la señal de control se calcula con base en la desviación de posición actual del sistema del valor deseado (error) y su tasa de cambio, ofreciendo una combinación de corrección proporcional y amortiguación derivativa que permite reducir el error de manera eficiente y minimizar oscilaciones (Ogata, 2010).

La ecuación que describe el control PD es la siguiente:

$$u = k_p e + k_d \frac{de}{dt} \quad (5)$$

donde:

- e es la entrada al controlador, la cual, es el error obtenido de la diferencia entre la señal deseada y la señal medida.
- u es la salida del controlador
- k_p y k_d son las ganancias proporcional y derivativa respectivamente.

En particular para el controlador PD del motor PMDC:

$$e = e_\theta = \theta_d - \theta_l$$

$$k_p = 85$$

$$k_d = 1.3$$

θ_d es el valor deseado para el ángulo del eje de carga del motor.

Para el motor de corriente directa de imanes permanentes, el control PD se utiliza para ajustar la posición angular del rotor en tiempo real. Las ganancias k_p y k_d se calibran en función de la dinámica del motor y la carga esperada para asegurar un rendimiento óptimo. El valor de k_p controla la velocidad de corrección del error de posición, mientras que k_d se ajusta para evitar sobreoscilaciones y reducir el tiempo de asentamiento. Esto permite al motor alcanzar la posición deseada de manera precisa y estable dentro de un margen aceptable de error.

La simulación del controlador PD aplicado al motor PMDC se lleva a cabo utilizando un modelo matemático del sistema, como el descrito en la sección anterior. El diagrama de bloques para la simulación del controlador se muestra en la figura 3. Para el bloque “Motor” se utilizaron las ecuaciones (2) y (4), y para el bloque “PD Motor” se utilizó la ecuación (5) con los valores de ganancias proporcional y derivativa mencionadas anteriormente. Cabe señalar que la salida del controlador está acotada a los valores permitidos del sistema. La salida del controlador PD es el voltaje aplicado al motor y está limitado a $\pm 10V$ por medio del bloque “Amplifier Saturation (V)”.

Box 4

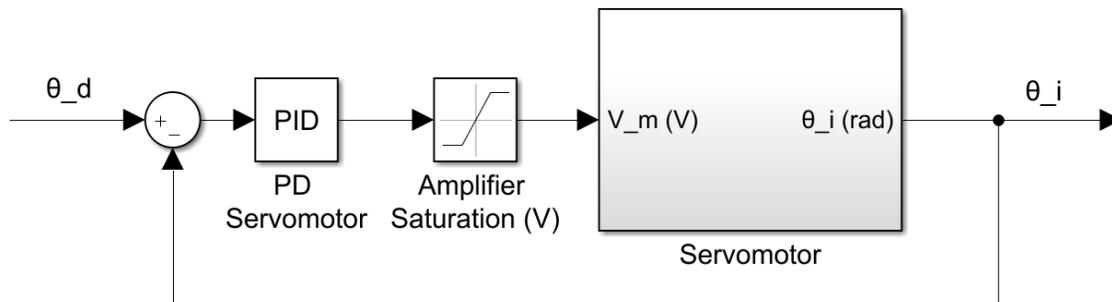


Figura 3

Diagrama de bloques del controlador PD

Los resultados de simulación se presentan en las siguientes figuras. La señal de referencia usada es una señal senoidal de amplitud 1 rad y una frecuencia angular de 1 rad/seg. En la figura 4 se muestran la señal de referencia (posición deseada) y la salida del motor (posición real). En la figura 5 se muestran la señal de error de posición angular del motor, la cual oscila entre ± 0.055 rad aproximadamente.

Box 5

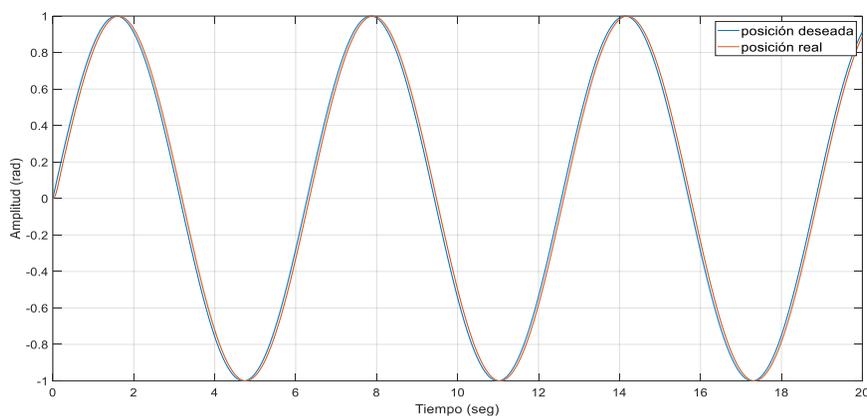


Figura 4

Resultados de simulación PD con señal de referencia senoidal

Box 6

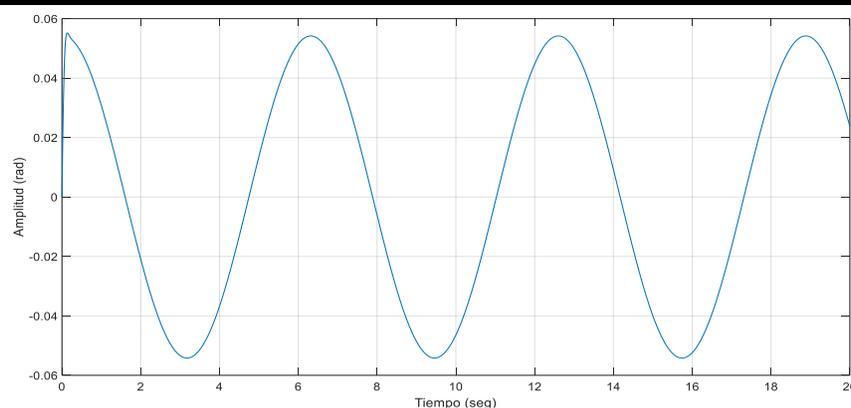


Figura 5

Error de posición angular PD en simulación

El control PD es capaz de posicionar el motor con precisión en condiciones ideales, sin embargo, presenta limitaciones en la adaptación frente a variaciones de carga y perturbaciones externas.

Para evaluar el desempeño del controlador PD en un entorno físico, se implementó en un prototipo experimental del motor de CD de imanes permanentes de la marca Quanser. Los resultados experimentales se presentan en las siguientes figuras. La señal de referencia, al igual que en la simulación, es una señal senoidal de amplitud 1 rad y una frecuencia angular de 1 rad/seg. En la figura 6 se muestran la señal de referencia (posición deseada) y la salida del motor (posición real). En la figura 7 se muestran la señal de error de posición angular del motor, la cual oscila entre ± 0.05 rad aproximadamente. Los resultados obtenidos experimentalmente son similares a los obtenidos en simulación.

Box 7

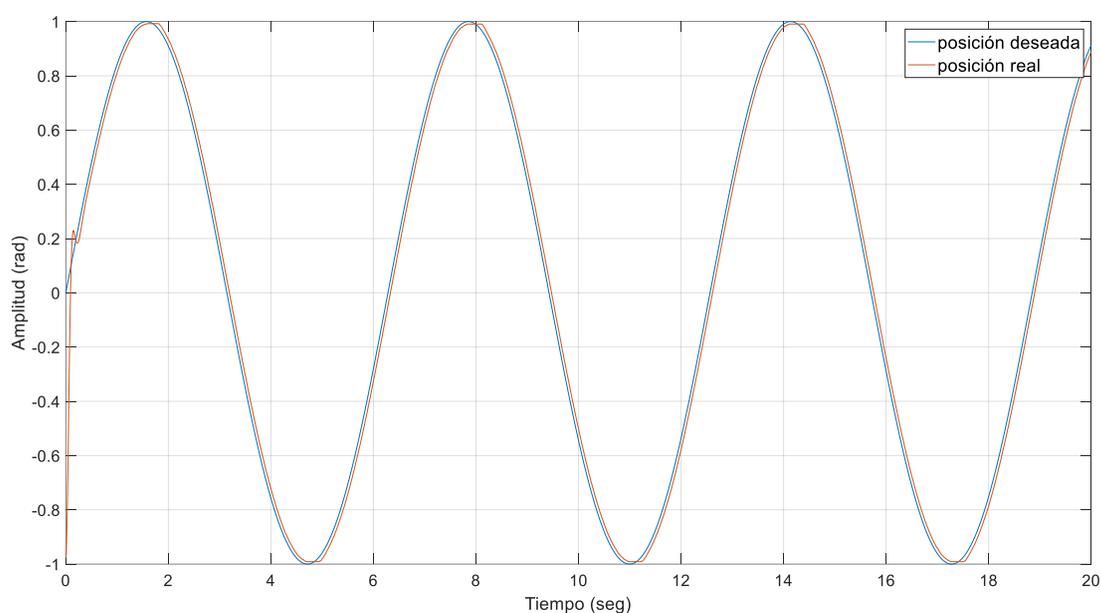


Figura 6

Resultados experimentales PD con señal de referencia senoidal

Box 8

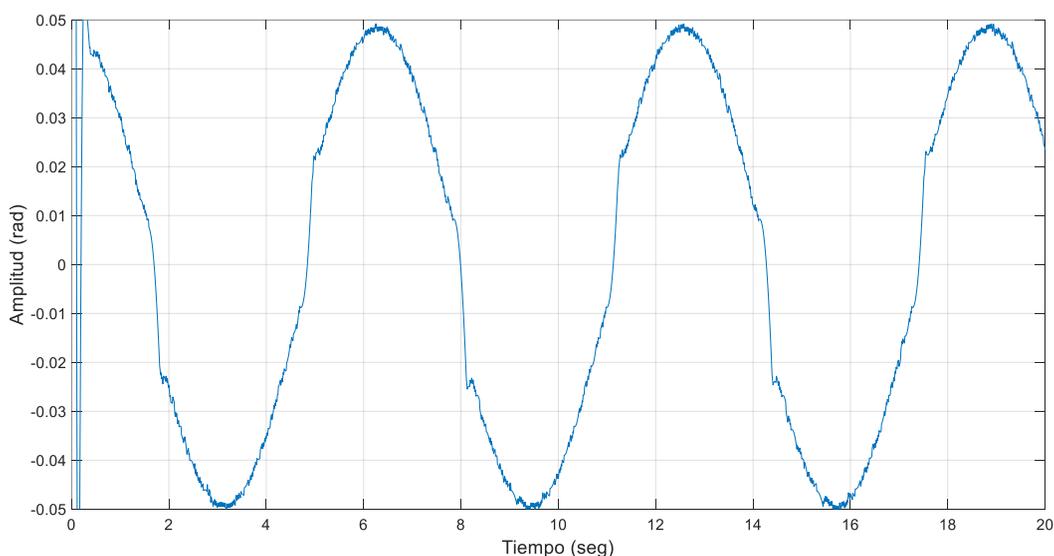


Figura 7

Error de posición angular PD experimental

Los resultados experimentales confirman que el controlador PD es efectivo en situaciones de carga constante. Sin embargo, su rendimiento disminuye en condiciones de operación no lineales o con alta variabilidad de carga. Esto destaca la necesidad de enfoques de control más adaptativos y robustos, como los que ofrecen las redes neuronales artificiales.

4. Controlador basado en redes neuronales NARMA-L2

El uso de redes neuronales artificiales para el control de sistemas no lineales ha ganado popularidad debido a su capacidad para aprender dinámicas complejas y adaptarse a condiciones cambiantes (Narendra & Parthasarathy, 1990). En el caso de los motores de corriente directa (CD) de imanes permanentes, el control de posición angular presenta desafíos inherentes a la naturaleza no lineal y la sensibilidad del sistema a perturbaciones externas y variaciones de carga.

La estructura NARMA-L2 (Nonlinear AutoRegressive Moving Average model of order 2) es eficaz para abordar estos problemas, ya que permite que el sistema de control logre precisión y estabilidad mediante el aprendizaje de las características del sistema y la predicción de su comportamiento. El modelo NARMA-L2 transforma un sistema no lineal en una estructura controlable en tiempo discreto, lo que facilita modelar la dinámica del motor y realizar ajustes precisos en la señal de control basados en las entradas y salidas anteriores del sistema. Este enfoque resulta especialmente adecuado para el control de posición angular, donde las variaciones y no linealidades del sistema dificultan el uso de métodos clásicos (Hagan & Demuth, 2014).

La red neuronal NARMA-L2 emplea una estructura de capas múltiples en la que una red neuronal feedforward aproxima el modelo de comportamiento del motor de CD de imanes permanentes. La salida deseada del sistema, correspondiente a la posición angular, se obtiene mediante una función de actualización que incorpora las entradas y salidas pasadas junto con el comando de entrada. La expresión general del modelo NARMA-L2 puede representarse como (Demuth et al, 2020):

$$y(k + d) = N[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k), u(k - 1), \dots, u(k - n + 1)] \quad (6)$$

donde $u(k)$ es la entrada de sistema y la salida es $y(k)$. Para la fase de identificación, se puede entrenar la red neuronal para aproximar una función no lineal N . Este es el procedimiento de identificación seguido por la parte predictiva del controlador neuronal.

Si se quiere que la salida del sistema siga alguna trayectoria de referencia $y(k + d) = y_r(k + d)$, el siguiente paso consiste en desarrollar un controlador no lineal de la forma:

$$u(k) = G[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), y_r(k + d), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)] \quad (7)$$

El problema con usar este controlador es que si se quiere entrenar una red neuronal para crear una función G que minimice el error por mínimos cuadrados, es necesario usar propagación dinámica hacia atrás o también llamada retropropagación. Esto puede ser muy lento. Una solución consiste en usar modelos aproximados para representar el sistema. El controlador usado aquí está basado en el modelo aproximado NARMA-L2:

$$\hat{y}(k + d) = f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)] + g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - m + 1)] \cdot u(k) \quad (8)$$

En este modelo la siguiente entrada del controlador $u(k)$ no está contenida dentro de la no linealidad. La ventaja de esta forma es que se puede obtener la entrada de control que hace que la salida del sistema siga la referencia $y(k + d) = y_r(k + d)$. El controlador resultante tiene la forma siguiente:

$$u(k) = \frac{y_r(k + d) - f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - n + 1)]}{g[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k - 1), \dots, u(k - n + 1)]} \quad (9)$$

Usar esta ecuación directamente puede causar problemas de realización porque se debe determinar la entrada de control $u(k)$ basándonos en la salida en el mismo instante de tiempo, $y(k)$. Por lo tanto, el modelo que se usa es el siguiente:

$$y(k + d) = f[y(k), y(k - 1), \dots, y(k - n + 1), u(k), u(k - 1), \dots, u(k - n + 1)] + g[y(k), \dots, y(k - n + 1), u(k), \dots, u(k - n + 1)] \cdot u(k + 1) \quad (10)$$

donde $d \geq 2$.

Usando el modelo NARMA-L2, se obtiene el controlador:

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \quad (11)$$

que es realizable para $d \geq 2$.

Esta estructura permite a la red neuronal anticipar el comportamiento del sistema y calcular la señal de control óptima para el siguiente instante de tiempo, ajustando la posición angular en tiempo real.

El control de posición angular del motor de corriente directa de imanes permanentes se lleva a cabo utilizando el *Neural Network Toolbox* de MATLAB, el cual proporciona herramientas especializadas para el diseño y simulación de redes neuronales (Hagan & Demuth, 2014). En particular, se utiliza el bloque *NARMA-L2 Controller*, una implementación avanzada de la estructura NARMA-L2 que permite controlar sistemas no lineales mediante redes neuronales artificiales. La Figura 8 muestra el diagrama de control en Simulink utilizado.

Box 9

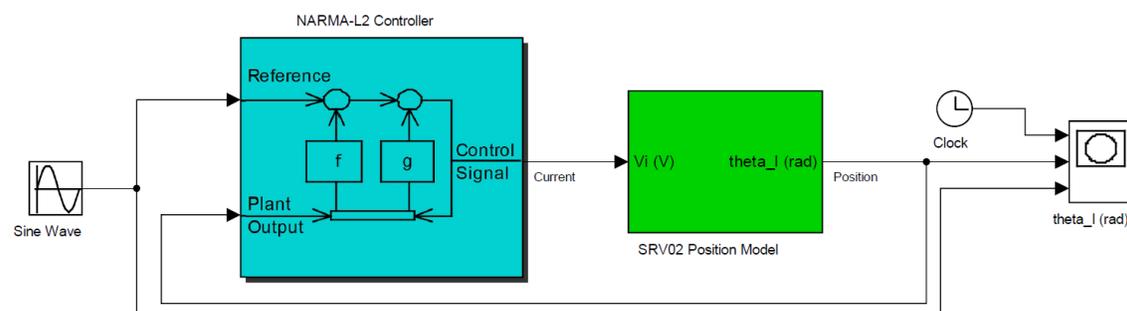


Figura 8

Diagrama de control utilizando el controlador NARMA-L2

El bloque *NARMA-L2 Controller*, disponible en el *Simulink Library Browser* dentro del *Neural Network Toolbox*, facilita la creación de modelos de control predictivo para sistemas no lineales complejos como el motor de CD de imanes permanentes. Este bloque emplea una red neuronal de tipo NARMA-L2 para predecir la salida del sistema en función de las entradas y salidas pasadas, transformando un sistema no lineal en una estructura que se puede controlar mediante técnicas de tiempo discreto. Este enfoque permite un control preciso de la posición angular en sistemas donde los métodos lineales convencionales son ineficaces o insuficientes.

La implementación del bloque *NARMA-L2 Controller* en MATLAB ofrece varias ventajas:

- **Facilidad de Configuración y Simulación:** MATLAB/Simulink proporciona una interfaz intuitiva para la configuración del bloque y la simulación del control, lo que facilita la experimentación y ajuste de parámetros en tiempo real.
- **Adaptación a Condiciones Variables:** La estructura de la red neuronal permite que el controlador se adapte dinámicamente a condiciones variables del sistema, manteniendo la precisión en el control de posición angular.
- **Eficiencia en el Diseño de Control:** Al integrar el *Neural Network Toolbox* de MATLAB, el diseño del controlador puede optimizarse mediante herramientas de ajuste automático, minimizando el tiempo de desarrollo y mejorando el rendimiento en simulaciones y aplicaciones reales.

El entrenamiento de la red neuronal NARMA-L2 es crucial para que el sistema responda adecuadamente a diversas condiciones operativas. Para el entrenamiento, se utiliza un conjunto de datos que incluye distintas condiciones, variaciones en la velocidad y perturbaciones externas, permitiendo ajustar los pesos y sesgos de la red neuronal y minimizar el error de predicción de la posición angular.

1. **Generación de Datos de Entrenamiento:** Los datos de entrenamiento se obtienen mediante simulaciones del modelo matemático del motor y/o pruebas experimentales, aplicando secuencias de comandos de posición angular bajo diferentes condiciones de operación.
2. **Algoritmo de Entrenamiento:** Para optimizar los parámetros de la red, se emplean algoritmos como el gradiente descendente y la retropropagación, con el objetivo de reducir el error cuadrático medio entre la salida deseada y la predicha por la red (Haykin, 1999).
3. **Validación del Modelo:** Durante el proceso de entrenamiento, se realiza una validación cruzada para evitar problemas de sobreajuste y asegurar que la red generalice adecuadamente ante datos no observados.

La Figura 9 muestra los parámetros de la red neuronal y de los datos de entrenamiento ingresados en el bloque controlador NARMA-L2. Aquí se toma en cuenta que el valor de la entrada del motor de CD debe estar en el rango de $\pm 10V$ y el rango de salida en este caso es de ± 1 rad. Los datos de entrenamiento generados se muestran en la figura 10.

Box 10

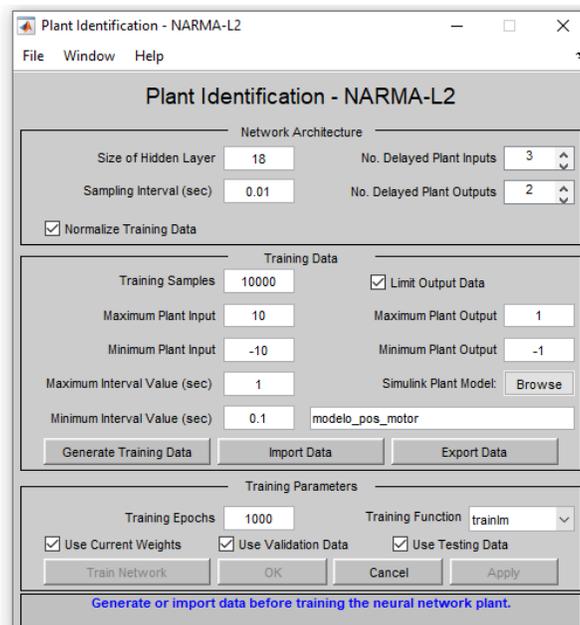


Figura 9

Parámetros de entrenamiento del NARMA-L2

Box 11

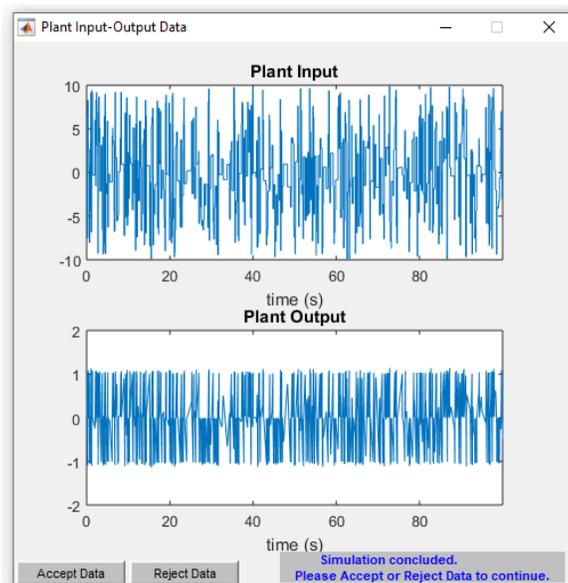


Figura 10

Datos de entrenamiento del NARMA-L2

En el proceso de entrenamiento de las redes neuronales, los datos se dividen en tres conjuntos: de entrenamiento, de prueba y de validación, cada uno con una función específica para asegurar la precisión y capacidad de generalización del modelo (Bishop, 2006; Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016).

1. **Datos de Entrenamiento:** Constituyen el conjunto principal utilizado para ajustar los parámetros de la red neuronal. Durante el entrenamiento, la red utiliza estos datos para minimizar el error entre sus predicciones y los valores esperados. Esto se logra mediante algoritmos de optimización que ajustan los pesos y sesgos de la red en cada iteración (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009). Los datos de entrenamiento son esenciales para que la red aprenda patrones y relaciones dentro del conjunto de datos.
2. **Datos de Validación:** Este conjunto se emplea durante el proceso de entrenamiento, pero no influye directamente en el ajuste de los parámetros de la red. En su lugar, la validación monitorea el rendimiento del modelo en datos nuevos y detecta problemas como el sobreajuste (overfitting) (Goodfellow et al., 2016). En cada etapa del entrenamiento, se evalúa la precisión de la red con el conjunto de validación para identificar si la red está memorizando los datos de entrenamiento en lugar de generalizar. Si el error de validación comienza a aumentar mientras el error de entrenamiento disminuye, puede indicar que el modelo está sobreajustado.
3. **Datos de Prueba:** Se utilizan una vez finalizado el entrenamiento para evaluar de manera independiente el rendimiento de la red en datos no vistos anteriormente. Este conjunto proporciona una estimación precisa de la capacidad de generalización de la red al simular su desempeño en el entorno real (Bishop, 2006). Los resultados obtenidos con los datos de prueba permiten evaluar la precisión y confiabilidad del modelo sin interferencias del proceso de ajuste de parámetros.

Dividir los datos en estos tres conjuntos asegura que la red neuronal no solo aprenda adecuadamente, sino que también mantenga un desempeño confiable y adaptado a datos nuevos, lo que es esencial en aplicaciones prácticas.

En las figuras 11, figura 12 y figura 13 se muestra el desempeño de la red neuronal para aprender la dinámica del motor de corriente directa de imanes permanentes, se muestra la entrada (*Input*), salida de la planta (*Plant Output*), salida de la red neuronal (*NN Output*) y el error entre estas dos últimas, todo esto para los datos de entrenamiento, validación y prueba, respectivamente.

Box 12

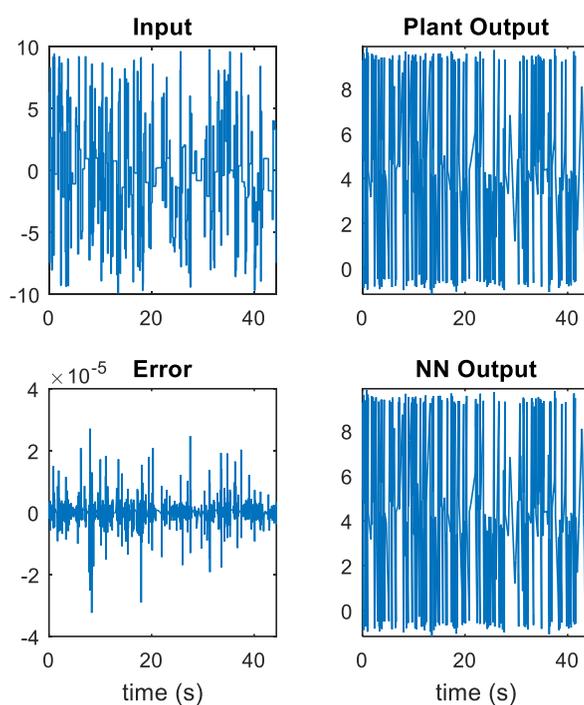
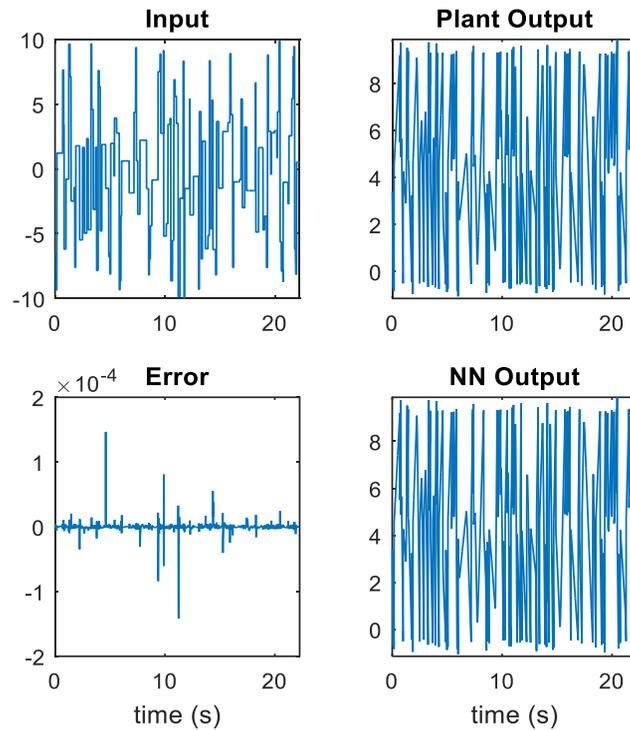
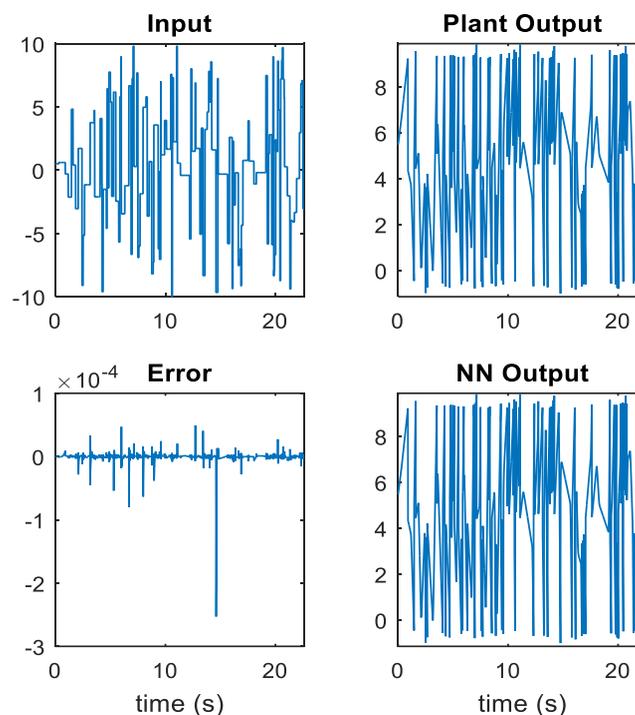


Figura 11

Datos de entrenamiento

Box 13**Figura 12**

Datos de validación

Box 14**Figura 13**

Datos de prueba

En el contexto del aprendizaje de redes neuronales, una época (*Epoch* en inglés) representa un ciclo completo de entrenamiento donde el modelo procesa todo el conjunto de datos de entrenamiento una vez. Durante cada época, la red ajusta sus pesos y sesgos al calcular el error entre sus predicciones y los valores reales. Este proceso de ajuste iterativo busca minimizar el error del modelo, mejorando su precisión en las predicciones. Generalmente, múltiples épocas son necesarias para que la red neuronal alcance un buen desempeño, ya que en cada una se va refinando la comprensión de los patrones presentes en los datos. Para el aprendizaje de la dinámica del motor de CD de imanes permanentes se emplearon 1000 épocas.

En la figura 14 se muestra la gráfica del desempeño del entrenamiento. Esta gráfica permite visualizar y analizar la evolución del error en cada etapa del proceso de entrenamiento, ayudando a evaluar la precisión y la capacidad de generalización de la red neuronal en función de sus resultados en cada conjunto de datos.

Box 15

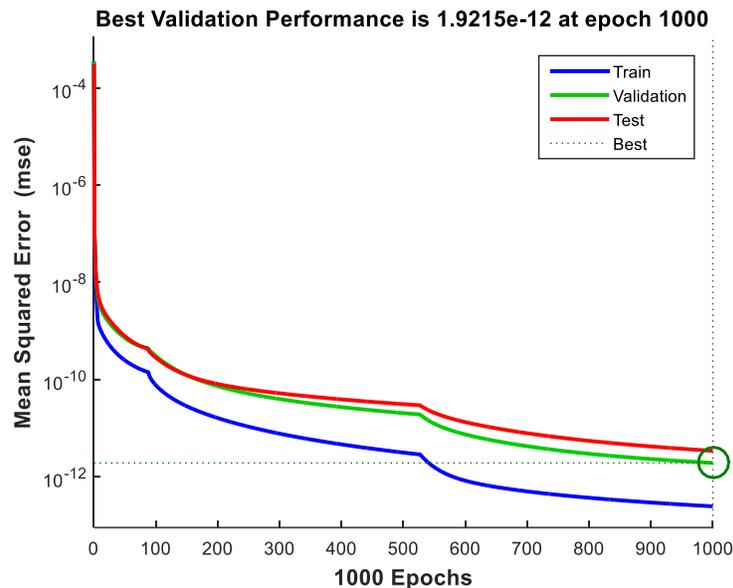


Figura 14

Desempeño del entrenamiento del NARMA-L2

La gráfica del estado de entrenamiento de la figura 1.15 permite observar la evolución de los parámetros del proceso de entrenamiento, como el gradiente, la tasa de aprendizaje y la validación, en cada iteración. Analizar el estado de entrenamiento ayuda a identificar si el proceso está convergiendo adecuadamente y proporciona información útil para ajustar parámetros que optimicen el rendimiento de la red neuronal.

Box 16

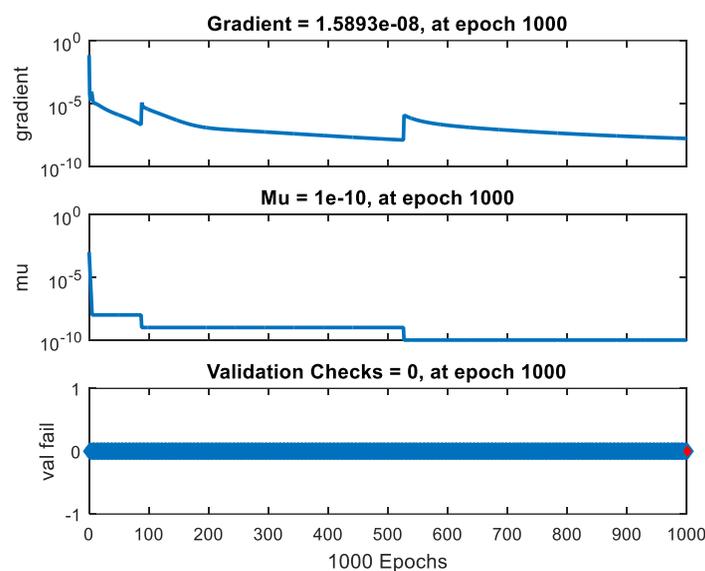


Figura 15

Gráfica del estado de entrenamiento

La gráfica de regresión lineal de la figura 16 compara los valores objetivos (targets) con las salidas generadas por la red neuronal (outputs). Esta gráfica ilustra el grado de precisión del modelo al evaluar la correlación entre los valores esperados y los obtenidos. Una relación cercana a la línea de identidad ($y = x$) indica una alta precisión en las predicciones, lo que sugiere que la red neuronal se ajusta bien a los datos. La regresión lineal es una herramienta importante para analizar el rendimiento general del modelo y determinar la efectividad del entrenamiento.

Box 17

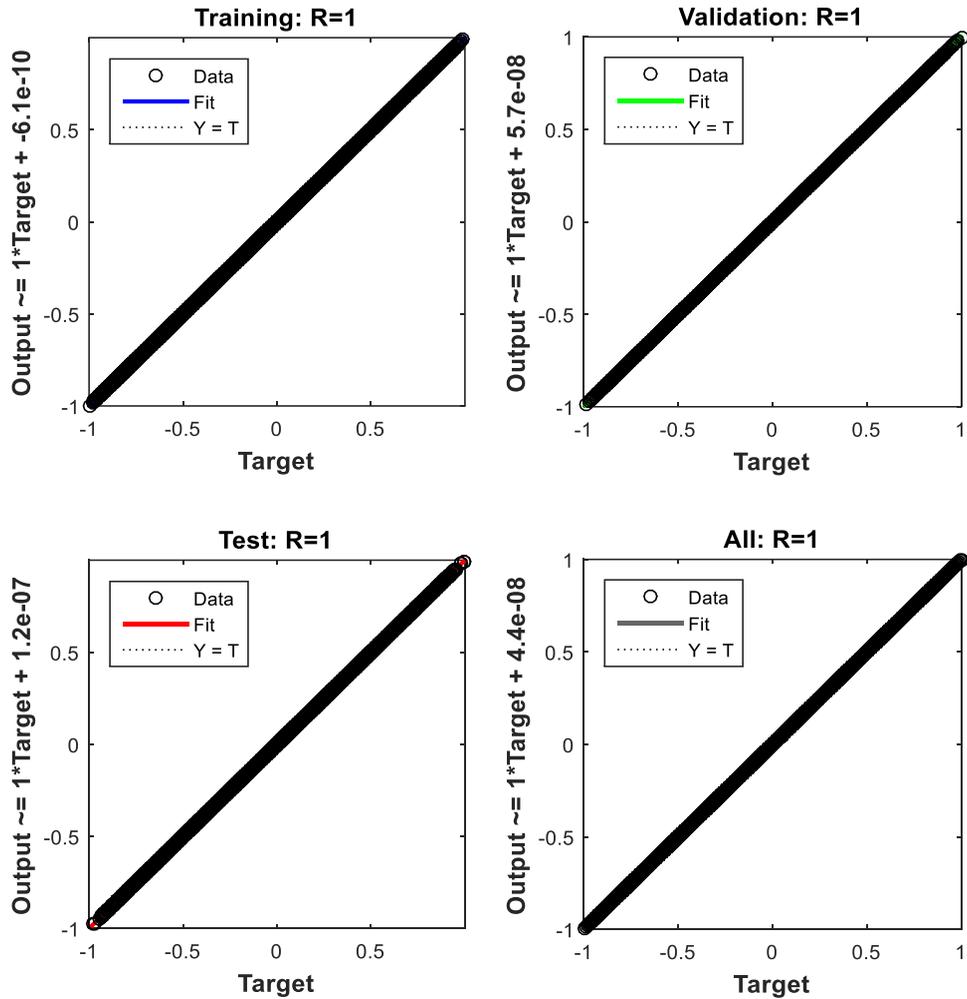


Figura 16

Gráficas de regresión lineal

Resultados de simulación para el diagrama de bloques de la figura 8 se presentan en las siguientes figuras. Al igual que para el control PD, la señal de referencia usada es una señal senoidal de amplitud 1 rad y una frecuencia angular de 1 rad/seg. En la figura 17 se muestran la señal de referencia (posición deseada) y la salida del motor (posición real). En la figura 18 se muestran la señal de error de posición angular del motor, la cual oscila entre ± 0.011 rad aproximadamente. El error en este caso es menor que el obtenido con el controlador PD, el cual está entre ± 0.055 rad (Ver figura 5).

Box 18

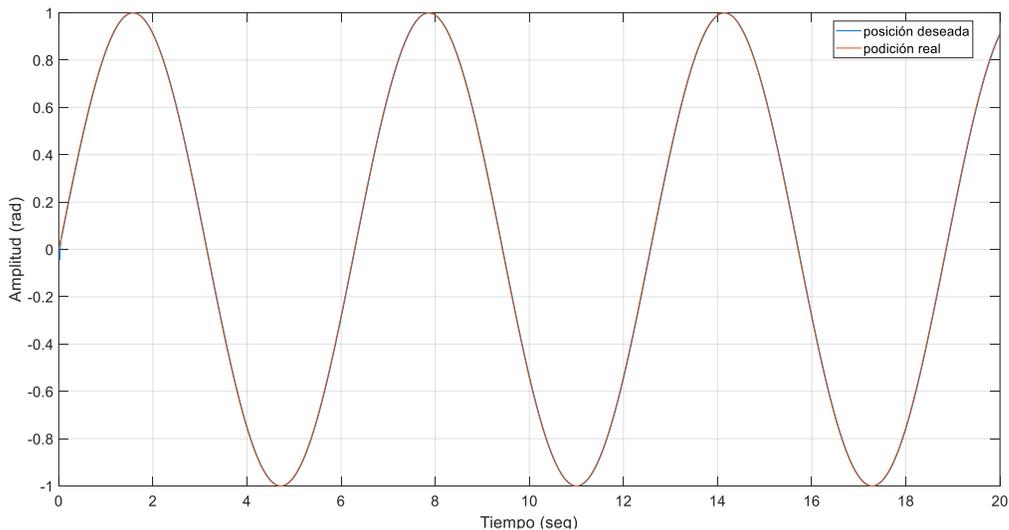


Figura 17

Resultados de simulación Red Neuronal con señal de referencia senoidal

Box 19

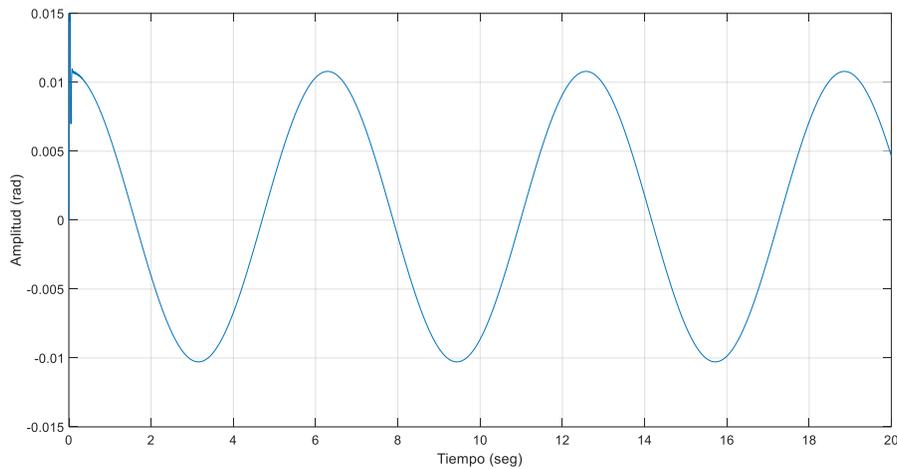


Figura 18

Error de posición angular en simulación Red Neuronal

Los resultados obtenidos en la simulación mostraron que el controlador NARMA-L2 desarrollado en MATLAB mantuvo la posición angular del motor de CD de imanes permanentes con alta precisión y estabilidad. Las pruebas de simulación confirmaron que el bloque NARMA-L2 es capaz de reducir las oscilaciones y mejorar el tiempo de respuesta del sistema frente a cambios en las condiciones operativas. El empleo del *Neural Network Toolbox* en MATLAB, junto con el bloque *NARMA-L2 Controller*, es una solución eficiente y versátil para el control avanzado de sistemas no lineales como los motores de CD de imanes permanentes, destacándose especialmente en aplicaciones de control de posición angular donde se requiere alta precisión y adaptabilidad.

Una vez entrenada, la red neuronal NARMA-L2 se implementa en tiempo real para controlar la posición angular del motor de CD de imanes permanentes. En cada instante de tiempo, el sistema genera la señal de entrada basada en el error de posición actual y las señales pasadas, permitiendo ajustar el rotor a la posición deseada. La red NARMA-L2 compensa automáticamente las variaciones de carga y las perturbaciones externas, optimizando el control de posición angular en tiempo real sin recalibración constante (Narendra & Parthasarathy, 1990).

Para evaluar el desempeño del controlador NARMA-L2 en un entorno físico, se implementa en un prototipo experimental del motor de CD de imanes permanentes de la marca Quanser. Los resultados experimentales se presentan en las siguientes figuras. La señal de referencia, al igual que en la simulación, es una señal senoidal de amplitud 1 rad y una frecuencia angular de 1 rad/seg. En la figura 19 se muestran la señal de referencia (posición deseada) y la salida del motor (posición real). En la figura 20 se muestran la señal de error de posición angular del motor, la cual oscila entre ± 0.023 rad aproximadamente. El error en este caso es menor que el obtenido experimentalmente con el controlador PD, el cual está entre ± 0.05 rad (Ver figura 7).

Box 20

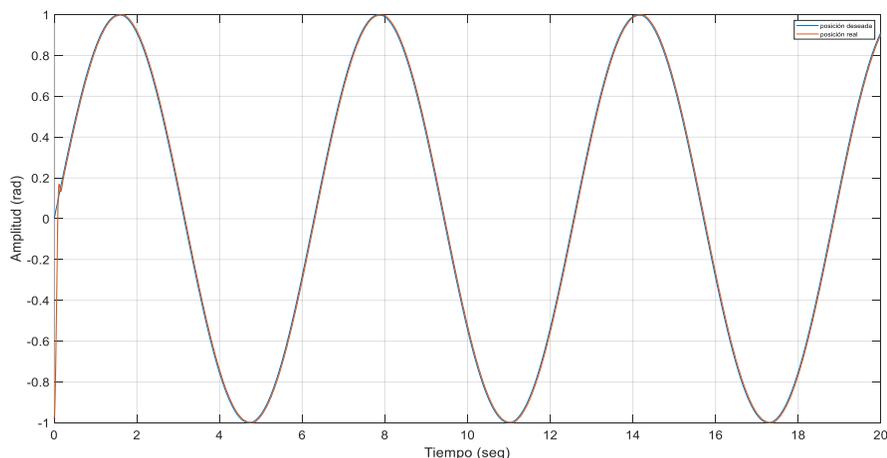


Figura 19

Resultados experimentales Red Neuronal con señal de referencia senoidal

Box 21

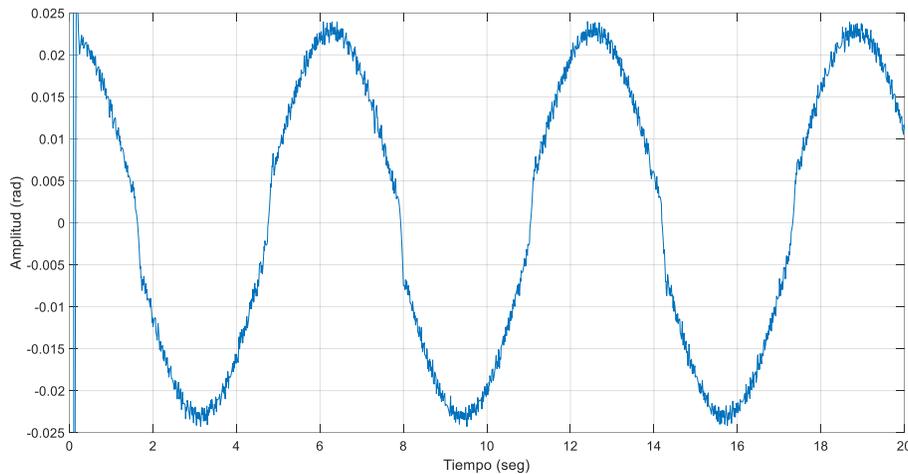


Figura 20

Error de posición angular experimental Red Neuronal

El control basado en la red NARMA-L2 ofrece varias ventajas sobre el controlador PD tradicional, especialmente en escenarios donde la precisión y la estabilidad son críticas. A continuación, se mencionan algunos aspectos destacados de la comparación:

- **Adaptabilidad a Variaciones:** La red neuronal ajusta la señal de control en función de las variaciones de carga y perturbaciones, mientras que el controlador PD requiere ajustes manuales en sus ganancias para adaptarse a nuevas condiciones.
- **Reducción de Oscilaciones y Sobreoscilaciones:** La capacidad del modelo NARMA-L2 para anticipar y compensar el comportamiento no lineal minimiza las oscilaciones en la posición angular, mejorando la estabilidad.
- **Tiempo de Respuesta y Precisión:** La red neuronal proporciona una respuesta más rápida y precisa en el posicionamiento del rotor, especialmente en condiciones variables.

5. Conclusiones

Este capítulo aborda el control de posición angular en motores de corriente directa (CD) de imanes permanentes mediante la aplicación de técnicas clásicas e inteligentes de control, proporcionando una comparación de su desempeño y ventajas. A continuación, se presentan los hallazgos y consideraciones clave:

1. **Control Clásico Proporcional-Derivativo (PD):** El controlador PD es una opción confiable y eficiente para el control de posición angular en condiciones ideales. Sin embargo, presenta limitaciones al enfrentar perturbaciones externas o variaciones de carga, ya que su capacidad de adaptación es limitada. Los resultados de simulación y pruebas experimentales revelan que el PD ofrece una respuesta rápida pero carece de precisión en escenarios complejos, lo cual restringe su aplicabilidad en entornos de operación variables.
2. **Control Basado en Redes Neuronales Artificiales (NARMA-L2):** La implementación de un controlador NARMA-L2, utilizando el *Neural Network Toolbox* de MATLAB, es una alternativa eficiente para el control de sistemas no lineales como el motor de CD de imanes permanentes. El controlador basado en redes neuronales exhibe una precisión superior en el control de posición angular. La estructura de red neuronal permite que el controlador optimice el tiempo de respuesta y minimice las oscilaciones en comparación con el controlador PD.
3. **Comparación de Desempeño:** La comparación entre ambos enfoques de control muestra que, si bien el controlador PD es adecuado para aplicaciones con condiciones estables, el enfoque de redes neuronales ofrece ventajas significativas en precisión y estabilidad. Las redes neuronales permiten que el sistema mantenga un control efectivo incluso en entornos dinámicos, resaltando su potencial para aplicaciones donde se requieren altos niveles de precisión y adaptabilidad.

4. **Ventajas del Uso de MATLAB para el Diseño de Controladores:** La utilización de herramientas como el *Neural Network Toolbox* en MATLAB facilita el diseño, simulación y ajuste del controlador NARMA-L2, permitiendo una rápida experimentación y optimización de los parámetros del sistema. MATLAB se consolida como una herramienta eficaz para el desarrollo de controladores basados en redes neuronales, ofreciendo una plataforma integral para probar y validar métodos de control avanzados.

En conclusión, este estudio resalta las ventajas de las redes neuronales en el control de sistemas no lineales como los motores de CD de imanes permanentes, especialmente en aplicaciones de control de posición angular. La comparación entre el controlador PD y el controlador NARMA-L2 destaca la adaptabilidad y precisión del enfoque basado en redes neuronales, que se perfila como una solución prometedora para optimizar el rendimiento en entornos operativos complejos.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el artículo del que se informa en este artículo.

Contribución de los autores

Durán-Fonseca, Miguel-Ángel: Contribuyó con la idea central, simulaciones, entrenamiento de la red neuronal y la integración del documento final.

Ramos-Vázquez, Dariana: Realizó las simulaciones y pruebas experimentales.

Gudiño-Lau, Jorge: Contribuyó con simulaciones, pruebas experimentales y análisis de datos obtenidos.

Jalomo-Cuevas, Jaime: Contribuyó con la selección de la arquitectura de la red neuronal y el análisis de datos obtenidos.

Disponibilidad de datos y materiales

Para mayor información sobre datos y materiales del proyecto contactar a mduran@ucol.mx.

Financiación

El proyecto se desarrolló con recursos propios.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima por las facilidades para realizar este proyecto de investigación.

Abreviaturas

PMDC	Permanent Magnet Direct Current
PD	Proporcional – Derivativo
CD	Corriente Directa
RNA	Red Neuronal Artificial
PID	Proporcional – Integral – Derivativo
NARMA-L2	Nonlinear AutoRegressive Moving Average model of order 2

Referencias

Antecedentes

Astrom, K. (1995). [1-0-1-K-J-Astrom-Pid-Controllers-Theory-Design-and-Tuning-2Ed.Pdf](#). Instrument Society of America.

Hendershot, J. R., & Miller, T. (1995). [Design of Brushless Permanent-Magnet Motors](#). Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford University PressOxford.

Gilliam, J. E. (1990). [Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives](#). Power Engineering Journal, 4(1), 20.

Sastry, S., Bodson, M., & Bartram, J. F. (1990). [Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness](#). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(1), 588–589.

Vásquez, M. A. G., González, G. A., López, J. D. N., & Osorio, D. R. (2024). [Educación en la era de la Inteligencia Artificial](#). Caso de estudio del curso de señales y sistemas de los programas de ingeniería mecatrónica y biomédica de la Universidad Eia. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería.

Básicos

Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2000). [Neural network toolbox User's guide: For Use with MATLAB](#). *The Mathworks*.

Haykin, S. (1999). Neural networks: a comprehensive foundation by Simon Haykin. *The Knowledge Engineering Review*.

Khalil, H. K. (1992). Nonlinear systems. Nueva York: Macmillan Publishing Company.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2010). [Analysis of Electric Machinery and Drive Systems](#). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE.

Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering (5th ed.). Prentice Hall.

Psichogios, D. C., & Ungar, L. H. (1992). [A hybrid neural network-first principles approach to process modeling](#). *AIChE Journal*, 38(10), 1499–1511.

Soporte

Chen, S., Billings, S. A., & Grant, P. M. (1990). [Non-linear system identification using neural networks](#). *International Journal of Control*, 51(6), 1191–1214.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). [Deep learning An MIT Press Book](#). *Nature* (Vol. 29, pp. 1–73). Retrieved from

Hagan, M., & Demuth, H. (2014). [Neural Network Design](#). *Neural Networks in a Softcomputing Framework*, 1–1012.

Narendra, K. S., & Parthasarathy, K. (1990). [Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks](#). *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1(1), 4–27.

Diferencias

Apkarian, J., Lévis, M., & Gurocak, H. (2011). User Manual. SRV02 Rotary Servo Base Unit. Markham, Ontario, Canada: Quanser Inc.

Discusiones

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* (2nd ed.). Springer.

Hunt, K. J., Sbarbaro, D., Zbikowski, R., & Gawthrop, P. J. (1992). [Neural networks for control systems- A survey](#). *Automatica*, 28(6), 1083–1112.

Miller, W. T., Sutton, R. S., & Werbos, P. J. (Eds.). (1991). *Neural Networks for Control*. MIT Press.

Sistema mecatrónico para limpieza de superficies

Mechatronic system for surface cleaning

Charre-Ibarra, Saida*^a, Monroy-Xochihua, Brayán^b, Ortiz-Ceja, Alan^c y Peregrina-Madriral, Gerardo^d

^a  Universidad de Colima •  Q-6851-2018 •  0000-0002-3823-5388

^b  Universidad de Colima •  0009-0001-5348-0584

^c  Universidad de Colima •  0009-0002-2687-3339

^d  Universidad de Colima •  0009-0002-6787-9702

Clasificación CONAHCYT:

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Discipline: Ingeniero en sistemas

Subdiscipline: Automatización

Key Books

Los autores del libro forman parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Colima (Institución Pública y Autónoma de México) y del cuerpo académicos UCOL-CA-21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos reconocido por la SES-SEP En Consolidación. En este capítulo describe un sistema embebido innovador que combina tecnología fotovoltaica y sensores para monitorear y promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales; es mostrado en el Capítulo 3. La principal contribución es la integración de un sistema de monitoreo en tiempo real con estructuras modulares, diseñadas específicamente para optimizar el anclaje y el desarrollo de corales. Este enfoque escalable y sostenible representa un avance significativo en los esfuerzos de regeneración de ecosistemas marinos, abordando de manera efectiva los retos actuales que enfrentan los arrecifes de coral.

Citación: Charre-Ibarra, Saida, Monroy-Xochihua, Brayán, Ortiz-Ceja, Alan y Peregrina-Madriral, Gerardo. 2024. Sistema mecatrónico para limpieza de superficies. 21-40. ECORFAN.

* ✉ scharre@ucol.mx

Book shelf URL: <https://www.ecorfan.org/books.php>



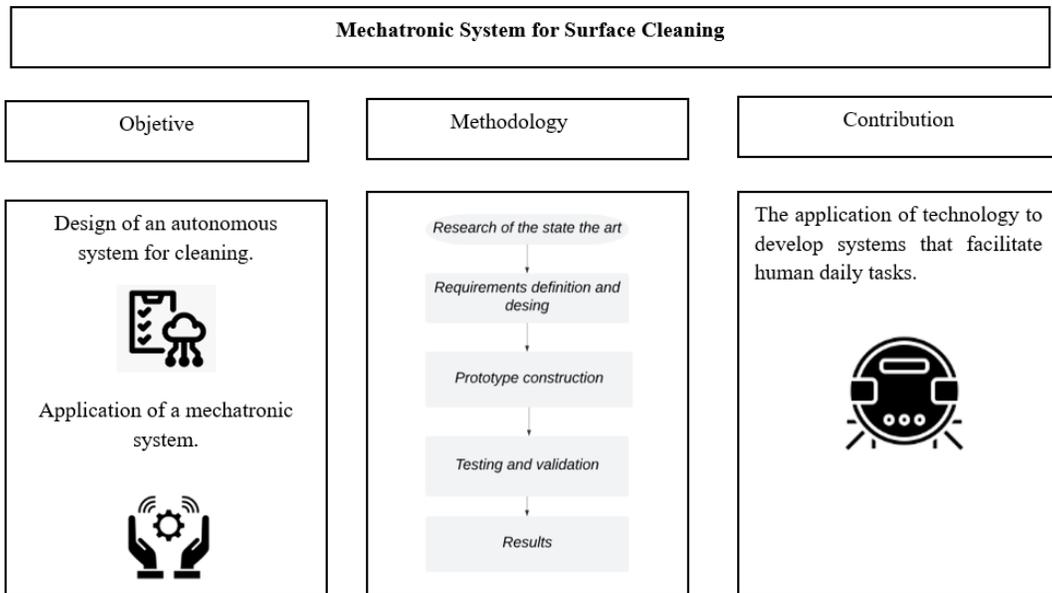
ISBN 978-607-8948-47-5 /© 2009 The Author[s]. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Book MMP. This is an open access book under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee **MARVID**[®] - in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

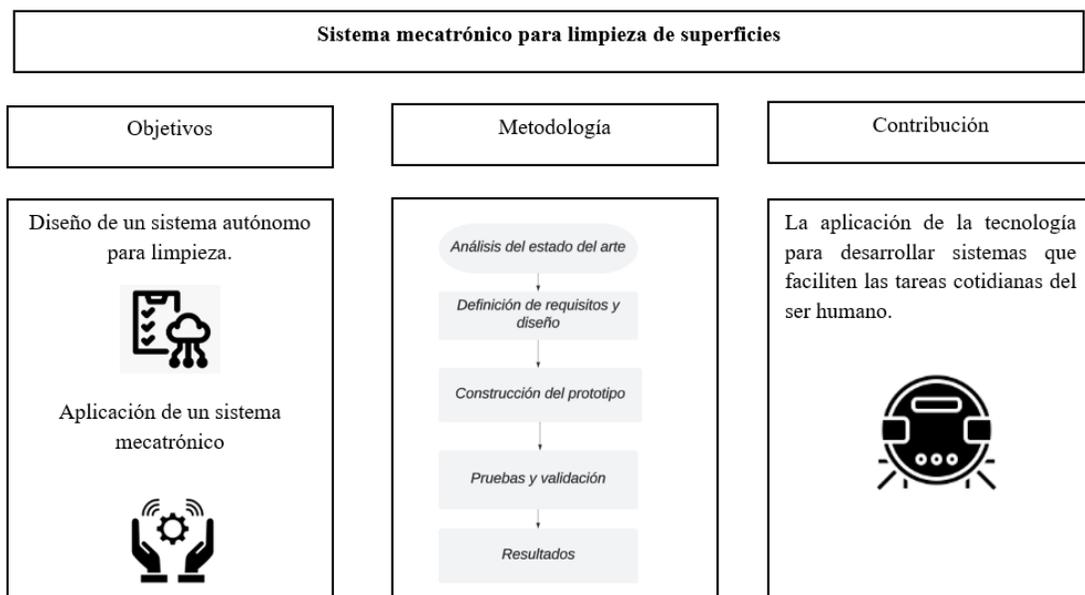
This work presents the design and construction of a mechatronic system aimed at the autonomous cleaning of horizontal surfaces. Through a review of existing models and previous technologies, key innovations in robotic vacuum cleaners were identified, such as autonomous navigation, obstacle detection, and efficient suction. The proposed system aims to optimize cleaning in confined spaces, providing convenience to users by operating without human intervention. This project contributes to the development of technological solutions, addressing the growing demand for automation in the domestic sphere.



Cleaning systems, Mechatronic system, Arduino, Vacuum cleaners, Technology

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y construcción de un sistema mecatrónico destinado a la limpieza autónoma de superficies horizontales. Mediante la revisión de modelos existentes y tecnologías previas, se identificaron innovaciones clave en robots aspiradores, como la navegación autónoma, la detección de obstáculos y la aspiración eficiente. El sistema propuesto tiene como objetivo optimizar la limpieza en espacios reducidos, ofreciendo comodidad al usuario al operar sin intervención humana. Este proyecto contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas, respondiendo a la creciente demanda de automatización en el ámbito doméstico.



Sistemas de limpieza, Sistema mecatrónico, Arduino, Aspiradoras, Tecnología

1. Introducción

Los robots son máquinas que integran componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de comunicaciones, además de estar dotados de un sistema informático para su control en tiempo real, percepción del entorno y programación. En la práctica, se trata generalmente de sistemas electromecánicos que, por su apariencia o movimientos, dan la sensación de tener un propósito propio. La palabra "robot" puede referirse tanto a mecanismos físicos como a sistemas virtuales de software, aunque comúnmente se utiliza el término "bots" para referirse a estos últimos. En la figura 1 se muestra el esquema básico de un robot, en ella se identifican un sistema mecánico, actuadores, sensores y el sistema de control como elemento básico necesario para cerrar la cadena actuación-medidas-actuación (Baturone, 2001).

Box 1

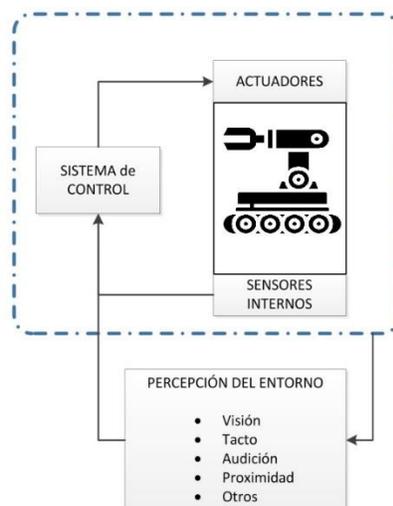


Figura 1

Robot y su interacción con el entorno

Fuente [Baturone, 2001]

Los sensores internos monitorean el estado de la estructura mecánica del robot, incluyendo giros, desplazamientos relativos entre articulaciones, velocidades, fuerzas y pares; esto permite cerrar los bucles de control en las articulaciones. Por otro lado, los sensores externos aportan "sentidos" al robot, proporcionando información que el sistema de percepción usa para interpretar el entorno y adaptarse automáticamente a las variaciones. Gracias a los bucles de realimentación sensorial del entorno, el sistema de control genera acciones en respuesta a los cambios detectados, comparando esta información con patrones de referencia y permitiendo al robot enfrentar situaciones imprevistas.

La estructura de un robot se determina por el tipo de configuración global que presenta. Esta puede ser metamórfica, lo que significa que el robot es capaz de modificar su configuración para mejorar su adaptabilidad funcional. El metamorfismo puede ir desde ajustes simples, como la sustitución de una herramienta o de un extremo funcional, hasta transformaciones más complejas que implican la modificación de componentes o subsistemas estructurales.

La subdivisión de los robots, basada en su arquitectura, se realiza en los siguientes grupos: poliarticulados, móviles, androides, zoomórficos e híbridos. Cada grupo presenta características particulares en términos de su estructura y capacidad de movimiento (Pérez, et al., 2013).

Por lo que un robot es un dispositivo electrónico que realiza tareas de forma automática, ya sea bajo supervisión humana directa, a través de programas predefinidos o utilizando técnicas de inteligencia artificial (Sosa-Reyna, 2006). Aunque inicialmente fueron concebidos como máquinas humanoides, los robots han evolucionado para incluir diversas formas como brazos industriales y robots móviles (Ricciolo, 2016). El término "robot" tiene su origen en la palabra checa "robota", que significa servidumbre o trabajo forzado (Rojas Hernández et al., 2007). Los robots se utilizan ampliamente en la fabricación y otras industrias para reemplazar, simular o ampliar el trabajo humano (Sosa-Reyna, 2006).

En cuanto a la aplicación de los robots utilizados para reemplazar el trabajo humano y facilitar la realización de las tareas cotidianas, se tienen los robots aspiradores. Estos robots utilizan sensores y algoritmos para navegar por el entorno, evitando obstáculos y aspirando el polvo y la suciedad de los pisos mientras se desplazan, son dispositivos de limpieza autónomos diseñados para mejorar la calidad de vida, especialmente de las personas con discapacidades físicas. Estos robots suelen constar de una estación base para carga y recogida de polvo, y una unidad móvil equipada con sensores de navegación, mecanismos de succión y almacenamiento de polvo. Pueden detectar y absorber residuos en el suelo, evitar obstáculos y volver a la estación de carga cuando sea necesario (Salazar et al., 2020). Algunos modelos avanzados incorporan características adicionales como funciones de seguridad, utilizando cámaras e interfaces web para supervisar y notificar a los usuarios de actividades sospechosas (Vera y Endara Vélez, 2019). Los robots aspiradores pueden ser controlados por Arduino o miniordenadores como Raspberry Pi, que gestionan el movimiento, los sensores y la funcionalidad general del sistema (Widiarto et al., 2018). Estos dispositivos pueden construirse utilizando hardware de bajo coste y software gratuito, lo que los hace accesibles y, al mismo tiempo, proporcionan soluciones de limpieza de alta tecnología para hogares y oficinas (Salazar et al., 2020).

Los robots aspiradores suelen tener un diseño compacto y redondeado, con ruedas que les permiten moverse por diferentes superficies, y sensores para detectar obstáculos como muebles, paredes y escaleras. Algunos modelos más avanzados también pueden mapear y memorizar la distribución de la habitación para una limpieza más eficiente.

La mayoría de los robots aspiradores están equipados con un sistema de aspiración que utiliza cepillos y/o aspiradoras para recoger el polvo, la suciedad y los desechos en su camino. Otros modelos también pueden realizar funciones adicionales, como fregar el suelo o limpiar alfombras con cepillos especiales.

En su libro "Robots Are Coming for Your Job: A Human's Survival Guide to Profiting in the Age of Automation", Jennifer Pattison Tuohy (Pattison, 2017) discute cómo los robots aspiradores y otros robots para el hogar están cambiando la forma en que se realizan las tareas domésticas. En particular, destaca que los robots aspiradores se han vuelto populares debido a su conveniencia y eficiencia para mantener los suelos limpios sin la necesidad de una limpieza manual. No obstante, también advierte sobre las posibles limitaciones de los robots aspiradores en ciertos entornos o con ciertos tipos de suciedad, por lo que es importante considerar estas limitaciones al elegir un robot aspirador adecuado para tu hogar.

2. Robots aspiradores

En la actualidad existen muchas empresas dedicadas al diseño y fabricación de robots barredores, su competitividad ha aumentado, y sus precios también han subido.

iRobot

iRobot es una empresa tecnológica estadounidense especializada en la fabricación de robots para el hogar, la defensa y la seguridad pública. Es ampliamente reconocida por su serie de robots de limpieza, como el popular Roomba, que emplea tecnología avanzada para aspirar y limpiar pisos de forma autónoma. Además de los robots de limpieza que se presentan en la Tabla 1, iRobot también produce robots de seguridad para el hogar y la industria, como el robot de telepresencia RP-VITA, diseñado para uso hospitalario y que permite a los médicos interactuar a distancia con pacientes y colegas. La empresa también fabrica robots de uso militar y de defensa, como el PackBot, utilizado para desactivar explosivos y realizar tareas de reconocimiento en zonas de conflicto.

Fundada en 1990, iRobot es una de las compañías líderes en robótica a nivel mundial y ha sido pionera en el desarrollo y comercialización de robots para el hogar (iRobot, s.f.).

Roomba

La gama Roomba de iRobot es una serie de robots de limpieza para el hogar que utilizan tecnología avanzada para limpiar los pisos de manera autónoma. Estos robots de limpieza están diseñados para trabajar en diferentes tipos de pisos, desde alfombras hasta pisos duros, y pueden ser programados para limpiar en momentos específicos del día.

La gama Roomba incluye varios modelos con diferentes características y precios. El modelo más básico es el Roomba 600, que tiene una capacidad de limpieza efectiva y es ideal para hogares con mascotas o alergias. Los modelos más avanzados, como el Roomba 900 y el i7+, ofrecen funciones adicionales como la tecnología de mapeo y navegación inteligente, que permite al robot mapear la casa y limpiar de manera más eficiente.

Braava

La gama Braava de iRobot es una serie de robots que se enfoca en la limpieza de pisos duros, como madera, baldosas y laminados. Estos robots utilizan tecnología avanzada para limpiar de manera autónoma, lo que les permite navegar por los muebles y los obstáculos en el hogar mientras realizan la limpieza.

La gama Braava incluye varios modelos, incluyendo el Braava jet m6 y el Braava 300 series. El Braava jet m6 es el modelo más avanzado y cuenta con la tecnología de mapeo y navegación inteligente de iRobot, lo que permite al robot mapear la casa y limpiar de manera más eficiente. También puede ser controlado mediante una aplicación móvil para una limpieza aún más personalizada.

12

La gama Scooba de iRobot es una serie de robots de limpieza que a diferencia de los robots de limpieza Roomba y Braava que se enfocan en la limpieza de polvo y pelos, los robots de la gama Scooba utilizan agua y solución de limpieza para lavar los pisos de manera autónoma.

La gama Scooba incluye varios modelos, incluyendo el Scooba 450 y el Scooba 230. El Scooba 450 es el modelo más avanzado y cuenta con la tecnología de mapeo y navegación inteligente de iRobot, que le permite navegar por los muebles y las áreas de alto tráfico en la casa mientras limpia. También tiene la capacidad de utilizar diferentes modos de limpieza dependiendo de la superficie del piso y de la cantidad de suciedad.

En la Tabla 1 se muestran las especificaciones de los modelos de aspiradoras de la marca iRobot.

Box 2

Table 1

Modelos de aspiradoras iRobot

Foto											
Modelo	i9+	i7+	i7	i7+	i7	i3+ EVO	i3 EVO	960	e517	675/694	614
Potencia de Succión	40x*	10x**	10x*	10x*	10x*	10x*	10x*	10x*	5x*	standard	standard
Limpieza de esquinas especializada	●										
Navega en filas ordenadas	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
Tecnología Dirt Detect™: limpia a profundidad las áreas más sucias	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Cepillos dobles para múltiples superficies	Cepillos de goma	Cepillos de goma	Cepillos de goma	Cepillos de goma	Cepillos de goma	Cepillos de cerdas	Cepillos de cerdas				
Se recarga y reanuda la limpieza	Recarga automática y reinicia ciclo	●	●	●							
Estación de Limpieza Automática Clean Base	●	●		●		●					
Tipo de piso	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos	Alfombras y pisos				
Trapeo	Se sincroniza con Braava jet m6	Se sincroniza con Braava jet m6	Se sincroniza con Braava jet m6	Se sincroniza con Braava jet m6							

Fuente [iRobot, s.f.]

Xiaomi

Xiaomi destaca del resto del mercado, ya que la relación calidad-precio de sus smartphones, además de producir varios modelos de robots aspiradores. Algunos de los robots aspiradores más populares de Xiaomi son:

Xiaomi Mi Robot Vacuum

Este es uno de los modelos más antiguos de Xiaomi, pero aún así sigue siendo muy popular. Tiene una capacidad de succión de hasta 1800 Pa, una batería de larga duración y un sistema de navegación láser que le permite mapear y limpiar tu hogar de manera efectiva.

Xiaomi Mi Robot Vacuum Mop

Este modelo combina las funciones de aspirado y fregado. Tiene una capacidad de succión de 2500 Pa y un tanque de agua de 200 ml para fregar el piso. También cuenta con un sistema de navegación láser y una batería de larga duración.

Xiaomi Mi Robot Vacuum Mop

Este modelo combina las funciones de aspirado y fregado. Tiene una capacidad de succión de 2500 Pa y un tanque de agua de 200 ml para fregar el piso. También cuenta con un sistema de navegación láser y una batería de larga duración.

Xiaomi Mi Robot Vacuum-Mop P

Este modelo es similar al Xiaomi Mi Robot Vacuum Mop, pero con algunas mejoras. Tiene una capacidad de succión de hasta 2100 Pa y una función de fregado mejorada que utiliza un sistema de tanque de agua ajustable. También cuenta con un sistema de navegación láser y una batería de larga duración (ver figura 2) (Xiaomi, s.f.).

Box 3



Figura 2

Robot aspiradora Xiaomi

Fuente [Xiaomi, s.f.]

Samsung

Samsung es una de las empresas líderes en tecnología y electrónica de consumo, y ha desarrollado varias aspiradoras robotizadas en su línea de productos, conocida como "Samsung POWERbot" (ver figura 3). Estas aspiradoras utilizan tecnología avanzada para proporcionar una limpieza efectiva y eficiente en el hogar.

Box 4**SAMSUNG****Figura 3**

Robot aspiradora Samsung POWERbot

Fuente [Samsung, s.f.]

Samsung tiene varios modelos de aspiradoras robotizadas en su línea POWERbot. Otros de los modelos más populares son:

Samsung POWERbot R7065

Este modelo cuenta con un motor potente y una tecnología de mapeo inteligente para limpiar a fondo su hogar. También tiene conectividad Wi-Fi y es compatible con asistentes de voz como Amazon Alexa y Google Assistant.

Samsung POWERbot R9250

Este modelo cuenta con un cepillo giratorio para una limpieza más profunda de alfombras y tapetes. También tiene una cámara integrada para una mejor navegación y mapeo del hogar.

Samsung POWERbot R7040

Este modelo es más asequible que otros en la línea POWERbot, pero aun así ofrece una limpieza efectiva y eficiente. Cuenta con tecnología de mapeo y navegación inteligente, y es compatible con Wi-Fi y asistentes de voz.

Samsung POWERbot Essential

Este modelo es una opción más básica en la línea POWERbot, pero aún así ofrece una buena limpieza. Cuenta con un motor potente y un diseño delgado para acceder a áreas difíciles de alcanzar.

Shark

Shark es una marca de aspiradoras que ofrece varios modelos diferentes, incluyendo varios modelos de robots aspiradores. Los robots aspiradores Shark están diseñados para ayudar a mantener limpia tu casa de manera autónoma, navegando por la habitación con sensores y tecnología de mapeo para limpiar eficazmente el suelo y las alfombras. Entre los modelos de robots aspiradores Shark, se incluyen las series:

Shark AI

La serie Shark AI de robots aspiradoras es la línea más avanzada de la marca Shark. Estos robots aspiradores utilizan la tecnología de inteligencia artificial (AI) para aprender los patrones de limpieza y mejorar su eficiencia y rendimiento con el tiempo, también tienen un sistema de mapeo avanzado y una cámara de navegación para una limpieza más precisa y ordenada. Además, cuentan con sensores antichoque y anticaída para evitar obstáculos y caídas.

Shark ION

Este modelo también utiliza la tecnología de mapeo y navegación para limpiar de manera eficiente las superficies del hogar, cuenta con una base de carga automática y una batería de larga duración, lo que significa que puede limpiar durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recargarse. Además, cuenta con sensores antichoque y anticaída para evitar obstáculos y caídas.

Shark IQ

Cuenta con una cámara integrada que escanea y mapea el hogar para una limpieza precisa y ordenada. Además, cuenta con una base de carga automática y una batería de larga duración, lo que significa que puede limpiar durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recargarse, ver figura 4 (SharkClean, s.f.).

Box 5



Figura 4

Robot aspiradora Shark IQ

Fuente [Shark, s.f.]

Avances en Robots aspiradores

Los avances actuales de los robots aspiradores están basados en:

Navegación autónoma: Los robots aspiradores utilizan una combinación de sensores, cámaras y algoritmos avanzados para lograr la navegación autónoma en los entornos de limpieza. Estos robots pueden detectar obstáculos, evitar caídas por escaleras y mapear el espacio para planificar rutas eficientes.

Inteligencia artificial: los robots aspiradores están incorporando cada vez más capacidades de inteligencia artificial (IA) para mejorar su desempeño. Esto incluye la capacidad de aprender y adaptarse a los patrones de limpieza del hogar, así como la capacidad de reconocer y evitar obstáculos mediante algoritmos de procesamiento de imágenes y datos.

Conectividad y control remoto: muchos robots aspiradores son compatibles con aplicaciones móviles que permiten a los usuarios controlarlos de forma remota, programar horarios de limpieza, recibir notificaciones y supervisar el progreso de la limpieza. Varios modelos también son compatibles con asistentes de voz como Amazon Alexa o Google Assistant, lo que permite controlarlos mediante comandos de voz.

Mayor autonomía y eficiencia energética: los robots aspiradores están mejorando su autonomía y eficiencia energética. Otros modelos cuentan con baterías más duraderas, lo que les permite limpiar durante más tiempo antes de necesitar recargarse, y otros utilizan algoritmos de optimización de energía para maximizar su eficiencia en la limpieza.

Mayor capacidad de limpieza: los robots aspiradores están mejorando su capacidad de limpieza, incluyendo la capacidad de aspirar diferentes tipos de suelos, como alfombras de pelo largo o suelos duros, así como la capacidad de realizar una limpieza más efectiva en bordes y esquinas.

Tecnología de detección y evitación de obstáculos: los robots aspiradores están incorporando sensores más avanzados para detectar y evitar obstáculos, como muebles, escaleras u otros objetos. Varios modelos utilizan tecnologías como la detección de caídas o sensores de choque para evitar daños o accidentes durante la limpieza.

Diseño compacto y ergonómico: los robots aspiradores están mejorando su diseño, volviéndolos más compactos y ergonómicos para adaptarse a diferentes espacios del hogar y ser más eficientes en la limpieza.

Funciones adicionales: algunos robots aspiradores ofrecen características adicionales, como la capacidad de trapear, limpiar en húmedo e incluso vaciar automáticamente su depósito de suciedad en una estación de vaciado. Estas características adicionales brindan una mayor versatilidad y comodidad en la limpieza del hogar.

En general, los avances tecnológicos de los robots aspiradores están en constante evolución, con mejoras continuas en su capacidad de limpieza, navegación autónoma, eficiencia energética, conectividad y funciones adicionales. Esto los hace cada vez más avanzados y eficientes en la limpieza del hogar.

3. Diseño y construcción del prototipo

Diseño de estructura

El diseño del robot se divide en tres secciones principales:

- Parte inferior: En esta sección se encuentran ubicados los motores, las llantas y el circuito que controla el funcionamiento del robot. Estos componentes son fundamentales para el movimiento y desplazamiento del robot durante la limpieza.
- Sensores: En la sección intermedia del robot se encuentran los sensores. Estos sensores son responsables de detectar objetos y obstáculos en el entorno, evitando colisiones y realizando una navegación más precisa.
- Parte superior: En la parte superior del robot se sitúan la bomba aspiradora y el depósito de basura. La bomba aspiradora se encarga de succionar el polvo y la suciedad del suelo, mientras que el depósito de basura almacena los residuos recolectados durante el proceso de limpieza. Esta sección es de gran importancia ya que garantiza la efectividad del robot para mantener los pisos limpios.

El diseño y ubicación de estos componentes en diferentes secciones del robot buscan optimizar su funcionalidad, rendimiento y estética general, figura 5.

Box 6

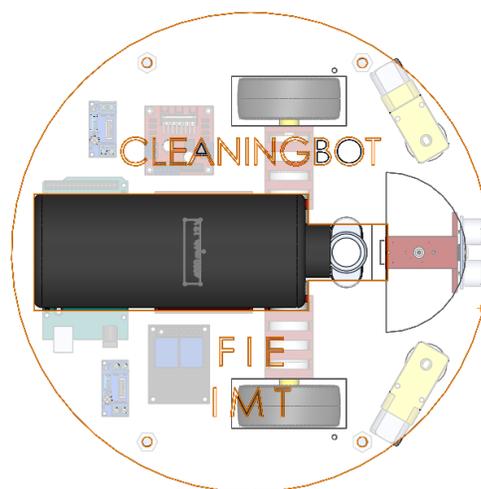


Figura 5

Vista superior de prototipo

Fuente: Elaboración propia

Componentes electrónicos

A continuación, se describirán todos los componentes utilizados para la construcción y funcionamiento de este proyecto. Cada componente cumple un papel específico en el sistema y contribuye a su operación eficiente.

Motores

Los motores de corriente continua con caja de cambios son adecuados para aplicaciones en las que se necesita un alto par de torsión, para superar obstáculos como alfombras y transportar el peso del robot. La relación de engranajes 1:224, figura 6, para las ruedas indica que el motor proporcionará un mayor torque, lo que permitirá que las ruedas tengan la fuerza necesaria para desplazarse y superar obstáculos.

Box 7

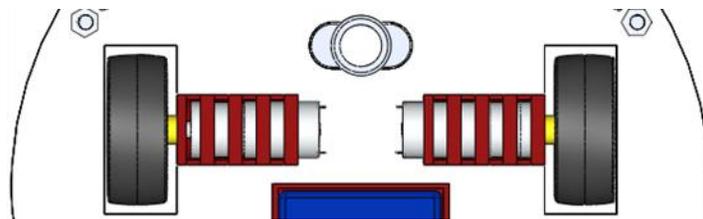


Figura 6

Motores CC 1:224

[Elaboración propia]

En el caso de las escobillas, la relación de engranajes 1:120 de los motores que se muestran en la figura 7, proporcionará un mayor torque, lo que resulta beneficioso para realizar tareas de limpieza en superficies, ya que se requiere una presión adecuada para asegurar la efectividad de la limpieza.

Box 8

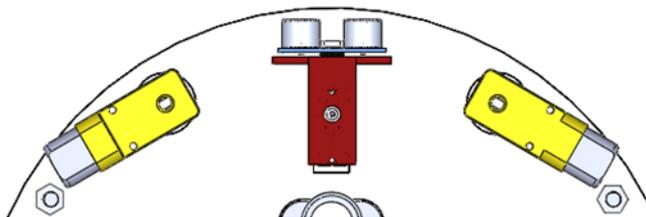


Figura 7

Motores CC 1:120

Fuente [Elaboración propia]

Microcontrolador

El uso del microcontrolador Arduino Mega 2560, figura 8, es una elección adecuada para el proyecto de desarrollo del robot aspiradora. El Arduino Mega 2560 posee el número de puertos, necesarios para conectar los sensores y actuadores al sistema (Arduino, s. f.).

Box 9

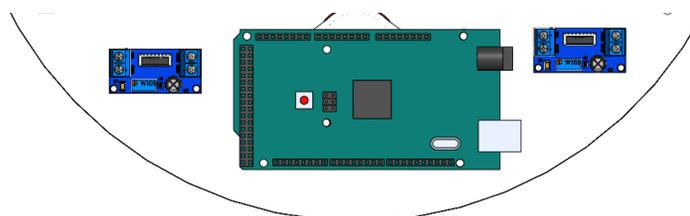


Figura 8

Microcontrolador Arduino Mega 2560

Fuente [Elaboración propia]

Una de las ventajas principales de Arduino Mega 2560 es su versatilidad de programación en entornos de código abierto, lo que significa que puedes utilizar diferentes lenguajes de programación y bibliotecas disponibles en la comunidad de Arduino. Esto te permite personalizar y adaptar el comportamiento del robot aspiradora según tus necesidades específicas.

Controlador de potencia

El L298N que se muestra en la figura 9, es un puente H doble, lo que significa que puede controlar la dirección de rotación y la velocidad de los motores de manera eficiente. Además, el hecho de que el L298N venga ensamblado con disipadores de calor es beneficioso, ya que ayuda a mantener la temperatura adecuada durante el funcionamiento del controlador, evitando posibles problemas de sobrecalentamiento (Prometec, s. f.).

Box 10



Figura 9

Controlador L298N

Fuente [Elaboración propia]

Sensores

Se implementan dos tipos de sensores de proximidad en el robot: infrarrojos y ultrasónicos. Los sensores infrarrojos se ubican en la parte intermedia del robot para detectar obstáculos altos, mientras que el sensor ultrasónico HC-SR04 (figura 10) se encuentra en la parte frontal baja y detecta obstáculos bajos como escalones. Con esta combinación de sensores, se logra la evasión de obstáculos y se determina la vía óptima para continuar con la tarea de aspirado (ElecFreaks, s. f.).

Box 11

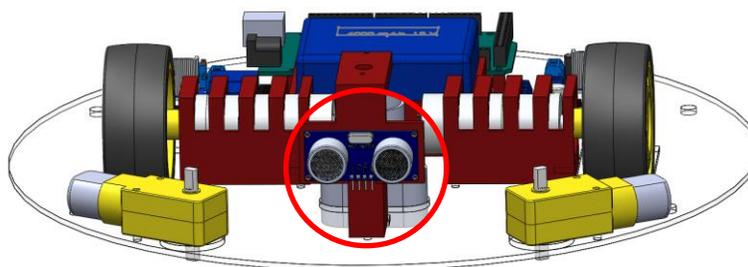


Figura 10

Sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente [Elaboración propia]

Alimentación

Para lograr el funcionamiento del robot aspiradora, figura 11, se implementaron dos baterías recargables: una de 9V con capacidad de 175 mAh y otra de 12V con capacidad de 6000 mAh. La primera batería se utiliza exclusivamente para alimentar la turbina aspiradora, mientras que la segunda batería se encarga de suministrar energía al puente H que controla los motores de las ruedas del robot. Además, esta batería alimenta un módulo de relevadores que a su vez controla los motores de las escobillas. Todo este sistema está respaldado por dos reguladores de 5V, como se muestra en la figura 12, para garantizar un suministro estable de energía.

Box 12

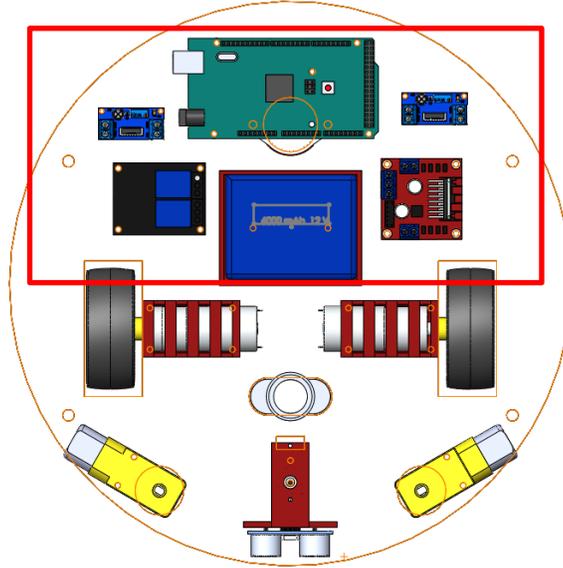


Figura 11

Parte inferior del robot aspiradora

Fuente [Elaboración propia]

Circuito

A continuación, en la figura 12 se muestra el circuito general del robot aspiradora y se explicará su etapa de potencia y de control.

Box 13

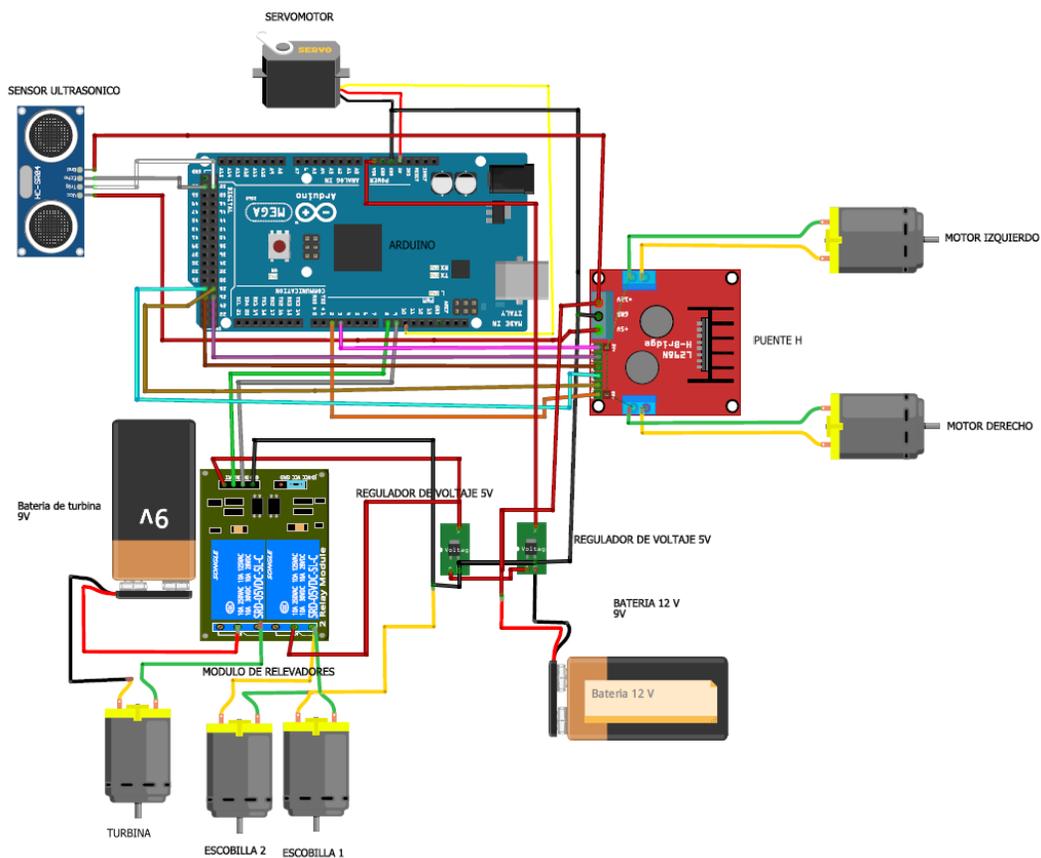


Figura 12

Circuito del robot aspiradora

Fuente [Elaboración propia]

El circuito de potencia y control del robot aspiradora se compone de varios elementos clave, posee dos baterías recargables previamente mencionadas: la batería de 9V y la batería de 12V.

La batería de 9V que se visualiza en la figura 13 se utiliza para alimentar exclusivamente la turbina aspiradora. Proporciona la energía necesaria para generar el flujo de succión que permite recolectar la suciedad y el polvo.

Box 14

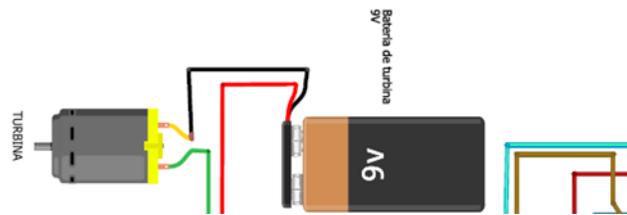


Figura 13

Circuito de alimentación de la turbina aspiradora

Fuente [Elaboración propia]

Por otro lado, la batería de 12V es la encargada de suministrar energía al puente H, que a su vez controla los motores de las ruedas del robot. Este puente H permite invertir el sentido de giro de los motores, lo que facilita el movimiento del robot en diferentes direcciones. Además, la batería de 12V también alimenta un módulo de relevadores, el cual controla los motores de las escobillas. Los relevadores permiten encender y apagar los motores de las escobillas según sea necesario. Para garantizar un suministro estable de energía, se utilizan dos reguladores de 5V. Estos reguladores se encargan de convertir la tensión de las baterías a un nivel constante de 5V, que es el voltaje adecuado para alimentar los componentes de control del robot, figura 14.

Box 15

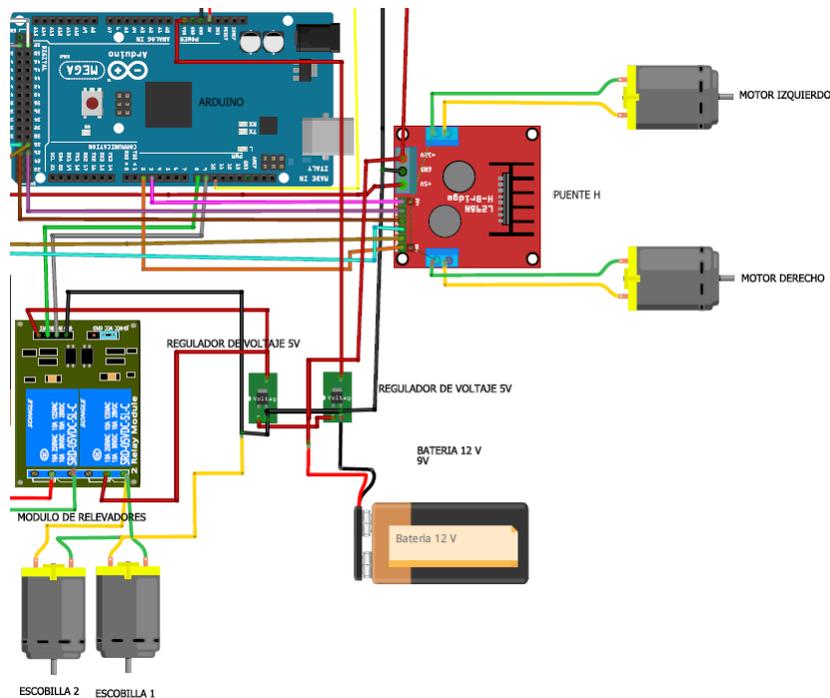


Figura 14

Circuito de alimentación para los motores de las escobillas y las ruedas

Fuente [Elaboración propia]

Por último, en la figura 15 se encuentran un servomotor MG90S y un sensor ultrasónico HC-SR04 para detectar obstáculos.

Box 16

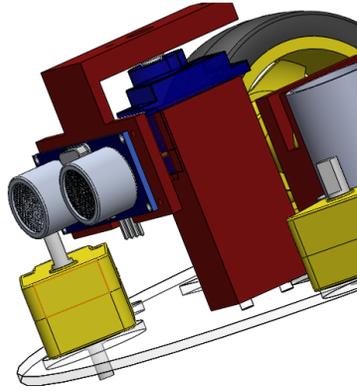


Figura 15
Sensor ultrasónico HC-SR04 y servomotor MG90S

Fuente [Elaboración propia]

El sensor ultrasónico HC-SR04 emite pulsos ultrasónicos y mide el tiempo que tarda en recibir el eco de estos pulsos al rebotar en un objeto. Esta información se utiliza para determinar la distancia entre el robot y el obstáculo más cercano. El servomotor se emplea para girar el sensor ultrasónico en un ángulo de 180° como se visualiza en la figura 16, lo que permite escanear los alrededores del robot en busca de obstáculos.

Box 17

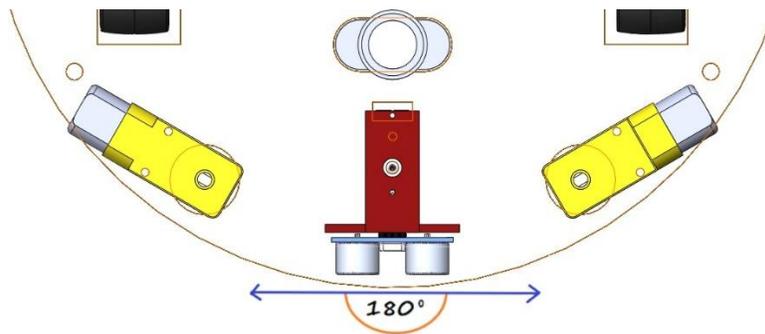


Figura 16
Ángulo de giro del sensor ultrasónico

Fuente [Elaboración propia]

Cuando el sensor ultrasónico detecta un obstáculo, envía una señal de retroalimentación al sistema de control del robot, figura 17. Esta señal se procesa a través del puente H, que es el encargado de controlar los motores de las ruedas. Dependiendo de la cantidad de obstáculos detectados y su ubicación, el sistema de control puede tomar decisiones para cambiar la orientación del robot, haciendo que gire o retroceda para evitar colisiones y encontrar una ruta libre.

Box 18

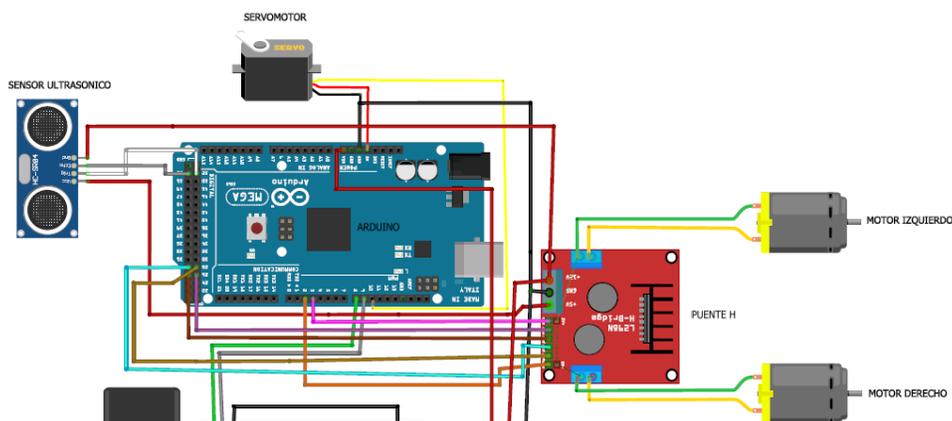


Figura 17
Circuito de control de giro del robot aspiradora

4. Programación del robot

A continuación, se muestra en la Figura 18 el funcionamiento del robot aspiradora. Comienza con la detección de un ping o señal por parte de los sensores centrales. Dependiendo de la distancia al obstáculo, el robot avanza hacia la derecha, hacia la izquierda o continúa recto hasta que la distancia sea suficiente para cambiar de dirección. Este proceso se repite si algún sensor lateral derecho o izquierdo detecta un obstáculo, permitiendo al robot mantener su dirección actual o cambiarla según corresponda, mientras aspira la superficie en la que está transitando.

Box 19

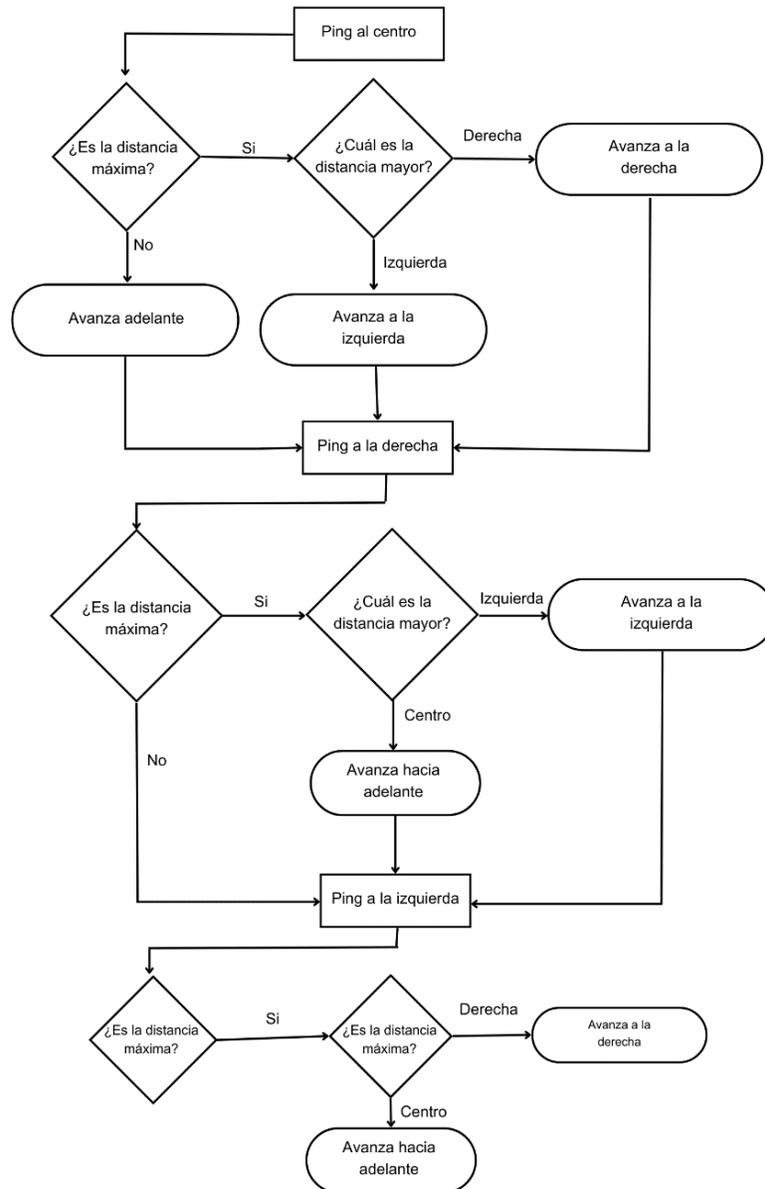


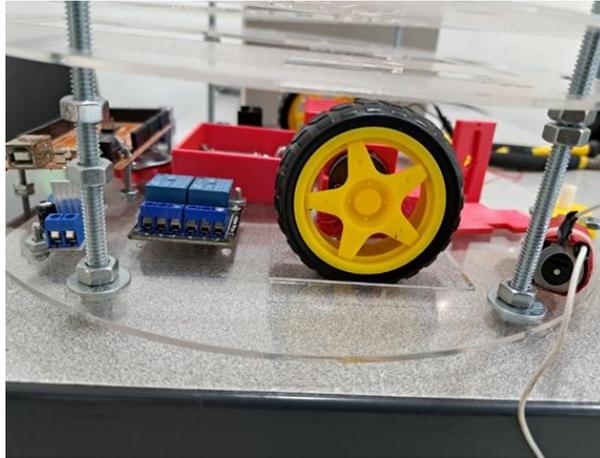
Figura 18

Lógica de programación

Fuente [Elaboración propia]

5. Resultados

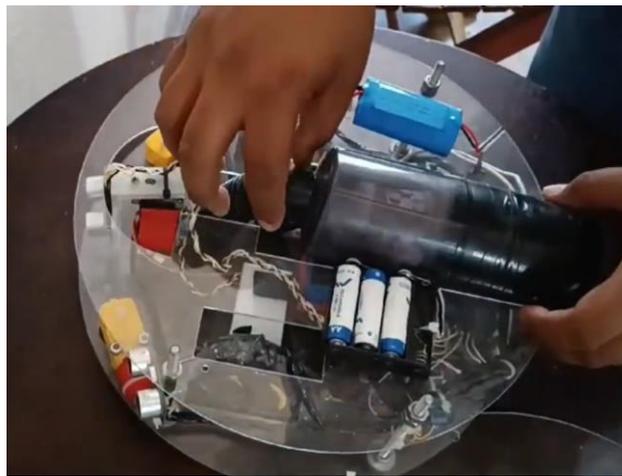
En la figura 19 se presenta una vista lateral del prototipo final construido, conteniendo de forma interna cada uno de sus componentes.

Box 20**Figura 19**

Vista lateral del Prototipo finalizado

Fuente [Elaboración propia]

La figura 20 muestra la colocación del depósito donde se concentra el material absorbido por el prototipo con la finalidad de limpiar un espacio.

Box 21**Figura 20**

Depósito para el material

Fuente [Elaboración propia]

Las figuras 21, 22, 23 y 24 presentan al prototipo finalizado y en funcionamiento, desempeñando su función en espacios donde la limpieza es requerida.

Box 22**Figura 21**

Funcionamiento del prototipo absorbiendo tierra

Box 23**Figura 22**

Funcionamiento del prototipo absorbiendo papeles

Fuente [Peregrina, 2024]

Box 24**Figura 23**

Evitando colisión en pared

Fuente [Peregrina, 2024]

Box 25**Figura 24**

Evitando colisión en esquina

Fuente [Peregrina, 2024]

El resultado final obtenido después de la limpieza de un espacio se observa en las figuras 25 y 26 donde se realiza el desalojo del material concentrado en el depósito después de su funcionamiento.

Box 26**Figura 25**

Limpieza del filtro

*Fuente [Peregrina, 2024]***Box 27****Figura 26**

Desalajo del material absorbido

*Fuente [Peregrina, 2024]***6. Conclusiones**

Este proyecto representa una aplicación en el campo de la mecatrónica, centrada en el diseño y construcción de un sistema autónomo para la limpieza de superficies horizontales. A lo largo del trabajo, se abordaron conceptos de robótica, navegación y automatización, esenciales para el desarrollo del prototipo.

El sistema desarrollado evidencia cómo la implementación de tecnologías puede mejorar los procesos de limpieza en interiores, reflejando un enfoque integral en la resolución de problemas mediante la integración de sistemas mecatrónicos. Además, destaca el esfuerzo y dedicación invertidos en diseñar, construir y validar un prototipo funcional que mejore la eficiencia y autonomía de los sistemas de limpieza.

Como líneas de trabajo futuras, se contempla optimizar la programación de la trayectoria del sistema, con el objetivo de maximizar su eficacia en la limpieza de las áreas asignadas.

Declaraciones**Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el capítulo del que se informa en este libro.

Contribución de los autores

Charre-Ibarra, Saida: Contribuyo con la idea del Proyecto, escritura del reporte y diseño.

Monroy-Xochihua, Brayan: Contribuyo en la programación, escritura y revisión del reporte.

Ortiz-Ceja, Alan: Contribuyo en el diseño, construcción y pruebas del prototipo.

Peregrina-Madrigal, Gerardo: Contribuyo en las pruebas, escritura y revisión del reporte.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos utilizados o analizados durante el presente trabajo están disponibles a solicitud.

Financiación

Financiado con recursos propios, no se recibió ningún financiamiento.

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

Referencias

Antecedents

Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Marcombo.

Basics

Arduino. (s. f.). [Mega 2560 Rev3 | Arduino Documentation](#).

Elecfreaks. (s. f.). [HC-SR04 ultrasonic sensor datasheet](#).

Hernández, R.R., Silva-Ortigoza, R., & Vilchis, M.A. (2007). *La Visión Artificial en la Robótica*. Polibits, 35, 22-28.

iRobot. (s. f.). [iRobot México](#).

Sosa Reyna, CM, (2006). *La robótica presente en la Uacsyt*. CienciaUAT, 1 (2),30-31. ISSN: 2007-7521.

Peregrina, M. G. (2024). Prueba de la tesis «[Sistema mecatrónico para limpieza de superficies en un plano horizontal](#)» [Vídeo]. YouTube.

Pérez, D., Maza, J., & Merino, L. (2013). *Diseño e Implementación de Interfaz Persona Máquina y Sistema de Análisis Post-Misión para robot autónomo móvil Romeo-4R*.

Promotec. (s. f.). [L298N: Puente H para motores DC](#).

Samsung. (s. f.). [Samsung México](#).

SharkClean. (s. f.). [Robot aspirador](#).

STMicroelectronics. (2000). [L298 H-Bridge motor driver datasheet](#).

Xiaomi. (s. f.). [Robot Vacuum Cleaner](#). Xiaomi México.

Supports

Pattison Tuohy, J. (2017). *Robots Are Coming for Your Job: A Human's Survival Guide to Profiting in the Age of Automation*. Skyhorse Publishing.

Pérez, D., Maza, J., & Merino, L. (2013). *Diseño e Implementación de Interfaz Persona Máquina y Sistema de Análisis Post-Misión para robot autónomo móvil Romeo-4R*.

Salazar, MT, Chalán, RV, Astudillo, DE y Agurto, AD (2020). [Propuesta de prototipo de robot aspirador de bajo costo y alta tecnología aplicado a procesos de limpieza de baja escala](#). *Ciencia y Tecnología*, 13 , 105-112.

Vera. P., Endera, M. (2019). [Diseño de robot de seguridad usando como plataforma de desarrollo una aspiradora robótica](#).

Widiarto, YD, Najoran, ME & Putro, MD (2018). [Sistem Penggerak Robot Beroda Aspirador Berbasis Mini Computadora Raspberry pi](#). *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer* Vol. 7 No.1 (2018), ISSN : 2301-8402.

Diseño de un sistema embebido para el desarrollo y monitoreo de un hábitat artificial

Embedded System Design for Developing and Monitoring an Artificial Marine Habitat

Cardona-Robles, Julio^a, Alcalá-Rodríguez Janeth*^b, Charre-Ibarra, Saida^c y Gudiño-Lau, Jorge^d

^a ROR Universidad de Colima •  0009-0000-6841-497X

^b ROR Universidad de Colima •  B-3181-2013 •  0000-0002-0238-3952 •  449057

^c ROR Universidad de Colima •  Q-6851-2018 •  0000-0002-3823-5388

^d ROR Universidad de Colima •  Q-6844-2018, •  0000-0002-0585-908X •  122644

Clasificación CONAHCYT:

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería Electrónica

Subdisciplina: Diseño y sistemas

Key Books

El capítulo aborda el diseño de un sistema embebido que combina tecnología fotovoltaica y sensores para monitorear y promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales. La principal contribución radica en su enfoque innovador al integrar el monitoreo en tiempo real con estructuras modulares que optimizan el anclaje y el crecimiento coralino. Este diseño escalable y sostenible representa un avance significativo en la regeneración de ecosistemas marinos, respondiendo a los desafíos actuales que enfrentan los arrecifes de coral. Dentro de los aspectos clave para aplicar al desarrollo de conocimiento universal, se destacan los siguientes puntos:

- La relación entre el diseño de hábitats artificiales y el crecimiento coralino.
- La integración de tecnologías fotovoltaicas y sensores en sistemas embebidos para entornos marinos.
- La importancia de la modularidad y sostenibilidad en soluciones para la regeneración de ecosistemas.
- El análisis de los desafíos técnicos enfrentados y las propuestas de mejora presentadas para futuras implementaciones.

El proyecto contó con financiamiento interno. En cuanto a las y los autores del trabajo, trabajaron en colaboración un estudiante de licenciatura y tres docentes, las y el docente cuentan con perfil PRODEP, una autora tiene beca CONAHCYT. Este es el primer trabajo en el campo multidisciplinario en que las y los autores trabajan en este proyecto en colaboración con otras dependencias de la institución, en una universidad pública a la cual están adscritos, Universidad de Colima.

Citación: Cardona-Robles, Julio, Alcalá-Rodríguez Janeth, Charre-Ibarra, Saida y Gudiño-Lau, Jorge. 2024. Diseño de un sistema embebido para el desarrollo y monitoreo de un hábitat artificial. 41-59. ECORFAN.

* ✉ janethalcala@ucol.mx

Book shelf URL: <https://www.ecorfan.org/books.php>



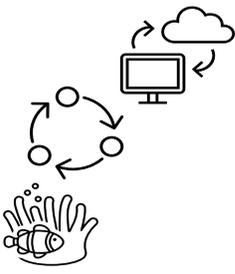
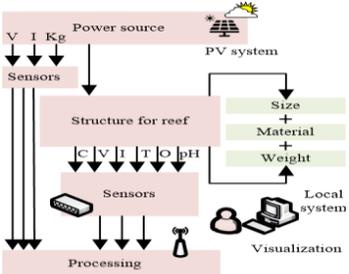
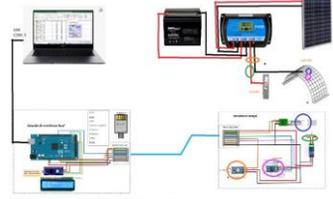
ISBN 978-607-8948-47-5 /© 2009 The Author[s]. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Book MMP. This is an open access book under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID® - in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

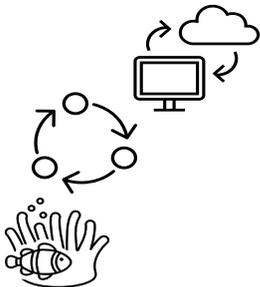
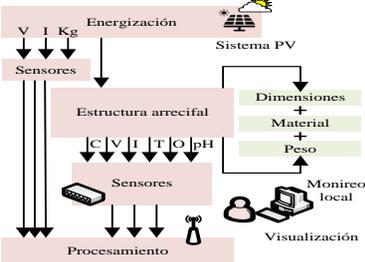
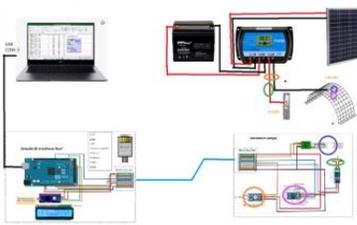
Coral reefs are among the most biodiverse and threatened ecosystems, facing accelerated degradation due to climate change, pollution, and overexploitation. Artificial habitats have emerged as a promising alternative for regenerating these vital marine ecosystems. This chapter introduces an embedded system design integrating photovoltaic technology and environmental sensors to monitor and enhance coral growth within artificial habitats. Unlike traditional methods, the proposed system features real-time monitoring capabilities combined with modular structures designed to optimize coral anchoring and growth, ensuring scalability and sustainability. The methodology includes a detailed analysis of design principles, preliminary performance results, and the technical challenges faced during development. Key improvements for future iterations are also discussed, focusing on energy efficiency and durability in harsh marine environments. This research contributes to advancing technological solutions for marine ecosystem restoration and supports the development of sustainable practices in coral reef conservation.

Embedded system design for developing and monitoring an artificial marine habitat		
Objective	Methodology	Contribution
<p>Developing a monitoring system to promote coral growth in artificial habitats.</p> 	<p>4. Design of the monitoring system. 5. Design of the power supply and local/Remote visualization system. 6. Test bench and experimental validation.</p> 	<p>1. Modular structure that optimizes coral anchoring and growth. 2. Adapts to different marine environments. 3. Autonomous feeding system. 4. Easy assembly and maintenance, for monitoring, recording and alarm.</p> 

Artificial reef, Embedded systems, Environmental monitoring

Abstract

Los arrecifes de coral representan uno de los ecosistemas más biodiversos y amenazados del planeta. Factores como el cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación han acelerado la degradación de estos hábitats esenciales. En respuesta, el desarrollo de hábitats artificiales se ha convertido en una alternativa viable para la regeneración de los ecosistemas marinos. Este capítulo presenta el diseño de un sistema embebido que integra tecnología fotovoltaica y sensores para monitorear y promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales. A diferencia de otras propuestas, este sistema combina el monitoreo en tiempo real con estructuras modulares diseñadas para optimizar el anclaje y crecimiento coralino, proporcionando un enfoque escalable y sostenible. Se detalla la metodología de diseño, el análisis de resultados preliminares, los desafíos técnicos enfrentados y las conclusiones, con propuestas de mejora para futuras implementaciones.

Diseño de un sistema embebido para el desarrollo y monitoreo de un hábitat artificial		
Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Desarrollar un sistema de monitoreo para promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales.</p> 	<p>1. Diseño del sistema de monitoreo 2. Diseño del sistema de energización y visualización local y remota. 3. Implementación y validación experimental.</p> 	<p>1. Estructura modular que optimiza el anclaje y crecimiento coralino. 2. Se adapta a diferentes entornos marinos. 3. Sistema autónomo de alimentación. 4. Facilidad de ensamblaje y mantenimiento, para el monitoreo, registro y alarma.</p> 

Arrecife artificial, Sistema embebido, Monitoreo ambiental

Introducción

Un arrecife marino es una estructura submarina formada principalmente por corales y algas coralinas, que secretan carbonato de calcio (CaCO_3), creando hábitats complejos y biodiversos. Existen varios tipos de arrecifes, como barreras, franja y atolones. Estos ecosistemas albergan el 25% de las especies marinas y actúan como barreras naturales que protegen las costas contra la erosión y tormentas. Además, desempeñan un papel crucial en el ciclo del carbono y la regulación del pH oceánico (Liñán et al., 2010).

Desde un punto de vista técnico, los arrecifes requieren condiciones específicas de temperatura (23-29 °C), salinidad (32-42 ppt) y luz solar. Sin embargo, enfrentan amenazas como la acidificación del océano, el blanqueamiento de corales y la contaminación por actividades humanas (Bjerreskov, Nord-Larsen, & Fensholt, 2021).

La tecnología moderna apoya la monitorización y conservación de arrecifes mediante el uso de drones, satélites, sensores in-situ y modelos matemáticos para predecir impactos futuros. Además, los arrecifes artificiales se han implementado como soluciones para restaurar ecosistemas degradados. Ante los desafíos actuales, es esencial integrar tecnología para garantizar la preservación de estos ecosistemas vitales para la biodiversidad (Díaz-Castillo et al., 2014) y las comunidades costeras (Obura et al., 2019).

El género del coral *porolithothion* es uno de los de mayor diversidad de especie coralina, y es considerado uno de los principales constructores de arrecifes marinos. Sus especies poseen la mayor tasa de crecimiento de los corales y compiten ampliamente por el espacio con el resto de las especies coralinas, principalmente con las de lento crecimiento, su principal mecanismo de reproducción es asexual o por fragmentación, formándose así los denominados corales oportunidad “CO” (Edwards & Gomez, 2007). Los arrecifes son una estructura marina formada por carbonato de calcio (CaCO_3). Los arrecifes naturales son cruciales para el ecosistema, ya que albergan el 25% de la vida marina en la superficie oceánica. Sin embargo, a pesar de su gran importancia ecológica, los arrecifes coralinos están en riesgo debido a factores tanto naturales como causados por el ser humano. Entre estos últimos, la contaminación, la deforestación, la extracción desmedida y la sobrepesca pueden desestabilizar los ecosistemas coralinos, provocando fragmentación, blanqueamiento o bioerosión, y afectando negativamente los procesos naturales de crecimiento y reproducción (Islas-Peña, Liñán-Cabello, & Torres-Orozco, 2013).

En el estado de Colima se reportan 28 especies de corales, entre los problemas a los que se enfrentan los arrecifes de corales en el estado se reporta el exceso de sedimento que llega a sus aguas. Los sistemas coralinos más representativos del litoral son los de “La boquita” y “bahía de Carrizales”. En la bahía de Carrizales se detectaron dos tipos de especímenes denominados corales sanos y corales semipálidos y en la Boquita corales totalmente decolorados observándose altas concentraciones de clorofila y pigmentos. De acuerdo con lo reportado esto se debe a la exposición que se tiene a la luz solar derivada de la profundidad de la zona (1.20m).

Los daños al coral típicamente se tipifican considerando el ocasionado por la actividad humana, anclaje de embarcaciones, remoción de sedimentos y desprendimiento de coral por contacto o por remoción. También se reporta que en la boquita el mayor daño identificado se debe a una “inadecuada ubicación de la infraestructura que comunica a la laguna de Juluapan con el mar”. Lo que ha originado que aproximadamente el 17% del arrecife presente en la zona se encuentre sepultado por el sedimento que desemboca en la laguna, lo que ha desencadenado una reacción que genera macroalgas, disminución de luz y reducción de los nutrientes que contribuyen a una buena fotosíntesis para las microalgas que viven dentro del coral (Islas-Peña, Liñán-Cabello, & Torres-Orozco, 2013).

Los estudios indican que independientemente de las diferentes condiciones encontradas en los arrecifes coralinos, la problemática que se vive en la actualidad en cada localidad ubicada en las costas del estado se origina por falta de conocimiento y conciencia por parte de la sociedad. Así como del poco aprovechamiento que se tiene de las comunidades arrecifales. Por ello a continuación, en este trabajo se presenta una propuesta para contribuir con el estudio y monitoreo para el desarrollo de los arrecifes artificiales, se presenta el diseño de un sistema embebido que integra tecnología fotovoltaica y sensores para monitorear y promover el crecimiento coralino en hábitats artificiales.

A diferencia de otras propuestas, este sistema combina el monitoreo en tiempo real con estructuras modulares diseñadas para optimizar el anclaje y crecimiento coralino, proporcionando un enfoque escalable y sostenible. El capítulo está estructurado de la siguiente manera: se da una breve introducción a las estructuras arrecifales para presentar sus principales características y funcionalidad, posteriormente se detalla la metodología de diseño, el análisis de resultados preliminares, los desafíos técnicos enfrentados y las conclusiones, con propuestas de mejora para futuras implementaciones. Se plantea como objetivo general crear un hábitat submarino artificiales que contribuya a la atracción y concentración de peces e invertebrados proporcionando las condiciones necesarias para su proliferación y conservación.

Estructuras arrecifales

Los arrecifes de coral están desapareciendo de los océanos a velocidad alarmante. Al menos tres cuartas partes de estos hábitats marinos tropicales están gravemente amenazados a nivel mundial. Por lo que dentro de las soluciones propuestas se ha planteado utilizar la tecnología para ayudar a crear arrecifes que se denominan artificiales. Los arrecifes artificiales son estructuras creadas por el ser humano con diversos materiales, acondicionadas para proporcionar un hábitat adecuado para diversas especies de la flora y fauna marinas. Estas estructuras pueden ser de concreto, de metal, pueden ser cilíndricas, cuadradas e incluso, grandes barcos que ya han perdido su capacidad útil de navegación.

Proveen un sustrato duro a aquellas especies que lo necesitan para desarrollarse (los llamados organismos sésiles) como las algas, las esponjas, las gorgonias y los corales, entre otras criaturas. A su vez, tanto estos organismos como la propia estructura artificial, proveen refugio y alimento a las más diversas especies como los peces, los crustáceos, entre otros. Estas estructuras no solo contribuyen a la generación de espacios para la nueva vida submarina que las colonizan, también son útiles ya que disminuyen la presión sobre los arrecifes naturales proporcionando sitios alternativos para el buceo y la pesca submarina, actividades que pueden llegar a sobreexplotar las zonas de arrecifes. Muy relacionado con esto está el beneficio económico que pueden significar al atraer a los cada vez más numerosos ecoturistas que gustan de explorar, por ejemplo, los barcos hundidos.

Otro de los grandes beneficios de estas estructuras es su contribución a la disminución de la pesca ilegal mediante el uso de redes de arrastre. Este agresivo método de pesca suele arrasar con el fondo marino, destruyendo completamente ecosistemas muy sensibles y de difícil recuperación. Los arrecifes artificiales provocan que las redes queden atoradas y se rompan, por lo que los pescadores se abstienen de emplearlas en estas zonas.

La tecnología utilizada para la elaboración de un arrecife artificial es cada vez más refinada, ya que en Japón las industrias han sido capaces de desarrollar cerca de 100 diseños comerciales de unidades prefabricadas de arrecifes, hechas de material duradero y fuerte (cemento, acero y plástico). Por ejemplo, se han formado inicialmente con barcos hundidos, troncos de madera, piedras, bloques y tubos de concreto, carrocerías de automóviles. Después con estructuras prefabricadas con fibra de vidrio y plástico, otras estructuras metálicas y más recientemente con estructuras *ReefBalls* y llantas usadas, campo eléctrico, etc. Se han construido arrecifes artificiales denominados *Tsukiiso*, especialmente para expandir arrecifes naturales o crear nuevas áreas (Edwards & Gomez, 2007).

Dentro del ámbito de la restauración física está el uso de arrecifes artificiales, que puede ser desde bloques de piedra caliza hasta módulos de concreto (por ejemplo, *ReefBalls*) o de cerámica (por ejemplo, *EcoReefs*), o minerales (*brusita* o *aragonita*) depositados electrolíticamente sobre estructuras de malla de alambre (por ejemplo, BioRoc).

El uso de estas estructuras en los proyectos de restauración debe ser considerado cuidadosa y críticamente, dado que los arrecifes artificiales se colocan en las aguas costeras con diversos fines, los hay de varios tipos y muchos de ellos han sido construidos especialmente para cumplir la función prevista. Sin embargo, los peces son atraídos por estructuras sumergidas y permanecen en su vecindad, entonces, cualquiera que sea el motivo de esta atracción, hay más pesca en los sitios donde hay objetos que en áreas desprovistas de ellos (Convenio de Londres y protocolo/PNUMA, 2006).

Estos ambientes artificiales son difíciles de estudiar, pero a pesar de todas las complicaciones experimentales, cada vez se acumulan más datos que indican que los arrecifes convenientemente diseñados y colocados en áreas adecuadas, teniendo en cuenta las corrientes, la naturaleza del fondo y la proximidad de otros arrecifes, hacen aumentar la producción notablemente. Entre los diferentes tipos de arrecifes artificiales, las estructuras y materiales a analizar están reportados en la guía para materiales en arrecifes artificiales marinos (Lukens & Selberg, 2004). Los materiales que se pueden utilizar en un arrecife artificial incluyen opciones naturales, recicladas o prefabricadas. Una combinación de estos tipos de materiales contribuye a una mayor diversidad de especies dentro del arrecife y se pueden encontrar tales como:

- Arrecifes de oportunidad (barcos, barcasas, aviones, coches, vagón de ferrocarril, neumáticos de vehículos, piedras, ripio, entre otros).
- Arrecifes de protección (hormigón)
- Arrecifes de producción (hormigón)
- Arrecifes de producción (hormigón-*reef ball*)
- Arrecifes de producción (cerámica ramificada-*ecoreef*)
- Arrecifes mixtos (hormigón)
- Arrecife artificial monolítico (hormigón)
- Arrecife fractal artificial (hormigón)
- Arrecife artificial de reproducción por el método de la electrodeposición (*biorock*)

Entre las soluciones planteadas para la creación de arrecifes artificiales se ofrecen algunas soluciones que evalúan la impresión 3D para crear nuevos hábitats para los arrecifes que reemplacen a los perdidos por efecto del cambio climático, la pesca excesiva y la contaminación. Uno de los arrecifes coralinos impresos en 3D más grandes está en las Maldivas, su finalidad es crear un hábitat con una nueva tecnología llamada Estructuras Arrecifales Artificiales Modulares (MARS, por sus siglas en inglés). El diseño de la superficie de la estructura arrecifal mostrada en la Figura 1 y diseñada por el *Reef Design Lab* (2021) permite que los fragmentos de coral que se trasplanten puedan ser adheridas fácilmente con un adhesivo *epóxico*. Adicionalmente, la superficie de los módulos es químicamente inerte, por lo que se piensa que no se perjudica a los fragmentos o colonias coralinas adheridos. Los MARS están compuestos de celosías de cerámica impresas en 3D. Su diseño permite que sean instaladas desde pequeñas embarcaciones y ensambladas por buzos.

La idea es que se usen junto a prácticas de cultivo de corales con fines comerciales o para la restauración de arrecifes. Así se podrán crear nuevos hábitats en áreas que han sido degradadas o donde no existan arrecifes coralinos, como los fondos arenosos.

Box 1

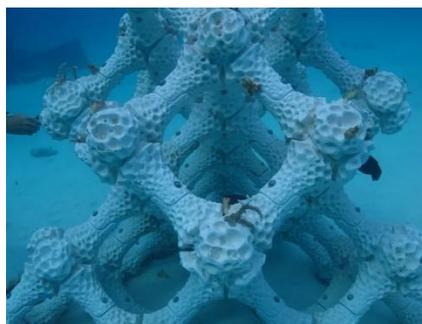


Figure 1

Arrecife artificial impreso en 3D

Fuente: Reef Design Lab (2021). *Modular Artificial Reef Structure*.

Guest, Humanes, Edwards y Bythell (2018) discuten cómo los arrecifes artificiales ayudan a la conservación de los corales, el beneficio potencial de estas estructuras modulares es que no requieren maquinaria pesada (no se necesitan grúas y grandes embarcaciones para desplegar grandes estructuras de hormigón). Gracias a eso se pueden usar en localidades remotas y a un coste menor. Otra ventaja es que la tecnología de impresión 3D permite crear estructuras muy similares al sustrato natural, que es muy complejo. Así, es posible generar hábitats para peces, corales y otros organismos arrecifales. Los MARS también pueden diseñarse según el objetivo de restauración y adaptarse a las condiciones de la localidad. Cada una de las unidades es impresa en 3D, lo que da lugar a piezas huecas que luego son rellenadas con hormigón marino y reforzadas con acero para brindarles estabilidad y durabilidad.

Otras de las propuestas ofrecidas para el desarrollo de estructuras arrecifales es la propuesta e implementada a partir de estructuras artificiales hechas con aisladores de porcelana utilizando dispositivos con forma de *jackses* como se muestra en la Figura 2 y que funcionan como hogares temporales para la fauna marina. Su instalación propicia la creación de zonas de pesca artesanal selectiva y minimiza los perjuicios de la sobrepesca. Otro punto a favor es que se trata de estructuras que terminaron su vida útil dentro del sistema eléctrico, por lo que se estaría alargando su uso de forma productiva. Los *jackses* se colocan uno sobre otro sobre en el fondo marino. La restauración de los arrecifes es crucial para los ecosistemas marinos, dado que se estima que alrededor del 40% de los arrecifes coralinos a nivel global han desaparecido.

Box 2

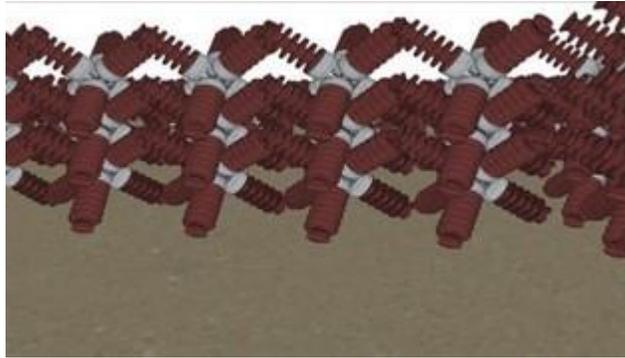


Figure 2

Estructuras arrecifales de aisladores de porcelana

Fuente: La República. (2019). Arrecifes artificiales ayudarán a salvar ecología marina.

Potenciar el crecimiento de organismos acuáticos

El desarrollo óptimo de los organismos acuáticos está influenciado por una combinación de factores ambientales, nutricionales y tecnológicos. El agua de mar contiene nueve elementos esenciales, entre ellos sodio, magnesio, calcio, potasio, estroncio, cloro, azufre, bromo y carbono, que representan más del 99.9% de las sales disueltas en el océano. Para garantizar la salud de estos organismos, es crucial mantener una calidad adecuada del agua, con parámetros como oxígeno disuelto superior a 5 mg/L, un pH dentro del rango de 6.5 a 8.5, y temperaturas específicas según el tipo de especie. Por ejemplo, las especies tropicales prosperan en temperaturas de 24 a 30°C, mientras que las de aguas frías requieren condiciones más templadas para su crecimiento y metabolismo.

Hilbertz y Goreau (1996) patentaron un método para mejorar el crecimiento de organismos acuáticos mediante electrólisis y describe la siguiente metodología:

- a) Instalar un cátodo y un ánodo en el electrolito,
- b) Aplicar una corriente eléctrica continua constante, pulsada o intermitente a través del cátodo y el ánodo para efectuar la electrólisis,
- c) Proporcionar material mineral acumulado en el cátodo,
- d) Reclutar organismos acuáticos en o cerca del cátodo, y
- e) Crear por electrólisis condiciones de mayor alcalinidad en el electrolito en la vecindad del cátodo que en el electrolito alejado del cátodo para causar el crecimiento de los organismos acuáticos en las condiciones en la vecindad del cátodo, siendo la colocación del ánodo hecho de tal manera que se minimicen los efectos del ácido clorhídrico producido en el ánodo.

El método se describe particularmente con referencia al crecimiento de organismos que depositan sustancias calcáreas, tales como corales, para la creación de arrecifes artificiales o estructuras de defensa costera como muestra la Figura 3. Un enfoque para promover el crecimiento de organismos acuáticos en un electrolito acuoso con contenido mineral incluye los siguientes pasos:

- a) Incorporar un cátodo y un ánodo en el electrolito,
- b) Aplicar una corriente eléctrica continua, pulsada o intermitente entre el cátodo y el ánodo para realizar la electrólisis,
- c) Facilitar la acumulación de material mineral en el cátodo,
- d) Atraer organismos acuáticos hacia el cátodo o sus cercanías, y

- e) Generar mediante electrólisis un aumento de la alcalinidad en el electrolito próximo al cátodo en comparación con el área más alejada del mismo, favoreciendo el crecimiento de los organismos en las inmediaciones. La ubicación del ánodo se diseña estratégicamente para reducir los efectos del ácido clorhídrico generado en ese punto (como se ejemplifica en la Figura 3).

Este método es particularmente relevante para fomentar el crecimiento de organismos que producen depósitos calcáreos, como los corales, permitiendo la creación de arrecifes artificiales o estructuras de defensa costera ilustrado en la Figura 3, y que hace referencia a la Figura 5 de la patente (Hilbertz & Goreau, 1996) en la que se muestra el diseño del cátodo y ánodo utilizados para la electrólisis en sistemas acuáticos.

Box 3

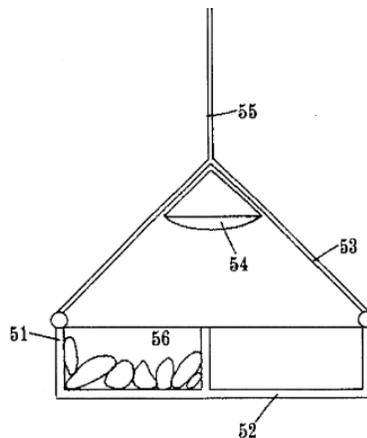


Figure 3

Configuración del cátodo y ánodo en sistemas de electrólisis

Hilbertz, W. H., & Goreau, T. J. (1996). United States Patent No. 5,543. U.S.

Diseño del cosmos marino para la generación de un hábitat artificial

El diseño de un hábitat artificial debe cumplir múltiples objetivos que aseguren su efectividad y sostenibilidad. Su propósito principal es atraer y mantener especies marinas de interés como corales, moluscos, algas y peces, promoviendo la formación de un ecosistema sostenible que integre los elementos artificiales con el entorno natural. Aunque un diseño subóptimo podría retrasar los resultados, el entorno marino tiende a adaptarse y aprovechar incluso estructuras no diseñadas específicamente, como barcos o aviones hundidos, que hoy rebosan de vida.

Para maximizar la biodiversidad, se prioriza que el diseño no sea complejo y se deben considerarse objetivos secundarios, como la protección contra la erosión costera. El diseño debe considerar múltiples factores, incluyendo las especies que se desea albergar, la altura, forma y peso de la estructura, el flujo de agua, la luz solar disponible y los espacios intersticiales. Estas cavidades son esenciales para proporcionar refugio, descanso y áreas de reproducción, así como para facilitar la circulación del agua y prevenir su estancamiento. Por ejemplo, los peces requieren estructuras con múltiples salidas para escapar de depredadores, mientras que otras especies podrían utilizar estos espacios como sitios de paso o de desove. Además, los arrecifes diseñados para contrarrestar la erosión deben evitar cavidades o túneles, maximizando la absorción de energía de las olas para proteger las costas. Por lo que, considerando estos criterios, se propone un diseño adaptado para satisfacer tanto las necesidades de la diversidad marina como las específicas de protección costera, como se ilustra en la Figura 4.

Por lo anterior, considerando el método de Hilbertz y Goreau (1996), y con el objetivo de estudiar la posibilidad de recrear las condiciones de un hábitat artificial y contribuir a la regeneración de especies coralinas en la costa de Manzanillo se plantean los siguientes objetivos específicos: a) crear estructuras que sirvan de refugio a especies marinas, tanto de especímenes adultos como de sus larvas y juveniles, b) implementar un sistema que permita generar las condiciones necesarias para ayudar a la fijación de sedimentos en el hábitat, c) diseñar y construir un sistema de monitoreo que permita para evaluar las condiciones de evolución del hábitat en función a parámetros como tensión (V), corriente (I) y conductividad (C), d) implementar un sistema de detección o alerta general y d) contar con un sistema central de energización considerando un panel fotovoltaico (PV).

La estructura propuesta será ensamblada y sumergida en un estanque físico con el objetivo de realizar experimentos en un ambiente controlado, permitiendo evaluar variables y obtener resultados preliminares. Además, se simulará un entorno con organismos marinos, como peces y corales. Un objetivo secundario es fomentar la visita de diversas especies al hábitat, centrando el diseño en el nacimiento y desarrollo de nuevos especímenes coralinos.

La Figura 4 muestra un diagrama general a bloques que ejemplifica la operación del sistema en función de los elementos que se utilizarán para el alcance de los objetivos. En la parte central se tiene la estructura arrecifal que funcionará como medio de alojamiento y generación para el cosmos marino. La estructura mecánica será energizada mediante un sistema fotovoltaico (PV) y se registrarán los datos medidos de tensión (V) y corriente (I), estos datos monitoreados podrán ser visualizados en tiempo real en un sistema de monitoreo local. Otros datos de interés que se estarán midiendo y registrando serán el arrastre (P), peso (m), y la conductividad (C). En conjunto el sistema permitirá evaluar las condiciones de generación o disminución de vida en el cosmos marino. Como primera etapa de este proyecto el hábitat artificial se estudiará en ambientes controlados dentro de las instalaciones de la Facultad de Ciencias Marinas ubicada en el Campus El Naranjo en la ciudad de Manzanillo, en donde se cuenta con estanques de criaderos y cuidados de peces que tienen proporciones adecuadas y servirán como espacio para albergar y poder monitorear el prototipo desarrollado.

Box 4

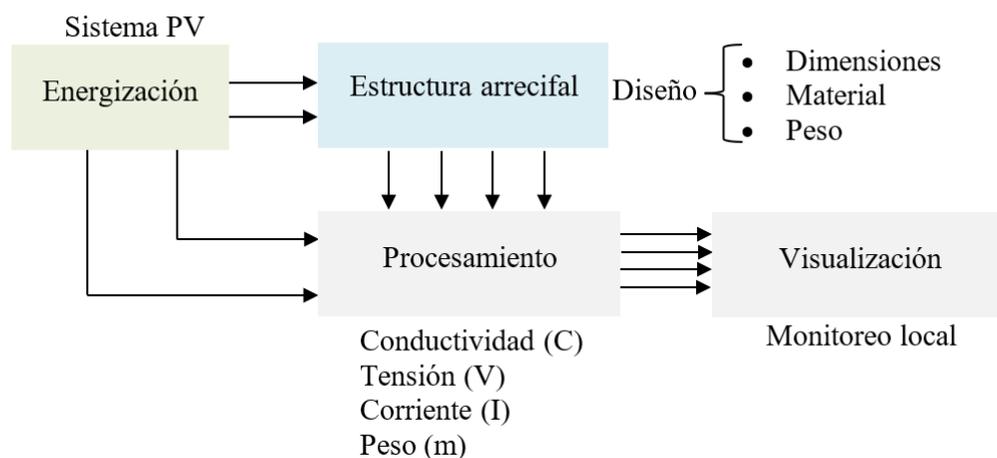


Figure 4

Configuración del cátodo y ánodo en sistemas de electrólisis

Fuente: Elaboración propia

Después de revisar los requisitos del sistema se llegó a una primera propuesta de diseño para la estructura y que se presenta en este trabajo. Se determinó que una estructura que sobresalga del agua o que esté ubicada a pocos metros de la superficie podría impedir el tránsito seguro de embarcaciones por encima de ella. Un diseño flotante representaría un riesgo para las embarcaciones en la costa y podría provocar accidentes. Un diseño ligero, podría ser arrastrado fácilmente por las corrientes marinas, por lo que se optó por un prototipo jaula modular para construir la estructura, como se muestra en la Figura 5. El diseño mostrado se desarrolló en SOLIDWORKS®.

Las medidas de la jaula modular son 3m de largo, por 0.8m de ancho, por 0.8 de alto. Con separación de 0.11 m entre cada corte para formar una estructura medio circular. Se integraron 7 medios círculos con diámetros de 1.5 m. Los espacios entre la malla aseguran que exista uniformidad en las líneas de corrientes marinas, lo que contribuye a promover un crecimiento uniforme y de recubrimiento de depósitos, facilita una interacción con el entorno del cosmos marino al promover la adhesión de diversas especies y su circulación a través de ella.

Para la construcción se optó por varilla corrugada de 3/8 pulgada, ya que es una barra de acero grado 42 laminada en caliente cuya superficie está provista de salientes llamadas corrugaciones (rebordes) que inhiben el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea asegurando la adherencia con el concreto. Se consideró que las varillas corrugadas son una buena opción a la hora de colocar las especies coralinos a la jaula ya que tienen corrugaciones donde podrían adherirse.

La técnica de soldadura utilizada en el prototipo modular fue técnica de punteo con movimiento semicircular. En la Figura 6 se muestra la estructura que se construyó.

Box 5

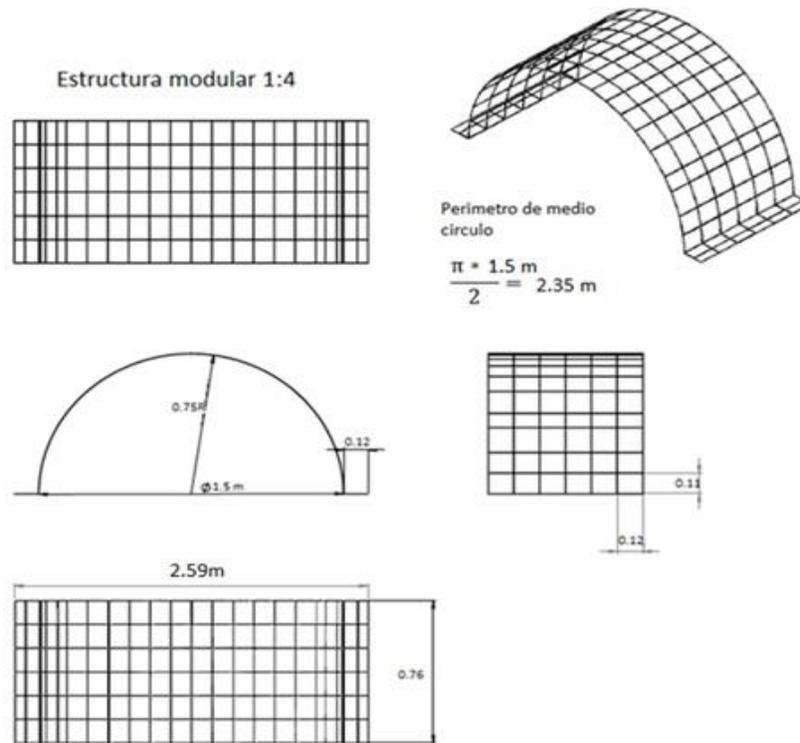


Figure 5

Vistas y medidas prototipo de jaula modular

Fuente: Elaboración propia.

Para aproximar el modelo al entorno experimental, se diseñó un plano del estanque y se simuló utilizando SOLIDWORKS®. Este modelo permitió visualizar cómo quedaría la estructura dentro del estanque acuático ubicado en la Facultad de Ciencias Marinas, reduciendo así el margen de error. En el diseño generado se puede observar una simulación en campo que representa las dimensiones previstas, como se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8 se muestra la ubicación de la zona enmarcada en un cuadrado rojo en la que se colocará.

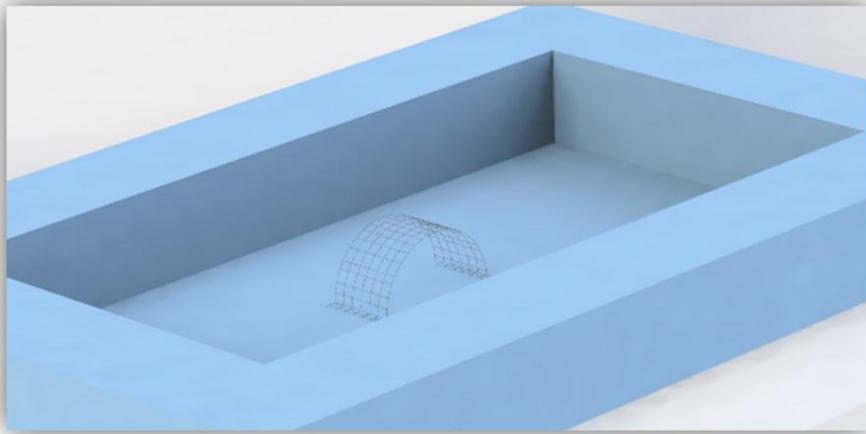
Box 6



Figure 6

Jaula modular para el hábitat artificial

Fuente: Elaboración propia.

Box 7**Figure 7**

Modelado del estanque para colocar la jaula modular

Fuente: Elaboración propia.

Box 8**Figure 8**

Ubicación en la que se colocará el hábitat artificial

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen las principales características de los sensores de interés propuestos para el monitoreo del arrecife artificial. Para el monitoreo adecuado y seguro de plataforma de comando y observación de el arrecife artificial a desarrollar.

La observación y el monitoreo continuo son fundamentales, especialmente ante la posibilidad de actos de vandalismo. Es necesario supervisar no solo las variables internas de la jaula modular, sino también su superficie, asegurándose de detectar cualquier perturbación externa que pueda comprometer el objetivo principal del proyecto.

Como se mencionó en la introducción, se busca desarrollar un sistema que permita crear las condiciones adecuadas para fomentar la fijación de sedimentos en el hábitat. Para realizar la electrólisis, se emplea un electrodo metálico (cátodo) y un electrodo de hierro (ánodo) que se ubican de manera concéntrica o paralela, manteniendo una separación fija y equidistante que asegure un flujo óptimo de iones entre los electrodos. La electrólisis se realiza con bajas densidades de corriente, permitiendo ajustar el grosor de la capa depositada según las necesidades del sistema. De acuerdo con Hilbertz (1995) la tasa de depósito es constante y está directamente relacionada con la duración de la aplicación de la corriente eléctrica.

El suministro de corriente continua poder ser por red cableada o un método alternativo, en este caso se realizará mediante paneles fotovoltaicos, como se muestra en la Figura 9 y que se propone por la Oficina de Transferencia de Resultados de la Investigación-OTRI de la Universidad de Alicante. Para realizar el proceso electrolítico de depósito, se utiliza un cableado eléctrico blindado y aislado, soldado de manera independiente al cátodo y al/los ánodo/s, junto con una fuente de alimentación externa. Esta fuente permite establecer un flujo de corriente eléctrica continua entre los electrodos cuando están sumergidos en un medio conductor. Es muy importante destacar que una primera etapa de este proyecto buscar desarrollar un banco experimental que permita realizar pruebas al sistema y generar las condiciones necesarias, y que no es objetivo del trabajo identificar cual es el nivel de corriente óptimo que se debe inyectar para generar las mejores condiciones de fijación de sedimentos, pues se considera como continuidad a la primera etapa.

Box 9

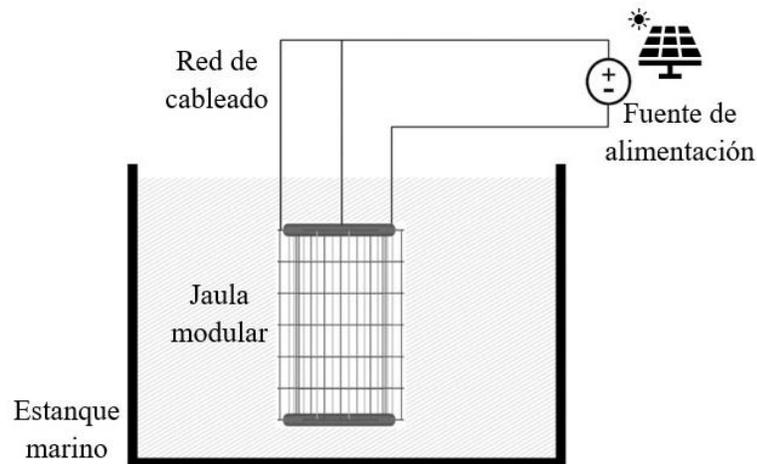


Figure 9

Modelado del estanque para colocar la jaula modular

Adaptado de Universidad de Alicante. (2024).

La protección catódica una técnica utilizada para controlar la corrosión galvánica de una superficie metálica al convertirla en el cátodo de una celda electroquímica. La forma más sencilla de aplicar la CP es conectando el metal a proteger con otro metal más fácilmente corrosible, que actúa como ánodo en una celda electroquímica.

Basándose en este concepto, se decidió utilizar una barra de zinc como ánodo, ya que, al igual que en las embarcaciones que protegen sus aceros con metales de sacrificio, el proceso de reducción se aplica al cátodo, protegiéndolo de la oxidación. Además, la electrólisis generada aumenta la alcalinidad en el electrolito cercano al cátodo en comparación con el electrolito alejado de este, favoreciendo el crecimiento de organismos acuáticos en las proximidades del cátodo. La colocación del ánodo se realiza de manera que se minimicen los efectos del ácido clorhídrico producido en el ánodo.

Para monitorear las condiciones del hábitat se integraron sensores para medir la conductividad, ya que indica la capacidad del agua para conducir electricidad, lo cual está directamente relacionado con la concentración de iones disueltos, como sales y minerales.

Así como la corriente, tensión para evaluar en próximas etapas los parámetros eléctricos óptimos en el sistema y también como un sistema redundante para determinar alguna falla o pérdida de energización. Se integraron también sensores para determinar el peso y arrastre como medios de alerta ante un posible cambio y se integró un sistema de energización con paneles fotovoltaicos considerando que el sistema se plantea para colocarse en un medio asilado.

Otro punto importante para resaltar sobre el proyecto es que, con el objetivo de monitorear las condiciones, se desarrolló una plataforma local en un laboratorio cercano al estanque en el que se sumerge la estructura. A continuación, en la Tabla 1 se describen los sensores utilizados para desarrollar estas tareas.

Box 10**Table 1**

Componentes del sistema de monitoreo

Tarea	Descripción
Alarma	Sensor magnético reed switch
Detector de peso	Amplificador Hx711 sensor de peso
Tensión	Módulo sensor detector de tensión FZ0430
Corriente	Sensor de corriente ACS712
Microcontrolador	Módulo Arduino®
Visualización	Pantalla LCD 16x2
Alimentación	Panel Solar Polycristalino 50 W
Controlador de carga de alimentación	Controlador de carga solar 30A@12V/24V

A continuación, se describen las principales características de los sensores de interés propuestos para el monitoreo del hábitat artificial.

El sensor magnético es un dispositivo electromecánico que se comporta como un interruptor que se activa ante la presencia de un imán son ampliamente utilizados en alarmas de puertas y ventanas funcionan ubicando un imán en el elemento, y detectando la apertura. La tensión de operación es de funcionamiento: 3.3V ~ 5V, su salida es digital y tiene un potenciómetro para ajuste de sensibilidad, sus dimensiones son de 32x32xmm.

Las celdas de carga son transductores diseñados para convertir cargas de compresión, tensión y flexión en señales eléctricas proporcionales a dichas cargas. Su aplicación principal radica en la medición de peso. Estas celdas generalmente incorporan cuatro galgas extensiométricas dispuestas en una configuración de puente Wheatstone, lo que permite una lectura precisa de las variaciones de resistencia en las galgas. El módulo HX711 actúa como un amplificador y convertidor analógico-digital, facilitando la interfaz entre las celdas de carga y un microcontrolador, como Arduino, para una lectura precisa y sencilla del peso. La tensión de operación es de 5V y sus dimensiones son de 12.7x12.7x80mm.

El FZ0430 es un módulo sensor de voltaje que mide tensiones de hasta 25V DC. Sus principales características incluyen un rango de entrada de 0V a 25V DC, un voltaje máximo de detección de 25V para procesadores de 5V y 16.5V para procesadores de 3.3V, y una resolución de medición de 24.45mV. Utiliza un divisor de tensión con resistencias de 30kΩ y 7.5kΩ, y es ideal para medir el estado de baterías y comprobar la alimentación de dispositivos de 12V o 24V, como tiras LED, electroimanes, ventiladores o células Peltier.

En cuanto al sistema de alimentación, la estación de alimentación fotovoltaica se plantea que sea a flote y tendrá la mayor parte un sistema eléctrico de control moderno de monitoreo. En la Figura 10 se muestra la simulación estructurada en escala (1:4) del sistema propuesto, el modelo se realizó en SOLIDWORKS®. Para el alcance propuesto en este capítulo aún encuentra en construcción la estación a flote y en las pruebas que se presentarán aún no se concluye, por lo que el sistema de alimentación se colocará a orilla del estanque.

Box 11**Figure 10**

Estación de alimentación fotovoltaica a flote

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

A continuación, se muestran las etapas integradas del sistema propuesto en la sección anterior y se resaltan las principales adecuaciones realizadas. Se adaptaron cilindros de espuma en la superficie de la estructura, esto fue necesario ya que en el estanque en donde se colocó y que se utiliza para criadero de especies tiene un sedimento que se debe proteger. Se colocaron las barras de zinc como se muestra en la Figura 11.

Box 12

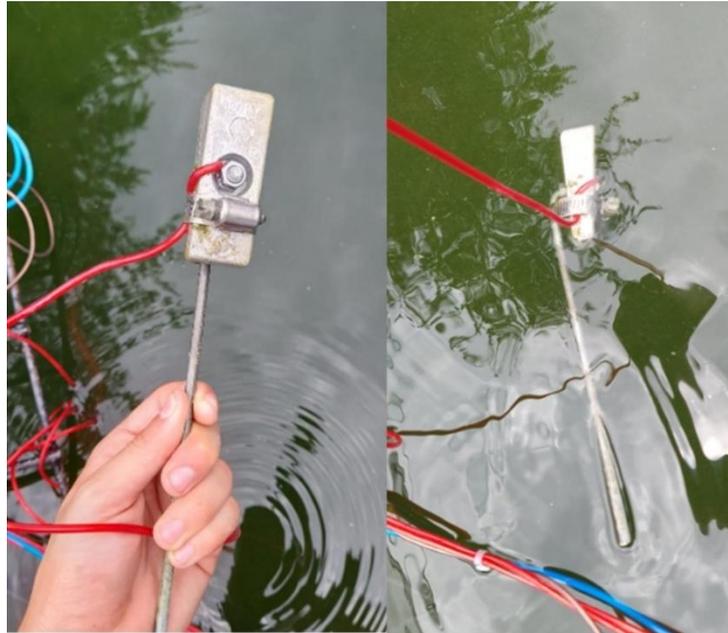


Figure 11

Adaptación de la barra de zinc

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se muestra el diagrama integrado el sensor magnético, el sensor de peso, el de corriente y el sensor de tensión. Todo ello se integra mediante un bus de datos hacia un cable de ethernet. La línea de sensores en campo está conectada a una distancia de 30 metros mediante un cable RJ45, con el objetivo de supervisar localmente desde una caseta lo que ocurre en la estructura. La configuración se muestra en la Figura 13. En la Figura 14 se puede observar la integración todo el sistema, incluyendo la estructura de jaula modular y el sistema de energización propuesto con paneles fotovoltaicos, se integró además un sistema de respaldo de baterías.

Box 13

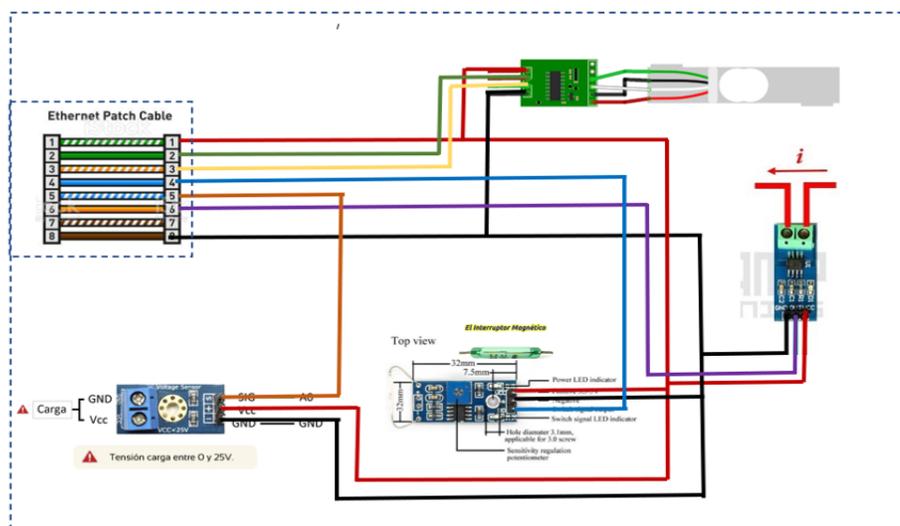


Figure 12

Diagrama de conexiones de red de sensores ubicados en la estructura modular sumergida

Fuente: Elaboración propia.

Box 14

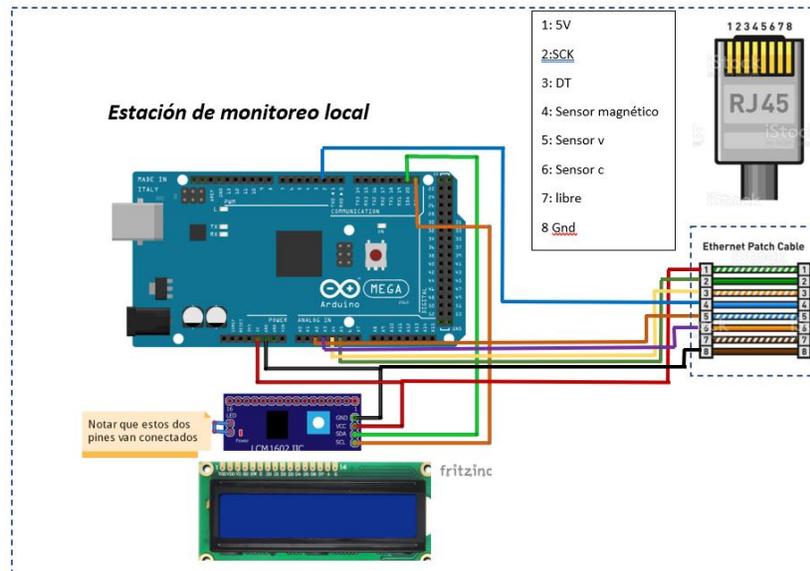


Figure 13

Diagrama de conexiones de la estación de monitoreo local

Fuente: Elaboración propia.

Box 15

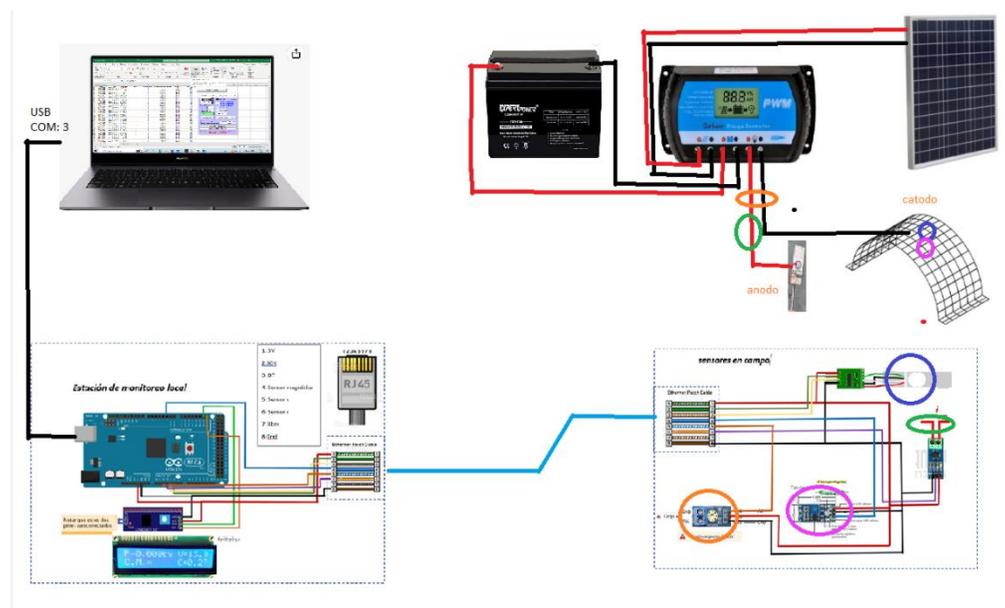


Figure 14

Esquema integrado del sistema embebido para el hábitat artificial

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 15 se muestran la carcasa que se diseñó y adaptó para colocar los sensores, así como la pantalla del sistema local para la lectura de variables. Esta etapa está considerada para observar, retroalimentar o configurar el comportamiento de los sensores adaptados a una sola tarjeta. Además, el prototipo se diseñó para poder realizar calibraciones manuales de los sensores para ver su comportamiento con distintos parámetros eléctricos. La estación de campo está protegida por neopreno para evitar humedad o derrame de líquido en el dispositivo de monitoreo. Se creó una conexión de forma secundaria entre el módulo de sensores y el módulo de monitoreo se puede observar donde se ubican los sensores dentro de la capsula.

Box 16**Figure 15**

Estación de monitoreo local

Fuente: Elaboración propia.

Una vez ensamblado el sistema, se sumergió en el estanque como se puede apreciar en la Figura 16. Este sistema de monitoreo es muy ligero y fácil de desmontar, lo que facilita su transporte e instalación en diferentes ubicaciones. Además, su diseño modular permite una rápida adaptación a diversas configuraciones estructurales. Como se muestra en la figura del apartado final, el sistema puede ser fácilmente integrado en la estructura existente, proporcionando datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales y estructurales.

Esto no solo mejora la eficiencia del monitoreo, sino que también permite una respuesta rápida a cualquier cambio o anomalía detectada, asegurando así la integridad y seguridad de la estructura monitoreada.

Box 17**Figure 16**

Instalación de la estructura modular y sensores en el estanque

Fuente: Elaboración propia.

Como parte de la instalación eléctrica, se añadieron varios componentes para regular el voltaje inducido en la estructura dentro del ambiente electrolítico. Durante las pruebas experimentales, se observó que la celda fotovoltaica no recibía suficiente luz solar para generar un campo magnético suficientemente grande, para estos casos como se mencionó se agregó un respaldo de baterías que se programó para entrar cuando generación del sistema fotovoltaico es menor a 12V, lo que permite inducir el fenómeno de electrólisis dentro del electrolito. En la Figura 17 se muestra el sistema antes de la instalación y en la Figura 18 se muestra la lectura del sistema de generación en el controlador de carga.

Box 18



Figure 17

Elementos para el sistema de energización del hábitat artificial

Fuente: Elaboración propia.

Box 19



Figure 18

Lectura de la salida del controlador de carga del sistema fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad del agua para conducir electricidad aumenta con la concentración de sales. Por lo tanto, midiendo la conductividad eléctrica del agua mediante el par de electrodos, se puede estimar su salinidad de forma rápida y confiable. La conductividad eléctrica se mide generalmente en unidades de dS/m. Esta conductividad depende de la temperatura, por lo que, para realizar comparaciones válidas, debe expresarse en relación con una temperatura de referencia, habitualmente 25°C. En consecuencia, cuanto mayor es la conductividad a 25°C, mayor es la concentración de sales en el agua. Se diseñó además una interfaz para registrar los valores de los sensores en una hoja de Microsoft Excel como se muestra en la Figura 19. Lo anterior con el objetivo de mantener un registro continuo y detallado.

La hoja de Excel fue programada para actualizarse automáticamente con los datos recibidos de los sensores, permitiendo un seguimiento preciso y en tiempo real. Además, los valores actuales también pueden visualizarse en la pantalla LCD de la consola mostrada en la Figura 15. Esta doble visualización facilita la supervisión y el análisis de los datos tanto en formato digital como en tiempo real. En el apartado final, se presenta el código utilizado para monitorear cada uno de los sensores, asegurando que los datos se registren y se muestren de manera eficiente y precisa. Este sistema integral no solo mejora la capacidad de monitoreo, sino que también permite una rápida respuesta ante cualquier variación en las condiciones detectadas por los sensores.

Box 20

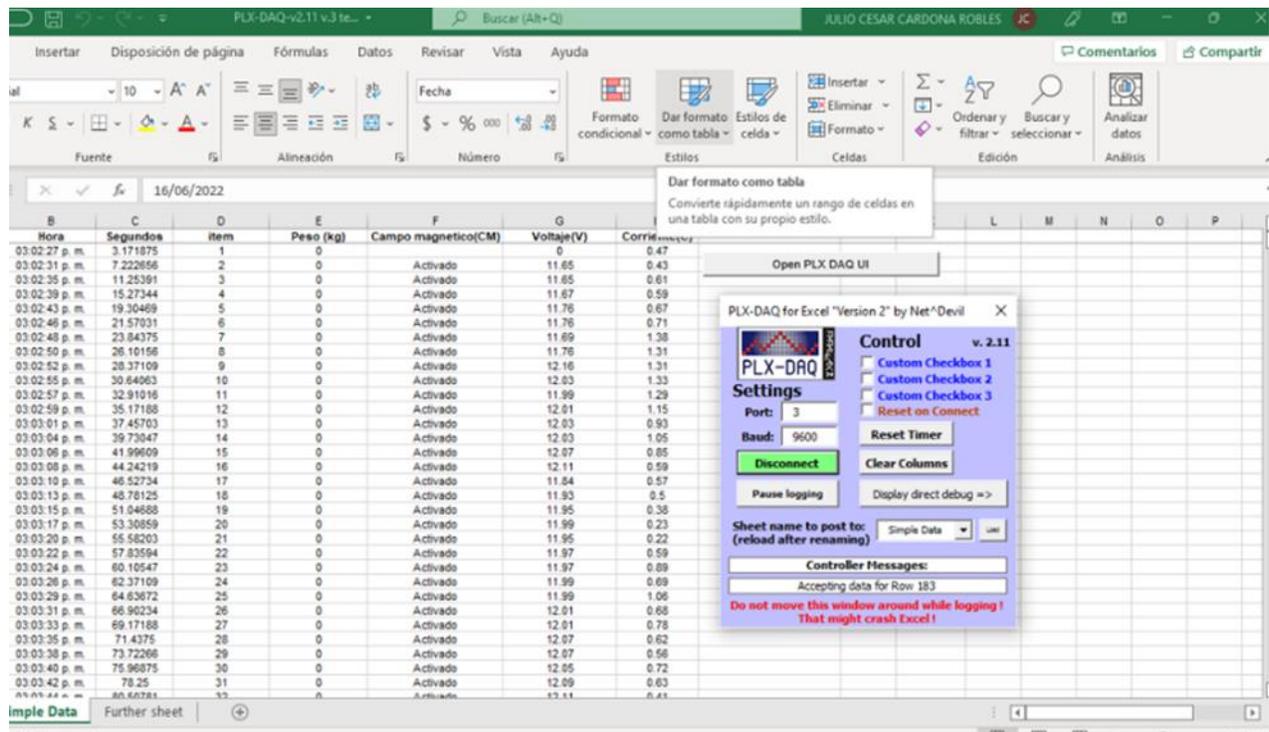


Figure 19

Registro computarizado de las lecturas del sistema de monitoreo

Fuente: Elaboración propia.

En las pruebas finales la profundidad del estanque no cubría toda la estructura, no obstante, fue posible inducir el campo magnético. La salinidad del estanque medida fue de 1.6 gramos por litro, comparada con los 35 gramos por litro del agua salada del mar, lo que indica que el agua era prácticamente dulce. Los minerales presentes en el agua salada no produjeron un resultado satisfactorio, pero se comprobó la existencia de un campo magnético y que se estaba llevando a cabo la electrólisis entre el ánodo y el cátodo. Además, el ambiente no afectó a los organismos del hábitat, como los peces.

Conclusiones

El desarrollo de hábitats artificiales, como el sistema embebido presentado, demuestra ser una alternativa viable para la regeneración de ecosistemas marinos, especialmente en áreas afectadas por el cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación. La integración de tecnología fotovoltaica y sensores permite un monitoreo en tiempo real y promueve el crecimiento coralino de manera sostenible.

La estructura modular diseñada optimiza el anclaje y crecimiento coralino, proporcionando un enfoque escalable que puede adaptarse a diferentes entornos marinos. La facilidad de ensamblaje y desmontaje del sistema facilita su implementación y mantenimiento en diversas ubicaciones. La capacidad de registrar y monitorear parámetros críticos como oxígeno disuelto, pH y temperatura asegura que las condiciones del agua se mantengan adecuadas para la salud de los organismos marinos. La interfaz con Microsoft Excel y la visualización en tiempo real en la pantalla LCD de la consola mejoran la precisión y eficiencia del monitoreo. Durante las pruebas experimentales, se identificaron desafíos como la insuficiente generación de energía por la celda fotovoltaica debido a la falta de luz solar. La solución implementada, que incluye un respaldo de baterías, asegura un suministro constante de energía para inducir el fenómeno de electrólisis, demostrando la adaptabilidad del sistema a condiciones variables.

La estructura propuesta no solo facilita la regeneración de especies coralinas, sino que también asegura que el ambiente no se vea afectado negativamente. La protección de la estación de campo con neopreno y la correcta instalación de componentes eléctricos garantizan la seguridad del sistema y de los organismos marinos.

Los resultados preliminares obtenidos en ambientes controlados dentro de las instalaciones de la Facultad de Ciencias Marinas indican un gran potencial para la implementación de este sistema en entornos naturales. Las mejoras propuestas, como la calibración manual de sensores y la integración de un sistema de alerta, pueden aumentar aún más la eficacia y fiabilidad del sistema en futuras aplicaciones. Por lo anterior, el sistema embebido desarrollado representa un avance significativo en la regeneración de hábitats marinos, combinando tecnología avanzada con un diseño práctico y adaptable. Los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores y sientan las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en la conservación de ecosistemas marinos.

Conflicto de intereses

Las y los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el artículo del que se informa en este artículo.

Contribución de los autores

Cardona-Robles, Julio: Contribuyo en el diseño y pruebas del prototipo, así como en la escritura del reporte.

Alcalá-Rodríguez, Janeth: Contribuyo con la idea del Proyecto, escritura del reporte y diseño.

Charre-Ibarra, Saida: Contribuyo en la programación, escritura y revisión del reporte.

Gudiño-Lau, Jorge: Contribuyo en las pruebas, escritura y revisión del reporte.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos utilizados o analizados durante el presente trabajo están disponibles a solicitud.

Financiación

Financiado con recursos propios, no se recibió ningún financiamiento.

Agradecimientos

Las y los autores extienden su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Electromecánica y a la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Colima por las facilidades prestadas para poder desarrollar este proyecto.

Referencias

Bjerreskov, K. S., Nord-Larsen, T., & Fensholt, R. (2021). [Classification of nemoral forests with fusion of multi-temporal Sentinel-1 and 2 data](#). *Remote Sensing*, 13(5), 950.

Convenio de Londres y Protocolo/PNUMA. (2006) [Organización Marítima internacional](#).

Díaz-Castillo, M., Medina, L., Álvarez-Romero, F., Miranda, L., Romero, D., Henao-Castro, A., & Romero, D. (2014). [Selección de materiales para la construcción de arrecifes artificiales](#). En *Actas del XXXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Química* (pp. 1–6). Cartagena, Colombia.

Edwards, A. J., & Gomez, E. D. (2007). *Reef restoration concepts & guidelines: Making sensible management choices in the face of uncertainty*. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. Australia.

Guest, J., Humanes, A., Edwards, A., & Bythell, J. (2018, December 16). [Los arrecifes artificiales ayudan a la conservación de los corales, pero no evitarán su destrucción](#). The Conversation.

Hilbertz, W. H., & Goreau, T. J. (1996). *United States Patent No. 5,543*. U.S. Patent and Trademark.

Islas-Peña, T. V., Liñán-Cabello, M., & Torres-Orozco, E. (2013). Evaluation of two techniques for restoration of *Pocillopora* SPP.: Early effects of species and marine environment. *Corals: Classification, Habitat and Ecological Significance*, 133-152.

La República. (2019). [Arrecifes artificiales ayudarán a salvar ecología marina.](#)

Liñán, M.A., Flores, L.A., Zenteno T., Olguín, N.O., Sosa, R., Patiño, M. and Olivos, A. *Marine Ecology*, 31, 407 (2010).

Lukens, R. R., & Selberg, C. (Eds.). (2004). *Guidelines for marine artificial reef materials* (2nd ed.). Gulf States Marine Fisheries Commission. Federal Aid in Sport Fish Restoration, FWS Grant Agreement Nos. GS96 Amendment 7, A-4-1 y A-5-11.

Obura, D. O., Aeby, G., Amornthammarong, N., Appeltans, W., Bax, N., Bishop, J., Brainard, R. E., Chan, S., Fletcher, P., Gordon, T. A. C., Gramer, L., Gudka, M., Halas, J., Hendee, J., Hodgson, G., Huang, D., Jankulak, M., Jones, A., Kimura, T., Levy, J., Miloslavich, P., Chou, L. M., Muller-Karger, F., Osuka, K., Samoilys, M., Simpson, S. D., Tun, K., & Wongbusarakum, S. (2019). [Coral reef monitoring, reef assessment technologies, and ecosystem-based management.](#) *Frontiers in Marine Science*, 6.

Reef Design Lab (2021). [Modular Artificial Reef Structure.](#)

Universidad de Alicante. (2024). [Sistema para la formación de arrecifes marinos artificiales y estructuras submarinas con recubrimiento calcáreo inducido por electrólisis](#)_(p. 4).

Control de un robot móvil mediante visión artificial: seguidor de líneas

Controlling a mobile robot using artificial vision: line follower

Gudiño-Lau, Jorge^{*a}, Andrade-Gudiño, Kevin^b, Arana-Llanes, Julia^c y Domínguez-Jiménez, Ismael^d

^a  Universidad de Colima •  Q-6844-2018 •  0000-0002-0585-908X •  122644

^b  Universidad de Colima •  LTE-5115-2024 •  0000-0003-4257-5788

^c  Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo •  GQQ-2949-2022 •  0000-0002-4986-9765 •  445045

^d  Universidad del Caribe •  AAR-3623-2021 •  0000-0003-0959-5875 •  105503

Clasificación CONAHCYT:

Área: Ingeniería

Campo: Ingeniería

Disciplina: Ingeniería Electrónica

Subdisciplina: Robótica

Key Books

Los autores del capítulo forman parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Colima (Institución Pública y Autónoma de México) y del cuerpo académicos UCOL-CA-21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos reconocido por la SES-SEP En Consolidación. El nivel habilitación de sus integrantes es: 75% tienen el grado de doctor, el 100% tienen PRODEP y el 25% pertenece al CONAHCYT SNI I. En este capítulo se desarrolla un robot móvil autónomo de bajo costo con tracción diferencial, diseñado para seguir líneas mediante visión artificial avanzada. Se propone una estrategia robusta para detectar líneas y calcular su posición en píxeles, que alimenta directamente el lazo de control para asegurar la trayectoria del robot. El sistema utiliza un celular para identificar continuamente la línea y ajustar la velocidad del robot. Este capítulo busca fomentar el interés y la generación de Ciencia y Tecnología en los jóvenes de Educación Media y Superior, en el área de las Ingenierías como Mecatrónica, Electrónica, Robótica, Mecánica e Inteligencia Artificial.

Citación: Gudiño-Lau, Jorge, Andrade-Gudiño, Kevin, Arana-Llanes, Julia y Domínguez-Jiménez, Ismael. 2024. Control de un robot móvil mediante visión artificial: seguidor de líneas. 60-77. ECORFAN.

*  jglau@ucol.mx

Book shelf URL: <https://www.ecorfan.org/books.php>



ISBN 978-607-8948-47-5 /© 2009 The Author[s]. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Book MMP. This is an open access book under the CC BY-NC-ND license [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

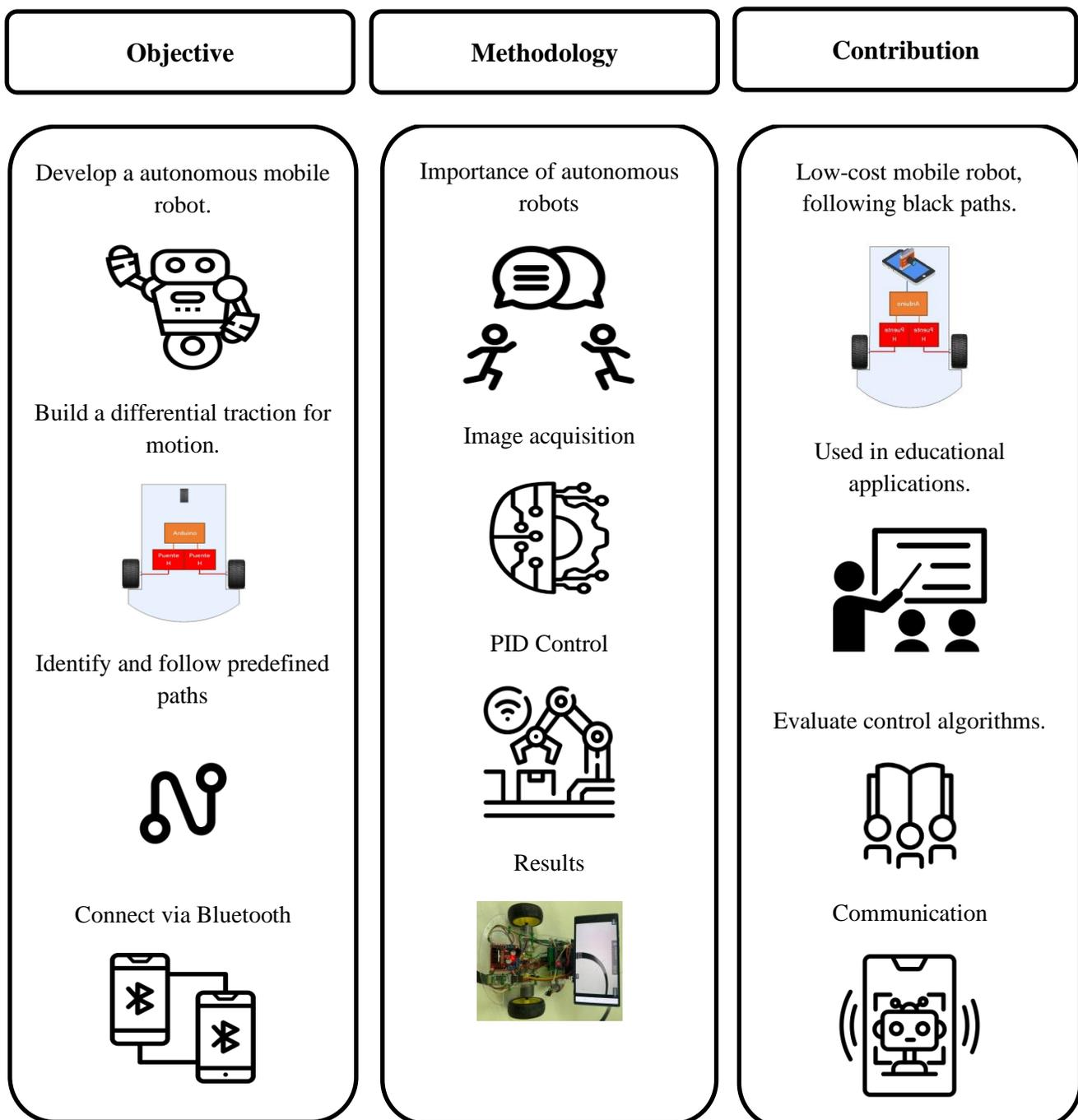
Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee  in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.



Abstract

This Book Chapter presents a prototype of a low-cost autonomous mobile robot with differential traction configuration, designed to follow a line employing advanced artificial vision techniques. The vision and mobile system architecture is composed of an Arduino microcontroller and uses the open-source computer vision library OpenCV. For speed control, the system employs a Proportional Integral Derivative (PID) controller that allows establishing serial communication through the USB port, continuously receiving the position of the identified line through the cell phone. In addition, the paper presents a robust strategy for line detection, which allows us to identify and accurately calculate the central value of the position (in pixels) of the identified object in each video frame. This position value is directly used in the speed control loop, ensuring that the mobile robot can follow the path of the line. In this same sense, the vision system is used to motivate young people at an early age to be interested in cutting-edge technology and to continue researching in robotics and mechatronics.

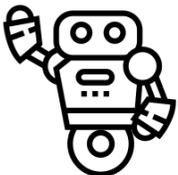
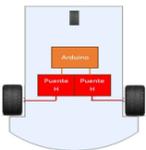
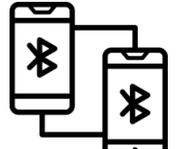
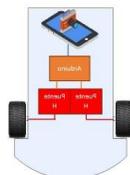
Design and construction of an autonomous line-following robot with vision



Resumen

Este Capítulo de Libro se presenta un prototipo de bajo costo robot móvil autónomo con configuración de tracción diferencial, diseñado para seguir una línea empleando técnicas avanzadas de visión artificial. La arquitectura del sistema de visión y móvil está compuesta por un microcontrolador Arduino y utiliza la biblioteca de visión computacional de código abierto OpenCV. Para el control de velocidad, el sistema se emplea un controlador PID que permite establecer la comunicación serial a través del puerto USB, recibiendo continuamente la posición de la línea identificada a través del celular. Además, el artículo presenta una estrategia robusta para la detección de la línea, que permite identificar y calcular con precisión el valor central de la posición (en píxeles) del objeto identificado en cada cuadro de video. Este valor de posición se emplea directamente en el lazo de control de velocidad, garantizando que el robot móvil pueda seguir la trayectoria de la línea. En este mismo sentido, el sistema de visión se emplea con la finalidad de motivar a los jóvenes a tempranas edades interés hacia la tecnología de vanguardia y seguir investigando sobre el área de la robótica y mecatrónica.

Diseño y construcción de un robot autónomo seguidor de líneas con visión

Objetivo	Metodología	Contribución
<p>Desarrollar un robot móvil autónomo.</p>  <p>Construir una tracción diferencial para el movimiento.</p>  <p>Identificar y seguir rutas predefinidas.</p>  <p>Conectar vía Bluetooth</p> 	<p>Importancia de los robots autónomos</p>  <p>Adquisición de imágenes</p>  <p>Control PID</p>  <p>Resultados</p> 	<p>Low-cost mobile robot, following black paths.</p>  <p>Usado en aplicaciones educativas.</p>  <p>Evaluar algoritmos de control.</p>  <p>Comunicación</p> 

Introducción

En los últimos años, los avances en IA y visión por computadora incrementan las capacidades de los robots móviles. Estas tecnologías permiten a los robots no solo identificar y adaptarse al entorno, sino también mejorar su precisión y autonomía en diversas tareas. Un ejemplo son los Vehículos Guiados Automáticamente AGV y los Robots Móviles Autónomos AMR. Los AGV siguen rutas predeterminadas dentro de instalaciones industriales, transportando materiales con alta fiabilidad y seguridad, mientras que los AMR son capaces de interpretar el entorno y tomar decisiones en tiempo real para evitar obstáculos y optimizar rutas (Fragapane et al., 2021; Saleh et al., 2024). Sin embargo, a nivel educativo, son pocas las Universidades que han integrado esta tecnología en sus laboratorios y talleres, lo que representa un área de oportunidad para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje y permitir que los estudiantes logren un aprendizaje significativo en el área de vehículos autónomos. Además, en la actualidad, los estudiantes muestran un nivel de preparación tecnológica elevado, ya que desde edades tempranas están en contacto con dispositivos como tabletas, teléfonos inteligentes, computadoras e internet, lo cual contribuye a su formación académica y facilita una rápida asimilación de conceptos avanzados. Permitiendo preparar a los estudiantes de manera más completa para los desafíos de la automatización y la robótica aplicada.

Los avances en investigación de AGVs y AMRs en la última década y los requisitos de rendimiento de las redes de comunicación para la coordinación y gestión de flotas en manufactura inteligente es abordado en (Oyekanlu et al., 2020). También analizan los desafíos de integración y limitaciones actuales de estas tecnologías para aplicaciones de manufactura inteligente y fábricas del futuro. Además, muestran futuras investigaciones en el uso de redes 5G y aplicaciones de Internet táctil, segmentación de red y realidad virtual. En la Figura 1 es una línea del tiempo que muestra los avances de los AGV a partir del 2009 y en este mismo sentido en Figura 2 muestra la evolución de los AMR desde el 2016; ambas figuras son tomadas de (Oyekanlu et al., 2020).



Figura 1

Línea del tiempo de los AGV desde 2009

Fuente: (Oyekanlu et al., 2020)

Por lo anterior, se diseña y construye un prototipo de bajo costo robot móvil autónomo con configuración de tracción diferencial, diseñado para seguir una línea empleando técnicas avanzadas de visión artificial. La arquitectura del sistema de visión y móvil está compuesta por un microcontrolador Arduino, que es un hardware open-source basado en placas programables, que funciona como unidad de procesamiento de video y se encarga de la identificación precisa de la línea a seguir, utilizando la biblioteca de visión computacional de código abierto OpenCV. Además, se implementa un control de velocidad, el sistema emplea un controlador PID en la plataforma programable Arduino; permite establecer la comunicación serial a través del puerto USB, recibiendo continuamente la posición de la línea identificada a través del celular. Además, el artículo presenta una estrategia para la detección de la línea, que permite identificar y calcular con precisión el valor central de la posición (en píxeles) del objeto identificado en cada cuadro de video. Este valor de posición se emplea directamente en el lazo de control de velocidad, garantizando que el robot móvil pueda seguir la trayectoria de la línea.

Box 2

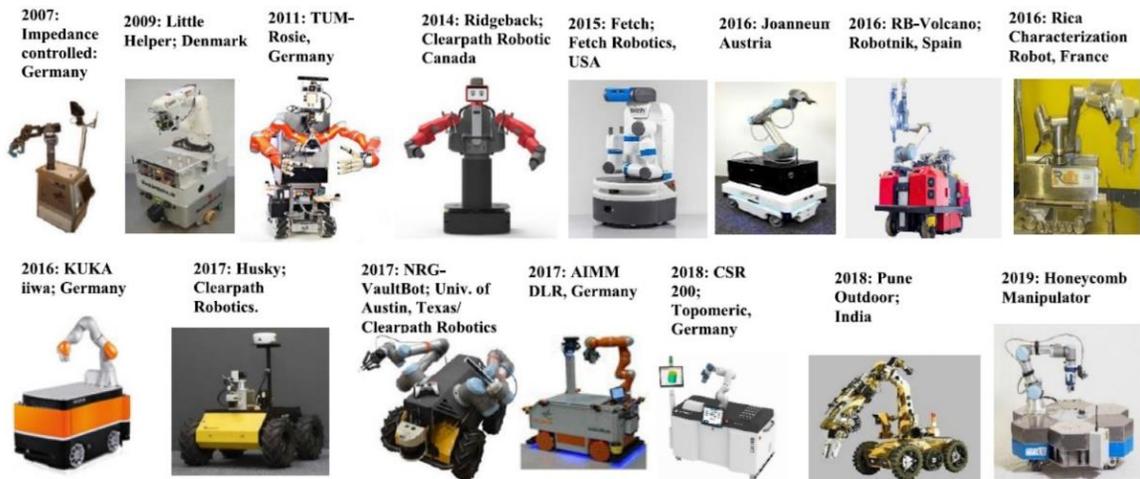


Figura 2

Línea del tiempo de los AMR desde 2016.

Fuente: (Oyekanlu et al., 2020)

La principal diferencia de AMR y AGV, el primero es capaz de detectar obstáculos y modificar su trayectoria para esquivarlos y continuar su recorrido hacia el punto de referencia final; y el AGV se detiene al encontrar un obstáculo, requiriendo asistencia externa (puede ser humana) para retomar su ruta fija (Fragapane et al., 2021; Saleh et al., 2024). Los AMR cuentan con sistemas avanzados de procesamiento y sensores que les permiten interpretar su entorno en tiempo real y navegar alrededor de obstáculos tanto estáticos dinámicos. El Figura 3 se muestra de forma gráfica la principal diferencia entre AMR y AGV; el lado izquierdo de la figura es un AMR y del lado derecho un AGV.

Box 3

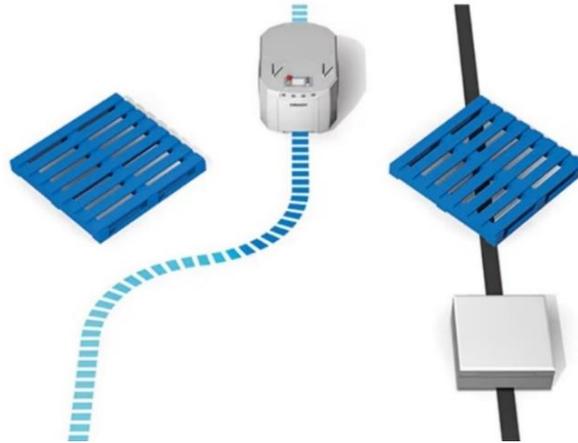


Figura 3

Diferencia gráfica entre AMR y AGV.

Fuente: (Omron, 2024)

Además, los AGV están limitados a seguir rutas fijas y desplazarse solo a puntos predefinidos dentro de su trayectoria guiada como se observa en la Figura 4 (a–f) . Es decir, cualquier modificación en el entorno, como un cambio en la disposición de las máquinas, suele requerir una reconfiguración de las guías del AGV, esto consume tiempo, genera inactividad, y puede impactar negativamente en la productividad y los costos operativos.

En cambio, los AMR tienen una mayor flexibilidad, pueden desplazarse a cualquier punto accesible y libre de obstáculos dentro de una zona definida Figura 4 (g).

Box 4

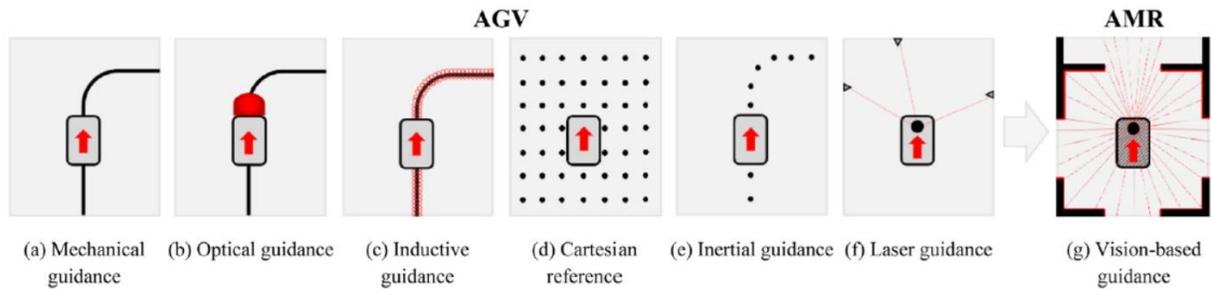


Figura 4

Funcionamiento de los AMR y AGV

Fuente: (Fragapane et al., 2021; Saleh et al., 2024)

Continuando con la línea del tiempo, a partir del 2020 se han realizado las siguientes investigaciones en (Lopez-Rodriguez & Cuesta, 2020) diseña un robot móvil controlado remotamente mediante una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT). El robot tiene una cámara para capturar imágenes del entorno, que son enviadas a un servidor web. Este servidor permite almacenar comandos de control en una base de datos MySQL y gestionar la comunicación entre el servidor y el robot a través de páginas web en PHP y una aplicación Android. El sistema electrónico se basa en el módulo WiFi ESP8266, permite el uso de arquitecturas de software abierto. Las imágenes capturadas son procesadas en una computadora mediante Python y bibliotecas de aprendizaje automático para identificar objetos de interés, específicamente plantas de agave y piedras, en la Figura 5 describe mediante un esquema el sistema de visión y móvil.

Box 5

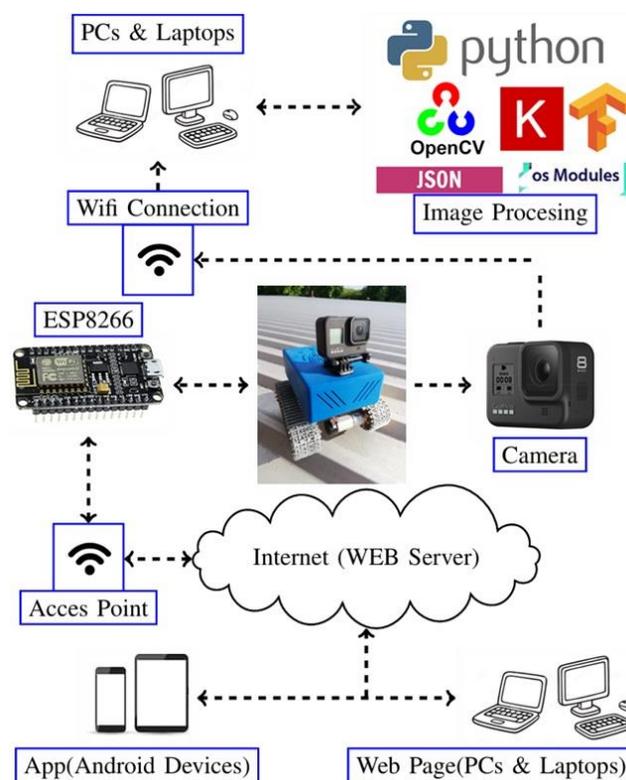


Figura 5

Sistema de visión y móvil

Fuente: (Lopez-Rodriguez & Cuesta, 2021)

En ese mismo año, implementa un sistema de navegación distribuido basado en algoritmos de reconocimiento de objetos, enfocado al control de robots móviles. El sistema autónomo incluye un robot móvil con una cámara, donde detecta y reconoce las señales de tráfico mediante procesamiento de imágenes. Las imágenes se envían a un servidor, el cual calcula las velocidades del robot en función de los objetos detectados y las envía al robot para ejecutar las maniobras (Farias et al., 2020), en la Figura 6 muestra el diagrama de bloque del sistema mostrado en ese trabajo.

Box 6



Figura 6

Diagrama de bloques del sistema completo.

Fuente: (Farias et al., 2020)

El control para un robot de servicio para un vehículo autónomo seguidor de líneas es mostrado en (Farkh & Aljaloud, 2023), que tiene la capacidad de detectar y seguir una trayectoria marcada en el suelo. Para lograr el control de trayectoria y velocidad, se emplean redes neuronales convolucionales para el seguimiento de objetivos y predicción de trayectorias, en conjunto con un controlador PID para la dirección y control de velocidad, utilizando una Raspberry Pi para la inferencia de imágenes y control del robot. El diagrama de bloque del sistema completo es mostrado en la Figura 7.

Box 7



Figura 7

Diagrama de bloques del sistema seguidor de línea.

Fuente: (Farkh & Aljaloud, 2023)

Otros de los trabajos relacionados con el tipo de robot móvil unicyclo es mostrado en (Rico-Mendoza et al., 2022) y en la Figura 8 muestra el diagrama del funcionamiento del sistema para navegación autónoma, donde aplica una ley de control de seguimiento de trayectoria para navegación autónoma en interiores basada en la detección visual de marcadores de referencia. Implementa cámaras web de alta definición.

Box 8

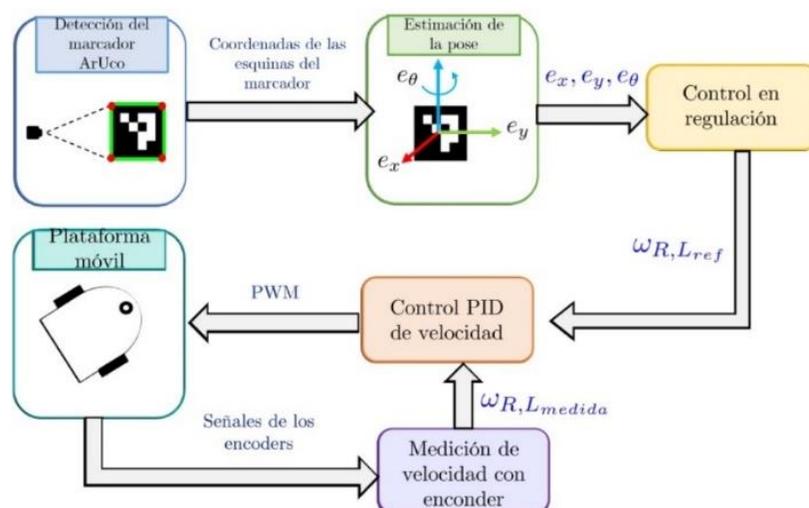


Figura 8

Diagrama de bloques del controlador del sistema seguidor de línea.

Fuente: (Rico-Mendoza et al., 2022)

En este mismo año, el artículo (Wei et al., 2022) explora un modelo de navegación automática para robots móviles para césped usando algoritmos inteligentes y visión por computadora; para detectar los bordes de la trayectoria, permitiendo al robot identificar y seguir una ruta de trabajo definida. Además, emplean algoritmos de procesamiento de imágenes y control. En la Figura 9 muestra la trayectoria que el robot móvil para césped debe seguir.

Box 9

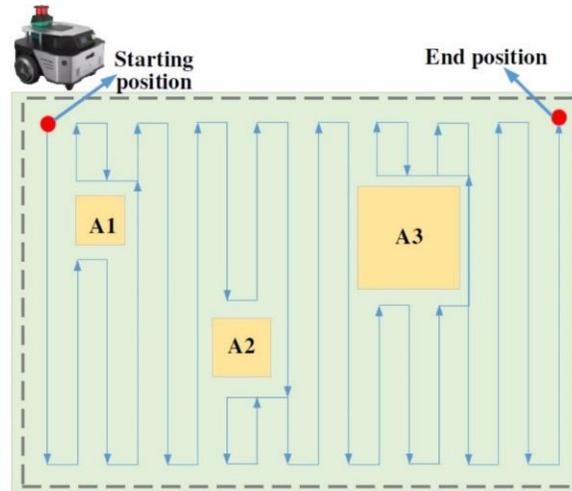


Figura 9

Trayectoria del robot móvil en césped.

Fuente: (Wei et al., 2022)

El seguimiento de líneas en entornos controlados es una estrategia de navegación práctica y confiable para robots móviles autónomos. En 2023 diseñan un robot de seguimiento de líneas que identifica y sigue una línea de alto contraste en el suelo, comúnmente una línea negra sobre una superficie blanca. (Farkh & Aljaloud, 2023) emplean una técnica de navegación basada en visión que combina procesamiento de imágenes con un controlador PID para ajustar automáticamente la dirección y velocidad del robot. Este artículo muestra aplicaciones frecuentes de visión en robots, como localización, generación de mapas y seguimiento de trayectorias. En la Figura 10 muestra el robot móvil seguidor de línea con una cámara montada en la parte superior del robot.

Box 10



Figura 10

Robot seguidor de línea con visión.

Fuente: (Farkh & Aljaloud, 2023)

(Galarza-Falfan et al., 2024) desarrollan un AMR que integra SLAM, odometría y visión artificial basada en aprendizaje profundo DL, implementado en un sistema Jetson Nano. El AMR utiliza el algoritmo para evitar obstáculos y planificar rutas en entornos dinámicos. La investigación muestra que los sistemas inteligentes pueden aplicarse ampliamente en AMRs, abriendo posibilidades para su uso en sectores como el transporte y la industria de ensamblaje. Las especificaciones del prototipo son mostradas en Figura 11.

Box 11

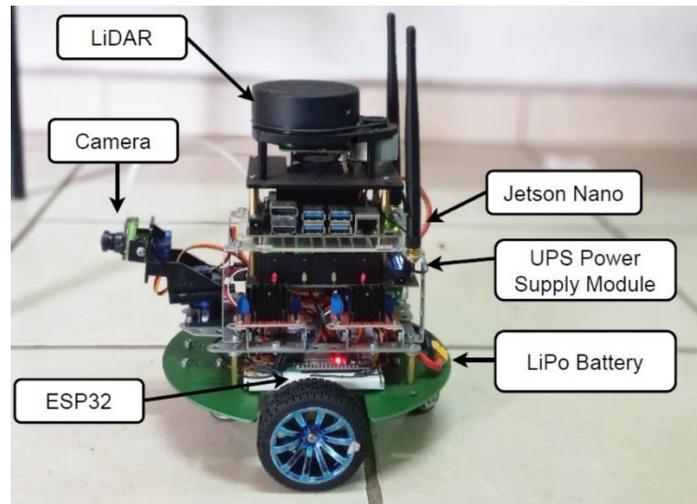


Figura 11

Prototipo móvil con visión artificial.

Fuente: (Galarza-Falfan et al., 2024)

Componentes del sistema del robot móvil

Cámara de video

Para este trabajo se utiliza la cámara de video de un teléfono móvil Xiaomi Poco M4 Pro 5G Figura 12, con una pantalla IPS de 6.6 pulgadas a resolución FHD+ y tasa de refresco de 90Hz, el Poco M4 Pro tiene un procesador Dimensity 810. La cámara dorsal es dual, con un sensor principal de 50MP y una cámara ultrawide de 8MP. Esta cámara del celular se emplea en el robot seguidor de línea negra.

Box 12

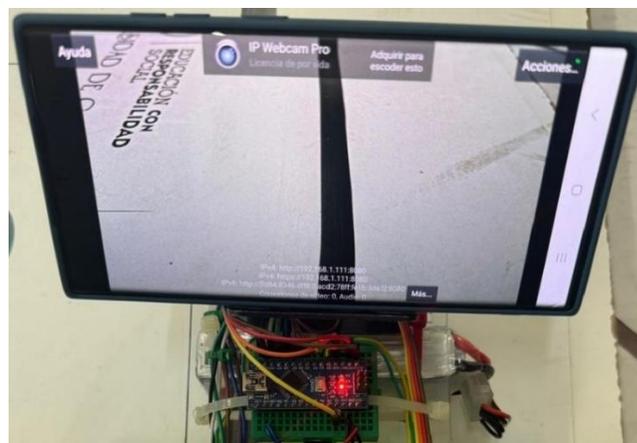


Figura 12

Cámara de Celular montada sobre el robot móvil.

Fuente: Propia

Robot móvil diferencial

Para la prueba experimental se utiliza un robot móvil con configuración de tracción diferencial, que posee dos ruedas motrices ubicadas en el mismo eje. El control de movimiento de este robot se realiza ajustando la velocidad de rotación de cada rueda, lo cual le permite desplazarse en línea recta y ejecutar giros sobre su propio eje, la parte superior (lado izquierdo) y frontal (lado derecho) del prototipo es mostrado en la Figura 13.

Este tipo de configuración es sencillo y fácil de construir, ideal para aplicaciones de pruebas de movimiento y seguidor de líneas. En este caso, se utiliza un robot móvil diferencial de tipo educativo para ejecutar pruebas experimentales sobre el reconocimiento de la línea negra mediante visión artificial, con el propósito de evitar posibles daños en un robot real.

Box 13

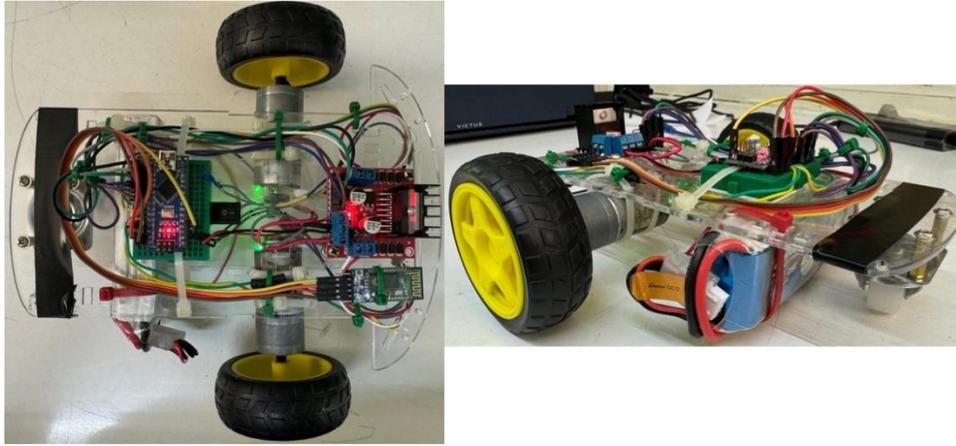


Figura 13

Robot móvil con tracción diferencial.

Fuente: Propia

Arduino NANO

Es una placa de desarrollo pequeña basada en el microcontrolador ATmega328, su capacidad de programación flexible. Tiene 14 pines digitales, 6 pueden ser configurados para salida de modulación por ancho de pulso (PWM), y 8 entradas analógicas, que permiten la lectura de sensores. Funciona con una alimentación de 5Volts, suministrada a través de un puerto mini-USB o un pin específico, y soporta hasta 12V mediante una entrada externa. La memoria Flash es de 32 KB, con 2 KB para el bootloader, mientras que su SRAM es de 2 KB, lo que permite realizar programas relativamente complejos. La frecuencia de operación es de 16 MHz. Además, el Arduino Nano es programado mediante el entorno de desarrollo Arduino (IDE), donde se pueden cargar fácilmente códigos en lenguaje C/C++. Su reducido tamaño lo hace ideal para aplicaciones en sistemas embebidos. La conexión del Arduino Nano del robot móvil diferencial de este proyecto es mostrada en la Figura 14.

Box 14

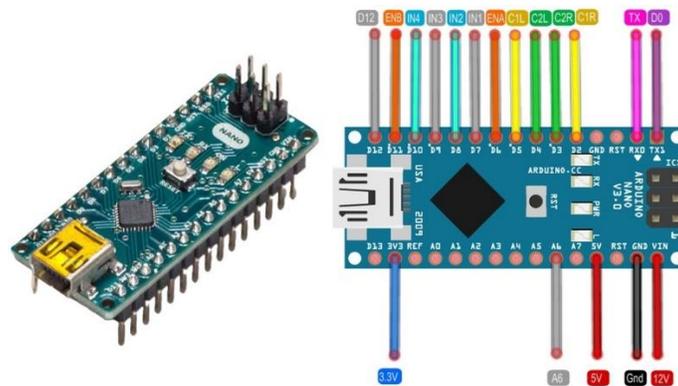


Figura 14

Arduino Nano y conexiones.

Fuente: Propia

Módulo Bluetooth

El módulo Bluetooth HC-05 es un dispositivo de comunicación inalámbrica que permite establecer conexiones entre sistemas embebidos y dispositivos móviles o computadoras mediante la tecnología Bluetooth 2.0. Para este proyecto se emplea este módulo ya que se necesita conectividad inalámbrica. Además, soporta un rango de transmisión de hasta 10 metros, su configuración puede ser en modo maestro o esclavo, en la Figura 15 se muestra el módulo físico, así como las especificaciones técnicas para la conexión. Opera con un voltaje de alimentación de 3.3V, pero sus pines de entrada y salida de datos son tolerantes a 5V, lo que facilita su integración con microcontroladores como Arduino Nano.

Box 15

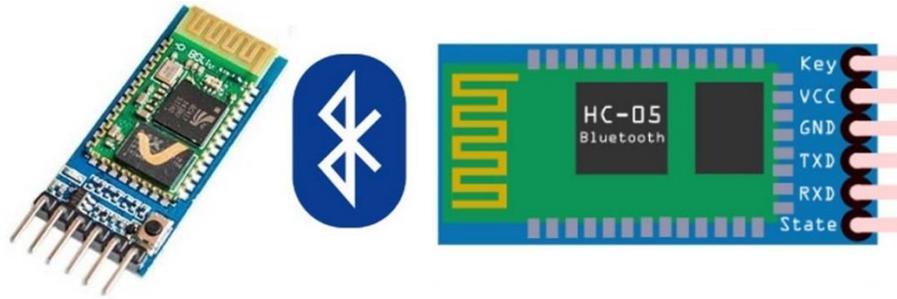


Figura 15

Módulo Bluetooth HC-05

Fuente: Propia

Alimentación

Para alimentar el Arduino Nano y los motores del robot móvil se utiliza una batería LiPo B3 esta compuesta por dos celdas, cada una con un voltaje nominal de 3.7 Volts (V) lo que da un total de 7.4 V a 20Watts, además es compacto, ligera, puede entregar altos niveles de corriente. En la Figura 16 muestra las conexiones de la batería hacia el Arduino.

Box 16



Figura 16

Módulo de alimentación LiPO.

Fuente: Propia

Sistema de movimiento

El sistema de movimiento del robot móvil con tracción diferencial del proyecto se basa en el uso de dos llantas, cada una impulsada por un motor de CD, lo que permite que el robot se desplace en diferentes direcciones. Los motores controlan la velocidad y dirección de cada rueda, lo que, combinado con la tracción diferencial, permite que el robot gire y avance de manera correcta. Además de las dos ruedas motrices, el robot cuenta con una rueda loca, que sirve para estabilizar y equilibrar el vehículo durante el movimiento, sin proporcionar tracción adicional. El control de los motores se realiza a través de un puente H, que permite cambiar la polaridad de los motores, controlando así la dirección de rotación de las ruedas. La Figura 17 muestra el diagrama de conexiones entre el puente H y los motores para el control del movimiento del robot.

Box 17

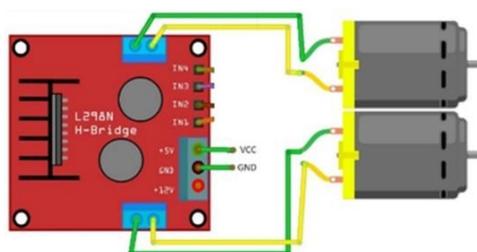


Figura 17

Diagrama de conexiones del Puente H y motores de CD.

Fuente: Propia

En la Figura 18 se observa el diagrama de bloques del dispositivo móvil de bajo costo y sobre todo sencillo de construir y programar. Como se observa el Arduino Nano controla los dos motores que integran el robot móvil diferencial.

Box 18

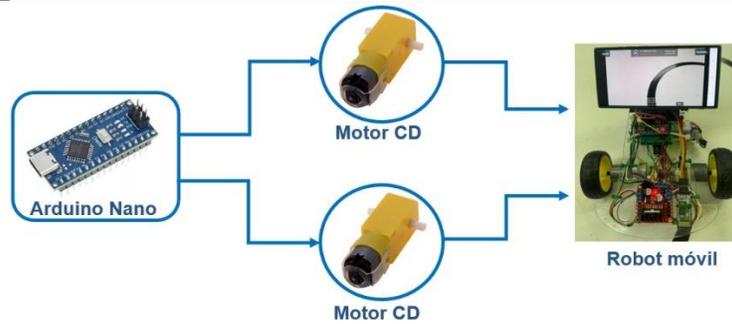


Figura 18

Diagrama del sistema de movimiento del robot móvil.

Fuente: Propia

Plataforma experimental

La plataforma experimental del sistema robótico seguidor de línea está diseñada para que un robot móvil siga una línea negra de manera autónoma, utilizando un sistema de visión artificial que permite detectar y seguir la trayectoria establecida. Se ha desarrollado como una herramienta educativa y de investigación, permitiendo a los estudiantes, profesores e investigadores; aprender, investigar y optimizar técnicas de control de robots en tiempo real. Las capacidades desarrolladas en esta plataforma pueden aplicarse en diversos campos, incluyendo la medicina (para robots asistenciales), la exploración espacial (para robots exploradores), la industria (para automatización en fábricas) y en operaciones en entornos peligrosos (donde se requiere la intervención de robots para proteger la vida humana). La Figura 19 muestra el equipo experimental completo.

Box 19

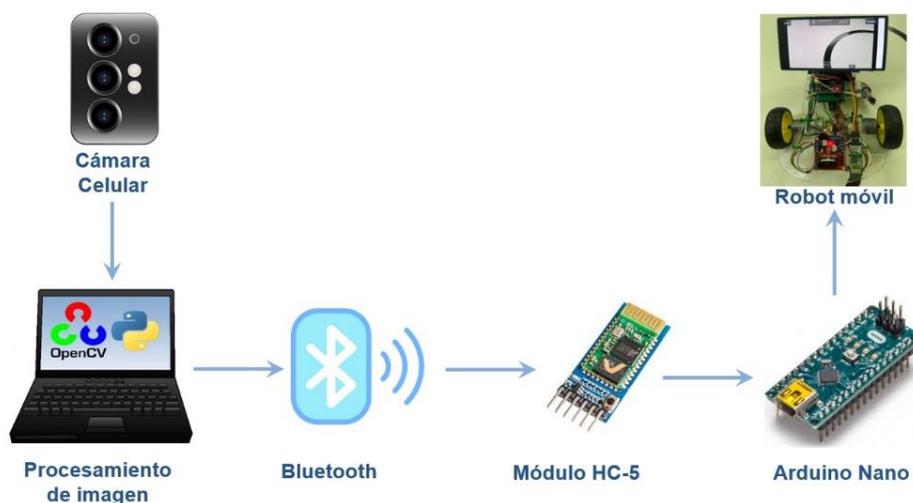


Figura 19

Plataforma experimental del sistema seguidor de líneas.

Fuente: Propia

Conectividad

Para establecer la comunicación inalámbrica entre la computadora y el robot móvil diferencial, se emplea el módulo Bluetooth HC-05, que permite transmitir y recibir datos sin necesidad de cables, que facilita el intercambio de datos entre dispositivos. El módulo está configurado para establecer una conexión punto a punto entre el robot móvil diferencial y la computadora. Para programar el sistema, se utilizan los lenguajes de código abierto, como Python, OpenCV y C++. Python permite la programación general del sistema, OpenCV facilita el procesamiento de imágenes en tiempo real, y C++ se emplea para el control. La Figura 20 muestra el sistema de comunicación del robot móvil direccional.

Box 20

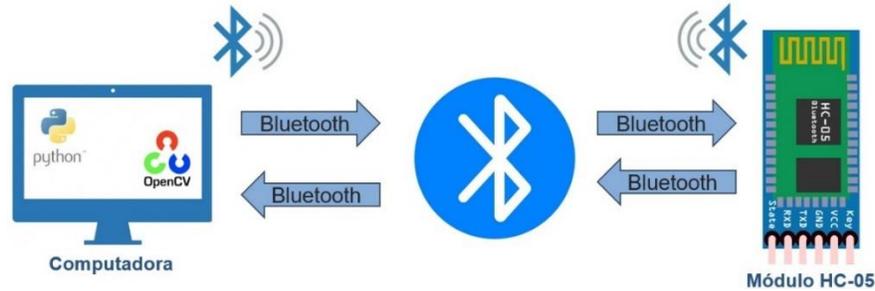


Figura 20

Sistema de comunicación del sistema robótico.

Fuente: Propia

Las conexiones del Módulo HC-05 con el Arduino Uno es mostrada a detalle en la Figura 21.

Box 21

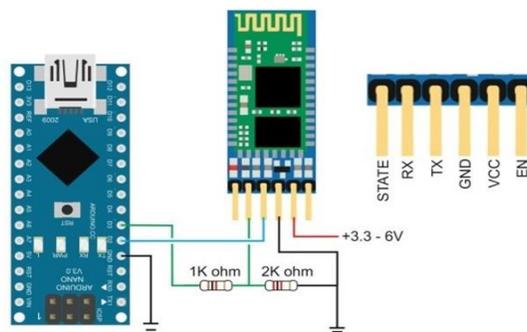


Figura 21

Conexiones del módulo HC-05.

Fuente: Propia

Controlador

El controlador para un robot móvil diferencial debe manipular directamente las velocidades angulares de las ruedas, que determinan el movimiento del robot. Para esto, se aplican algoritmos de control de movimiento que ajustan tanto la velocidad como la dirección de las ruedas. Estos ajustes permiten que el robot siga una trayectoria predefinida, como una línea negra en el suelo, y mantenga una posición y orientación deseadas. Se ha implementado un controlador PID de lazo cerrado, que utiliza retroalimentación visual para calcular y ajustar las velocidades de los motores. La retroalimentación se obtiene de un sistema de visión (en este caso, una cámara de celular), que detecta en tiempo real la posición actual del robot en relación con la línea negra y ajusta los movimientos para seguirla. En la Figura 22 se presenta el diagrama de bloques del controlador PID, que detalla el algoritmo de control.

Box 22

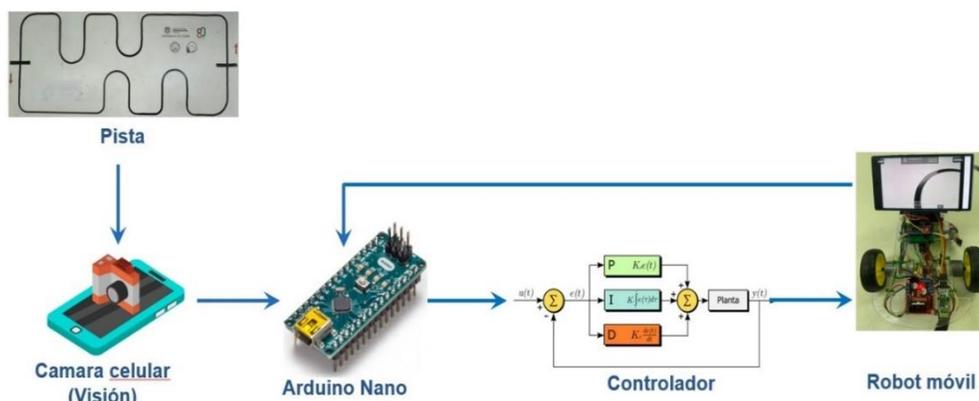


Figura 22

Sistema de control del robot móvil diferencial.

Fuente: Propia

Procesamiento de imagen

El sistema de procesamiento de imágenes para el seguidor de línea tiene la función de analizar las imágenes de la pista capturadas, identificando la línea que el robot debe seguir. Este procesamiento de imagen se realiza en una computadora que ejecuta el software OpenCV, utilizando Python para programar y gestionar las operaciones de visión artificial. El sistema procesa cada imagen recibida y extrae información sobre la posición y orientación de la línea. Los datos de la imagen procesada se transmiten al módulo Bluetooth HC-05 y al microcontrolador Arduino Nano, que controla los movimientos del robot, permitiéndole seguir la línea de forma autónoma. La Figura 23 muestra los componentes de este sistema de procesamiento de imagen.

Box 23



Figura 23

Sistema de procesamiento de imagen.

Fuente: Propia

Resultados experimentales

En la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima tiene un Laboratorio de Robótica carente de equipo especializado como son los robots, de lo anterior surge la necesidad de crear robots con fines educativos y de investigación de bajo costo, para que apoyen a la investigación, en el desarrollo de algoritmos de control. Por esta razón se diseña y se construye un vehículo guiado automáticamente para desplazarse sin intervención humana; y siguiendo línea negra predefinida en tiempo real dentro de un entorno controlado. El robot móvil es guiado por una cámara para detectar su trayectoria, para garantizar su desplazamiento seguro.

Para desarrollar el robot seguidor de línea negra, se implementa un código en Python que permite realizar visión artificial del entorno mediante el uso de una cámara de teléfono móvil. En este caso, se instala la aplicación *IP Webcam* en el celular, que transforma la cámara del teléfono en un dispositivo de transmisión de video en tiempo real. La aplicación *IP Webcam* configura la cámara para emitir las imágenes en directo, transmitiéndolas a una computadora a través de una dirección IP, lo que facilita el análisis en tiempo real del entorno de operación del robot. Para procesar las imágenes capturadas, se utiliza la librería de código abierto OpenCV en Python, que permite la detección de la línea negra que el robot debe seguir. A través de técnicas de procesamiento de imagen como la conversión a escala de grises, el filtrado y la detección de bordes, OpenCV identifica el contorno y posición de la línea negra en cada fotograma, generando instrucciones que guían al robot en su desplazamiento sobre esta trayectoria, tal como se observa en la Figura 24.

Box 24

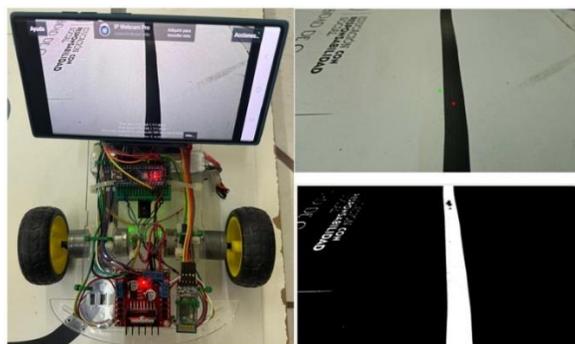


Figura 24

Filtrado de imagen y la detección de bordes.

Fuente: Propia

La comunicación entre la computadora y el robot se realiza mediante un módulo Bluetooth HC-05 conectado a un Arduino, configurado para la comunicación en el puerto serial COM6. Este módulo HC-05 facilita la comunicación bidireccional, tal como se observa en la Figura 25, permitiendo que la computadora envíe instrucciones al Arduino en función de los datos procesados por Python y OpenCV. Además, el Arduino recibe las instrucciones y controla los motores del robot para ajustar su dirección y velocidad en respuesta a la posición de la línea negra. Así, este sistema integrado de procesamiento de imágenes y control de movimiento permite que el robot siga la línea de forma autónoma y eficiente.

Box 25

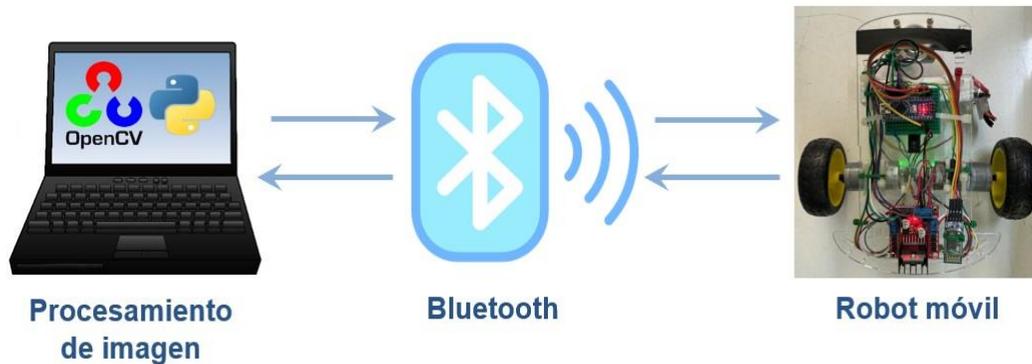


Figura 25

Comunicación PC y Robot Móvil.

Fuente: Propia

Para el seguimiento de la línea se utiliza un algoritmo de control PID implementado en el robot permite corregir constantemente la trayectoria para mantener el seguimiento de la línea de forma efectiva. En la Figura 26 muestra en diagrama de bloques empleado para manipular el robot móvil; los parámetros del controlador son $K_p = 0.28$, $K_i = 0.05$ y $K_d = 0.05$ para ambos motores del robot. Este algoritmo de control recibe datos de una cámara montada en el propio robot, que son procesados para ajustar la velocidad y dirección de sus ruedas, logrando así un desplazamiento suave y correcto.

Box 26

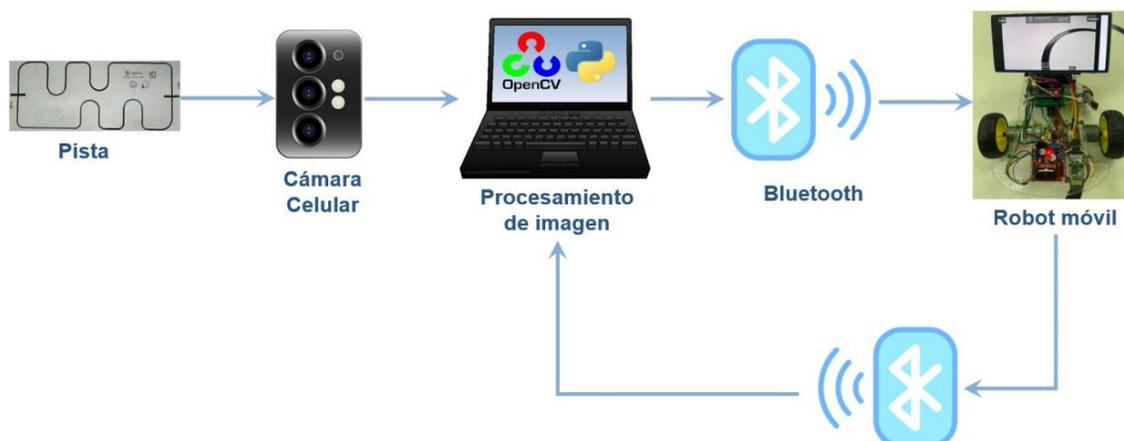
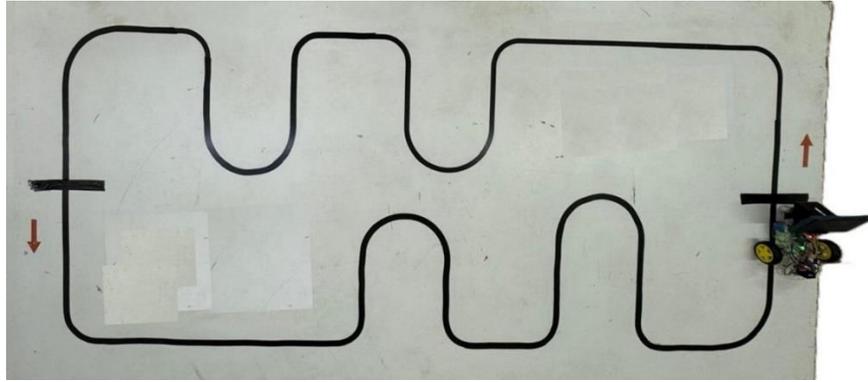


Figura 26

Diagrama de bloques del funcionamiento del robot móvil.

Fuente: Propia

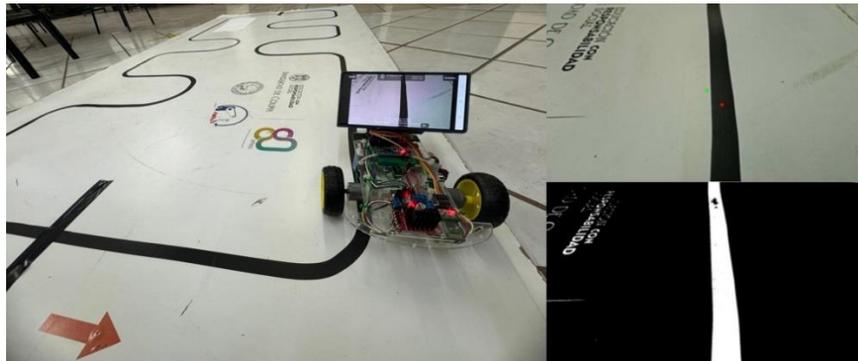
En la Figura 27 se muestra al robot móvil en su posición inicial. La trayectoria es definida por una línea negra trazada en una pista. La línea es procesada por una Laptop, que utiliza algoritmos de visión para identificar y enviar instrucciones al robot. Lo que permite ajustar la orientación y posición del robot en tiempo real. Este sistema integra procesamiento visual y control dinámico para un seguimiento de trayectoria.

Box 27**Figura 27**

Posición inicial del robot seguidor de línea.

Fuente: Propia

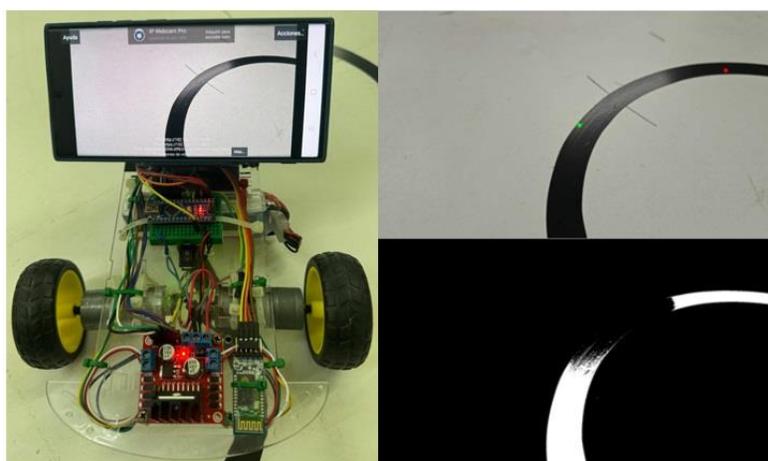
El robot en su recorrido al 50% de la trayectoria es mostrado en la Figura 28, se observa que el robot sigue la línea negra de manera estable, sin tener desviaciones en su desplazamiento. El comportamiento del robot el buen funcionamiento del procesamiento visual y el control PID del sistema.

Box 28**Figura 28**

Posición intermedia del robot seguidor de línea.

Fuente: Propia

Como se muestra en la Figura 29 el robot móvil toma la última curva, para completar la trayectoria definida. Se observa tanto la imagen real como la imagen procesada, ambas para guiar al robot móvil. El sistema de visión asegura el correcto seguimiento de la línea hasta alcanzar el destino final. Esta etapa final valida el funcionamiento del control PID.

Box 29**Figura 29**

Posición final del robot seguidor de línea.

Fuente: Propia

Conclusiones

Se construye un robot móvil con tracción diferencial y con visión artificial en arquitectura abierta y de bajo costo, este proyecto de investigación abona al área de la robótica, mecatrónica e inteligencia artificial; además cumple con el propósito de seguir líneas negras de forma autónoma. Al ser un sistema de bajo costo permite a las escuelas de nivel medio o superior tener su propio equipo didáctico, y motivar a los jóvenes al estudio de la Ciencia, Tecnología, Ingeniería y las Matemáticas.

El robot móvil con visión artificial del tipo vehículo autónomo guiado, permite a los estudiantes desarrollar sus habilidades y sus competencias. El robot móvil es utilizado para motivar a los jóvenes su interés hacía la tecnología de vanguardia y seguir investigando sobre el área de la robótica y mecatrónica.

Como trabajo futuro mejorar el proceso de diseño y construcción del robot móvil de dos ruedas y en el canal de comunicación mejorando la latencia que se tiene. Obtener el análisis cinemático y dinámico del robot móvil para implementar algoritmos de control no lineal, para realizar trabajos de robots móviles colaborativos y manipulación de objetos.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el artículo del que se informa en este artículo.

Contribución de los autores

Gudiño-Lau, Jorge: Contribuyó en la idea central del proyecto, el método de investigación y en el algoritmo de control. Coordinó los trabajos de los integrantes.

Andrade-Gudiño, Kevin: Participó en la construcción y programación del robot.

Arana-Llanes, Julia: Participó en la electrónica y programación del robot.

Domínguez-Jiménez, Ismael: Participó en la electrónica y programación del robot.

Financiación

No se recibió algún tipo de financiamiento externo, son con recursos propios.

Agradecimiento

Agradecer a Carlos Oscar Madrid Ruiz de la Unidad Académica Profesional Acolman, Universidad Autónoma del Estado de México, por su valiosa participación en este proyecto de investigación. Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima por las facilidades otorgadas para utilizar las instalaciones en especial al Laboratorio de Robótica.

Abreviaciones

AGV	Automatic Guided Vehicles
AMR	Autonomous Mobile Robots
CD	Corriente Directa
DL	Deep Learning
IA	Inteligencia artificial
LiPo	Polímero de Litio
PID	Proporcional Integral Derivativo
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping

Referencias

Antecedentes

Oyekanlu, E. A., Smith, A. C., Thomas, W. P., Mulroy, G., Hitesh, D., Ramsey, M., Kuhn, D. J., Mcghinnis, J. D., Buonavita, S. C., Looper, N. A., Ng, M., Ng'oma, A., Liu, W., McBride, P. G., Shultz, M. G., Cerasi, C., & Sun, D. (2020). [A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications](#). *IEEE Access*, 8, 202312–202353.

Básicos

Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). [Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda](#). *European Journal of Operational Research*, 294(2), 405–426.

Saleh, S. A. M., Suandi, S. A., Ibrahim, H., Hamad, Q. S., & Al Amoudi, I. (2024). [AGVs and AMRs Robots: A Brief Overview of the Differences and Navigation Principles](#) (pp. 255–260).

Omron. (2024). [OMRON](#).

Soportes

Farias, G., Fabregas, E., Torres, E., Bricas, G., Dormido-Canto, S., & Dormido, S. (2020). [A Distributed Vision-Based Navigation System for Khepera IV Mobile Robots](#). *Sensors*, 20(18), 5409.

Farkh, R., & Aljaloud, K. (2023). [Vision Navigation Based PID Control for Line Tracking Robot](#). *Intelligent Automation & Soft Computing*, 35(1), 901–911.

Galarza-Falfan, J., García-Guerrero, E. E., Aguirre-Castro, O. A., López-Bonilla, O. R., Tamayo-Pérez, U. J., Cárdenas-Valdez, J. R., Hernández-Mejía, C., Borrego-Dominguez, S., & Inzunza-Gonzalez, E. (2024). [Path Planning for Autonomous Mobile Robot Using Intelligent Algorithms](#). *Technologies*, 12(6), 82

Lopez-Rodriguez, F. M., & Cuesta, F. (2020). [An Android and Arduino Based Low-Cost Educational Robot with Applied Intelligent Control and Machine Learning](#). *Applied Sciences*, 11(1), 48.

Rico-Mendoza, H. I., Reyna-Rodríguez, M., Morales-Díaz, A., Ordaz-Hernández, K., & Treesatayapun, C. (2022). [Navegación autónoma en interiores basada en localización visual](#). *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 10(Especial5), 146–151.

Wei, P., Yu, X., Di, Z., Dai, X., Wang, B., & Zeng, Y. (2022). [Design of robot automatic navigation under computer intelligent algorithm and machine vision](#). *Journal of Industrial Information Integration*, 28, 100366.

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

[Título en TNRoman y negrita No. 14 en inglés y español]

Apellido, Nombre 1^{er} Autor*^a, Apellido, Nombre 1^{er} Coautor^b, Apellido, Nombre 2^{do} Coautor y Apellido, Nombre 3^{er} Coautor^d [No.12 TNRoman]

^a  Institución de afiliación,  Researcher ID,  ORCID,  SNI-CONAHCYT ID o CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^b  Institución de afiliación,  Researcher ID,  ORCID,  SNI-CONAHCYT ID o CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^c  Institución de afiliación,  Researcher ID,  ORCID,  SNI-CONAHCYT ID o CVU PNPC [No.10 TNRoman]

^d  Institución de afiliación,  Researcher ID,  ORCID,  SNI-CONAHCYT ID o CVU PNPC [No.10 TNRoman]

Todos los perfiles ROR-Clarivate-ORCID y CONAHCYT deben estar hipervinculados a su sitio web

Prot-  University of South Australia •  7038-2013 •  0000-0001-6442-4409 •  416112

Clasificación CONAHCYT: https://marvid.org/research_areas.php [No.10 TNRoman]

Área:

Campo:

Disciplina:

Subdisciplina:

DOI: <https://doi.org/>



Claves del libro:

Explique los siguientes aspectos:

- ¿Cuáles son los principales aportes a la generación de Ciencia y Tecnología escritos en esta investigación?
 - ¿Cuáles son los aspectos claves a comprender para aplicar a la generación de conocimiento universal?
 - Escriba las principales conclusiones de la investigación.
 - ¿Cuántos autores cuentan con becas del CONAHCYT? ¿Cuántos autores tienen beca PRODEP y cuántos son de fuentes externas?
 - ¿Cuántas citas generaron los autores del trabajo en el último año?
 - ¿De qué instituciones provienen?
- Instituciones Públicas Estatales
Instituciones Públicas Estatales con Apoyo Solidario
Universidades Tecnológicas y Politécnicas
Universidades Interculturales
Instituciones Privadas
- ¿Cuáles son las palabras clave más utilizadas?

Citación: Apellidos, Nombre 1^{er} Autor, Apellidos, Nombre 1^{er} Coautor, Apellidos, Nombre 2^{do} Coautor y Apellidos, Nombre 3^{er} Coautor. Año de publicación. Título del libro. [Páginas.] ECORFAN.

Correo electrónico de contacto:

* ✉ [ejemplo@ejemplo.org]

URL de la estantería: <https://www.ecorfan.org/books.php>



ISBN XXX-XX-XXXXX-XX-X/© 2009 El Autor[es]. Publicado por ECORFAN-México, S.C. para su Holding X en nombre del Libro X. Este es un libro de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Revisión por pares bajo la responsabilidad del Comité Científico MARVID®- en la contribución al Proceso de Revisión por Pares científico, tecnológico y de innovación mediante la formación de Recursos Humanos para la continuidad en el Análisis Crítico de la Investigación Internacional.



Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Resumen [En inglés]

Debe contener hasta 150 palabras

Resumen gráfico [En inglés]

El título va aquí		
Objetivos	Metodología	Contribución

Los autores deben proporcionar una imagen original que represente claramente el trabajo descrito en el libro. Los resúmenes gráficos deben presentarse en un archivo aparte. Tenga en cuenta que, al igual que cada artículo, debe ser único. Tipo de archivo: los tipos de archivo son archivos de MS Office. No debe incluirse ningún texto adicional, esquema o sinopsis. Cualquier texto o pie de foto debe formar parte del archivo de imagen. No utilice espacios en blanco innecesarios ni un encabezado de "resumen gráfico" dentro del archivo de imagen.

Palabras clave [En inglés]

Indique 3 palabras clave en TN Roman y negrita No. 12

Resumen [En español]

Debe contener hasta 150 palabras

Resumen gráfico [En español]

El título va aquí		
Objetivos	Metodología	Contribución

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Los autores deben proporcionar una imagen original que represente claramente el trabajo descrito en el libro. Los resúmenes gráficos deben presentarse en un archivo aparte. Tenga en cuenta que, al igual que cada artículo, debe ser único. Tipo de archivo: los tipos de archivo son archivos de MS Office. No debe incluirse ningún texto adicional, esquema o sinopsis. Cualquier texto o pie de foto debe formar parte del archivo de imagen. No utilice espacios en blanco innecesarios ni un encabezado de "resumen gráfico" dentro del archivo de imagen.

Palabras clave [En español]

Indique 3 palabras clave en TN Roman y negrita No. 12

Introducción

Texto en TN Roman No.12, a espacio sencillo.

Explicación general del tema y explicar por qué es importante.

¿Cuál es su valor añadido con respecto a otras técnicas?

Enfoque claramente cada una de sus características

Explicar claramente el problema a resolver y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del libro.

Desarrollo de los epígrafes y subepígrafes del libro con los números subsiguientes

Productos en desarrollo No.12 TN Roman, interlineado sencillo.

Inclusión de figuras y tablas-Editable

En el contenido del Libro cualquier figura y tabla deben ser formatos editables que puedan cambiar de tamaño, tipo y número de letras, a efectos de edición, estas deben ser de alta calidad, no pixeladas y deben ser apreciables incluso reduciendo la escala de la imagen.

[Indicando el título en la parte superior con el No.12 y TN Roman en Negrita].

Box

Table 1

Título [No deben ser imágenes: todo debe ser editable]

Fuente [en cursiva]

Box

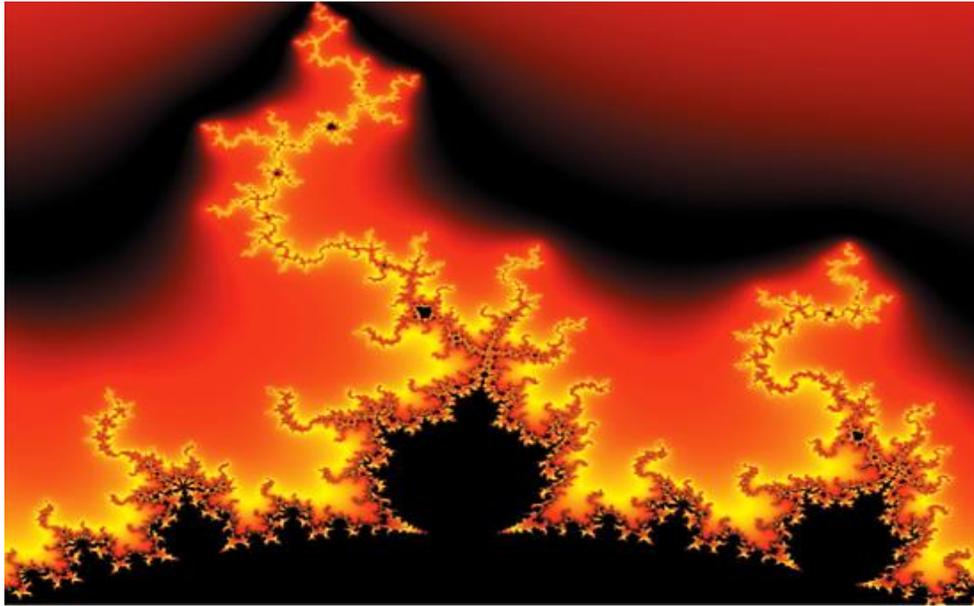


Figura 1

Título [No deben ser imágenes: todo debe ser editable]

Fuente [en cursiva]

El máximo de Box son 10 elementos

Para el uso de ecuaciones, anotadas como sigue:

$$\int_{lim^{-1}}^{lim^1} = \int \frac{lim^1}{lim^{-1}} = \left[\frac{1(-1)}{lim} \right]^2 = \frac{(0)^2}{lim} = \sqrt{lim} = 0 = 0 \rightarrow \infty \quad [1]$$

Debe ser editable y el número debe estar alineado a la derecha.

Metodología

Desarrollar dar el significado de las variables en la escritura lineal e importante es la comparación de los criterios utilizados.

Resultados

Los resultados serán por sección del libro.

Conclusiones

Explicar claramente los resultados y las posibilidades de mejora.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

El estándar internacional es de 7 páginas mínimo y máximo 14

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Especificar la contribución de cada investigador en cada uno de los puntos desarrollados en esta investigación.

Prot-

Benoit-Pauleter, Gerard: Contributed to the project idea, research method and technique.

Disponibilidad de datos y materiales

Indique la disponibilidad de los datos obtenidos en esta investigación.

Financiación

Indicar si la investigación recibió algún tipo de financiación.

Agradecimientos

Indicar si fueron financiados por alguna institución, Universidad o empresa.

Abreviaturas

Enumere las abreviaturas por orden alfabético.

ANN Artificial Neural Network

Referencias

Utilizar el sistema APA. No debe ir numerado, ni con viñetas, sin embargo si es necesario la numeración será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Libro.

Utilice el alfabeto romano, todas las referencias que haya utilizado deben estar en alfabeto romano, incluso si ha citado un libro en cualquiera de los idiomas oficiales de las Naciones Unidas [inglés, francés, alemán, chino, ruso, portugués, italiano, español, árabe], debe escribir la referencia en alfabeto romano y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

Las citas se clasifican en las siguientes categorías:

Antecedentes. La cita se debe a una investigación publicada anteriormente y orienta el documento que cita dentro de un área académica determinada.

Básicos. La cita tiene por objeto informar sobre conjuntos de datos, métodos, conceptos e ideas en los que los autores del documento que cita basan su trabajo.

Soporte. El artículo que cita informa de resultados similares. También puede referirse a similitudes en la metodología o, en algunos casos, a la reproducción de resultados.

Instructions for Scientific, Technological and Innovation Publication

Diferencias. El documento que cita informa mediante una cita de que ha obtenido resultados diferentes a los obtenidos en el documento citado. También puede referirse a diferencias en la metodología o a diferencias en el tamaño de las muestras que afectan a los resultados.

Discusiones. El artículo citante cita otro estudio porque proporciona una discusión más detallada sobre el tema tratado.

La URL del recurso se activa en el DOI o en el título del recurso.

Prot-

Mandelbrot, B. B. [2020]. [Negative dimensions and Hölders, multifractals and their Hölder spectra, and the role of lateral preasymptotics in science](#). Journal of Fourier Analysis and Applications Special. 409-432.

Requisitos de Propiedad Intelectual para la edición:

Firma auténtica en color del [Formato de Originalidad](#) de Autor y Coautores.

Firma auténtica en color del [Formato de Aceptación](#) de Autor y Coautores.

Firma auténtica en color del [Formato de Conflicto de Intereses](#) de Autor y Coautores.

Reserva a la Política Editorial

ECORFAN Books se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar la Obra Científica a la Política Editorial del ECORFAN Books. Una vez aceptada la Obra Científica en su versión final, el ECORFAN Books enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación de la Obra Científica.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito de la Obra Científica, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución.

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de la Obra Científica que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes de la Obra Científica deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia de la Obra Científica propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título de la Obra Científica:

- El envío de una Obra Científica a ECORFAN Books emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en esta Obra Científica ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en la Obra Científica, así como las teorías y los datos procedentes de otras Obras Científicas previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de esta Obra Científica se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en la Obra Científica.

Copyright y Acceso

La publicación de esta Obra Científica supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding México para su ECORFAN Books, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada de la Obra Científica y la puesta a disposición de la Obra Científica en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título de la Obra Científica:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre la Obra Científica enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio a la Obra Científica el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de la Obra Científica. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con la Obra Científica que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter la Obra Científica a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Obras Científicas son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Obra Científica definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza de la Obra Científica presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

VLEX (Plataforma global de inteligencia jurídica)

RESEARCH GATE (Alemania)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC)

Servicios Editoriales

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Books con PLAGSCAN

Evaluación de Obra Científica

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Obra Científica

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Publicación de Obra Científica

Certificado de Obra Científica

Facturación por Servicio de Edición

Política Editorial y Administración

Park Pedregal Business 3580 – Adolfo Ruiz Cortines Boulevard, CP-01900. San Jeronimo Aculco Álvaro Obregón - Mexico City. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; E-mail: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

Vargas-Delgado, Oscar. PhD

Director Ejecutivo

Ramos-Escamilla, María. PhD

Director Editorial

Peralta-Castro, Enrique. MsC

Diseñador Web

Escamilla-Bouchan, Imelda. PhD

Programador web

Luna-Soto, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

Rosales-Borbor, Eleana. BsC

Filólogo

Ramos-Arancibia, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan), sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

Park Pedregal Business 3580 - Adolfo Ruiz Cortines Boulevard, CP-01900. San Jeronimo Aculco Álvaro Obregón - Mexico City.

21 Santa Lucia, CP-5220. Libertadores -Sucre - Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Moralarzal -Madrid-Spain.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas I - Santa Elena-Ecuador.

1047 Avenida La Raza - Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Avenida Suroeste, San Sebastian - León-Nicaragua.

31 Kinshasa 6593- Republique Démocratique du Congo.

Avenida San Quentin, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 kilometers, U.S. highway, Terra Alta house, D7 Mixco Zone 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Capitán, CP-2060. Luque City- Paraguay.

69 Street YongHe District, Zhongxin. Taipei-Taiwan.

43 Street # 30 -90 B. El Triunfo CP.50001. Bogotá-Colombia.



9 786078 948475

ISBN 978-607-8948-47-5



www.ecorfan.org