

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias - Campus Monterrey

**SYMA (Sistema Modular Auto-ensamblable): Diseño e
Implementación de un Prototipo de Robot Reconfigurable
para la Industria 5.0**

Garcia, C. A.; Fang, Susana.; Bustamante, E.; Salazar, A. I.;

Asesor: Ramírez, E.

ABSTRACT:

This paper presents the design of SYMA (Modular Self-Assembling System), a low-cost, modular self-reconfigurable (MSRR) robotics platform inspired by the SMORES-EP design. The objective is to develop a functional prototype demonstrating robust differential drive locomotion, wireless swarm communication, and a controlled magnetic coupling/decoupling mechanism. A module architecture based on the ESP32 microcontroller is proposed, managing communication via the ESP-NOW protocol for its low latency. The movement system uses two continuous rotation servo motors for differential traction. The coupling system, a key research component, employs Latching Electromagnets (EPMs) controlled by H-bridges. This allows for a mechanically strong bond with zero constant power consumption and an active decoupling. The project aims to be an accessible educational and research tool, aligned with SDGs 4 (Quality Education), 9 (Industry, Innovation), and 12 (Responsible Production).

KEYWORDS: Modular robotics; self-reconfigurable; SMORES-EP; differential drive; magnetic coupling; ESP-NOW.

RESUMEN:

Este trabajo presenta el diseño de SYMA (Sistema Modular Auto-ensamblable), una plataforma de robótica modular auto-reconfigurable (MSRR) de bajo costo inspirada en el diseño SMORES-EP. El objetivo es desarrollar un prototipo funcional que demuestre locomoción diferencial robusta, comunicación inalámbrica en enjambre y un mecanismo de acoplamiento y desacoplamiento magnético controlado. Se propone una arquitectura de módulo basada en el microcontrolador ESP32, que gestiona la comunicación a través del protocolo ESP-NOW por su baja latencia. El sistema de movimiento utiliza dos servomotores de rotación continua para la tracción diferencial. El sistema de acoplamiento, clave de la investigación, emplea electroimanes de retención (EPMs) controlados por puentes-H. Esto permite una unión mecánicamente sólida sin consumo de energía constante y un desacople activo. El proyecto busca posicionarse como una herramienta educativa y de investigación accesible, alineada con los ODS 4 (Educación de Calidad), 9 (Industria, Innovación) y 12 (Producción Responsable)

Palabras clave: Robótica modular; auto-reconfigurable; SMORES-EP; accionamiento diferencial; acoplamiento magnético; ESP-NOW.

I. INTRODUCCIÓN:

La robótica ha sido tradicionalmente un campo de alta especialización, enfocado en crear soluciones eficientes para problemas

específicos en entornos controlados. Sin embargo, esta especialización conlleva una falta de flexibilidad; un robot diseñado para ensamblar un coche no puede explorar un edificio colapsado. Inspirados por visiones de ciencia ficción como los

"microbots" de Big Hero 6, surge una pregunta: ¿podemos crear una robótica más versátil, robusta y adaptable?

La respuesta se explora en la Robótica Modular Auto-reconfigurable (MSRR), una disciplina emergente que estudia sistemas robóticos compuestos por múltiples módulos. Estos módulos pueden unirse, separarse y reconfigurarse de forma autónoma para adaptarse a nuevas tareas o entornos.

II. CONTEXTO GENERAL

El concepto de MSRR tiene décadas de desarrollo, con varias plataformas clave que informan nuestro diseño:

- Pioneros (CEBOT y PolyPod): A finales de los 80, Toshio Fukuda introdujo CEBOT (Cellular Robot), uno de los primeros sistemas que proponía "células" robóticas que se combinaban. Poco después, Mark Yim (1993) desarrolló PolyPod, un robot tipo cadena que demostró la versatilidad de la locomoción al cambiar de forma, aunque requería reconfiguración manual.
- Sistemas Híbridos (M-TRAN y SMORES-EP): Esta categoría combina arquitecturas de cadena y rejilla. M-TRAN (Japón) fue pionero en módulos que podían conectarse en 3D para formar estructuras complejas. SMORES-EP (Universidad de Pensilvania), el referente directo de nuestro proyecto, utiliza un diseño simple con dos ruedas axiales y cuatro caras de acoplamiento magnético, permitiéndole rodar como un vehículo y conectarse para formar estructuras más grandes.
- Robots de Impulso (M-Blocks): Desarrollados por el MIT, los M-Blocks

son cubos sin partes externas visibles. Se mueven saltando y girando mediante un volante de inercia interno, y se conectan mediante imanes. Representan un enfoque de "materia programable".

- Robots para Entornos Humanos (Roombots): Desde la EPFL (Suiza), los Roombots están diseñados para convertirse en "muebles adaptativos". Módulos con articulaciones activas pueden trepar y conectarse para formar una silla, una mesa o ayudar a una persona a levantarse. El diseño de SYMA se inspira directamente en la simplicidad y efectividad del SMORES-EP, pero busca optimizar sus sistemas de acoplamiento y comunicación utilizando hardware moderno y de bajo costo.

III. DELIMITACIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

A continuación se describen los puntos que delimitaran la investigación, se colocaron teniendo en cuenta las capacidades del equipo y los objetivos del proyecto.

- Construcción de dos módulos
 - Presupuesto limitado
 - Evaluación de funciones de acoplamiento, comunicación y movimiento
 - Amigable con el usuario
-
- Qué parte específica del tema vas a estudiar.
 - Qué variables, población, procesos o fenómenos sí incluirás
 - Qué no incluirás (límites del proyecto)

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de SYMA responde a necesidades clave en el ámbito académico y tecnológico:

- Necesidad Educativa (ODS 4): Se requiere una plataforma de robótica avanzada que sea lo suficientemente accesible y económica para que los estudiantes de ingeniería puedan experimentar con conceptos complejos como la inteligencia de enjambre y el control no lineal.
- Necesidad de Innovación (ODS 9): Existe una brecha entre los costosos robots de investigación y las aplicaciones prácticas. SYMA busca ser un puente, permitiendo el desarrollo de nuevas soluciones en logística, exploración y manufactura flexible.
- Necesidad de Sostenibilidad (ODS 12): El prototipado y la manufactura tradicional generan desperdicios. Una plataforma MSRR funcional promueve un modelo de "cero desperdicio", donde los módulos se reutilizan y reconfiguran en lugar de desecharse.

V. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el sector industrial se encuentra transicionando del nivel 4.0 (IoT, BigData) hacia 5.0, que se centra en la relación humano-máquina, con el objetivo de mejorar la participación de los humanos en los procesos de fabricación a escala industrial, asimismo, la sostenibilidad y tecnologías avanzadas

como inteligencia artificial son relevantes para esta transición.

El desarrollo de un sistema robótico modular y auto-configurable puede convertirse en un catalizador hacia este cambio, puesto que las características de esta forma de aplicación del campo de la robótica en la industria brinda versatilidad, gracias a la capacidad de formar diferentes morfologías (serpientes, arañas, vehículos) para distintas tareas; robustez, módulos reconfigurables y desechables; económico; un módulo universal replicable reduce costos de fabricación en producción en masa; funcionamiento colaborativo, la sincronización y cooperación de enjambres optimiza y eficientiza la ejecución de tareas.

Estas características permiten no solo mejorar y eficientizar la producción, sino también tener un impacto positivo en el cuidado del medio ambiente.

VI. MARCO TEÓRICO

A pesar de los retos que conlleva esta nueva tecnología, la MSRR sigue siendo un campo predominantemente académico. El salto a aplicaciones del mundo real se ha visto frenado por la complejidad de los mecanismos de acoplamiento, el manejo de la energía y los algoritmos de control. Este proyecto presenta el diseño de SYMA (Sistema Modular Auto-ensamblable), una plataforma MSRR homogénea diseñada para abordar estos desafíos con un enfoque en la simplicidad, el bajo costo y la replicabilidad.

VI. OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar un prototipo funcional y de bajo costo de un robot modular auto-reconfigurable (SYMA), adaptado al propósito de ser una plataforma y herramienta accesible para la educación e investigación en el Tecnológico de Monterrey.

Asimismo, crear las bases para futuras investigaciones acerca de las aplicaciones de robótica modular auto-reconfigurable en la exploración de ecosistemas complejos, trabajo colaborativo (co-bots), la logística y la manufactura flexible, alineándose con los principios de la Industria 5.0.

ESPECÍFICO

1. Investigar las arquitecturas de hardware y software de plataformas MSRR ya existentes, e identificar las áreas de oportunidad, los sistemas de locomoción, acoplamiento y comunicación. Con motivo de generar nuevas soluciones a problemas ya existentes y adaptarlas en los módulos SYMA.

2. Diseñar la arquitectura mecánica (CAD) y electrónica de un módulo SYMA de bajo costo y alta replicabilidad.

3. No exceder un presupuesto de \$1,500 MXN por prototipo de módulo.

3. Desarrollar e implementar los subsistemas de control de movimiento diferencial, sistema de

acoplamiento, sistema de comunicación y sistema de módulo de control de enjambre.

4. Construir el prototipo de dos módulos SYMA funcionales, alfa y beta, los cuales difieren en el sistema de acoplamiento activo o pasivo.

5. Validar y evaluar las capacidades prototipo SYMA de dos módulos para moverse independientemente, localizarse, acoplarse y desacoplarse de forma controlada.

HIPÓTESIS (DESCRIBIR LA RACIONALIDAD DEL PROYECTO)

METODOLOGÍA

Fase I Investigación

En esta fase el equipo se inmersiona en el campo de la Robótica Modular Auto-reconfigurable, tecnologías en desarrollo, análisis de áreas de oportunidad en proyectos para implementación en SYMA.

Fase II Diseño preliminar

Durante este periodo, el equipo se centra en el diseño digital de cada uno de los subsistemas de los módulos SYMA, también se hace una selección preliminar de los componentes a utilizar en cada uno de ellos.

Fase III. Diseño final

Se identifican fallos en el diseño y se realizan las correcciones pertinentes. Se aprueba el diseño para empezar la etapa de prototipado.

determina si se cumplieron los objetivos y se crean posibles soluciones para las áreas de mejora.

Fase IV. Prototipado

Se adquieren todos los componentes electrónicos y se fabrica la estructura; se ensamblan todos los subsistemas y se realiza la programación.

Fase V. Pruebas de verificación y validación

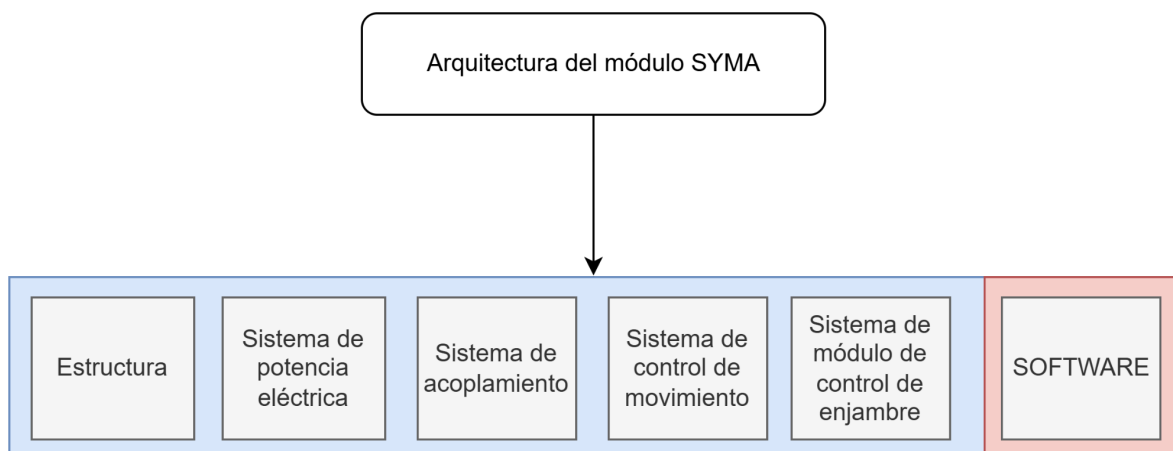
Se realizan las pruebas para verificar y validar el funcionamiento de cada uno de los subsistemas de los módulos. Además, se evalúa el comportamiento de interacción entre los módulos.

Fase VI. Reporte de resultados

Se genera un reporte con los resultados obtenidos de cada una de las pruebas, se

DESARROLLO DE TECNOLOGÍA

Arquitectura de Módulo SYMA



Explicación de cada uno de los sistemas

El diseño de SYMA se descompone en los siguientes subsistemas

Estructura:

1.1 Estructura Inicial

El diseño mecánico se basa en la arquitectura híbrida del SMORES-EP.

- Forma: Un cubo (aprox. 10x10x10 cm para el prototipo inicial) que aloja dos ruedas en un eje central.
- Material: La estructura principal (chasis) será fabricada en acrílico de 3mm. Este material ofrece mayor resistencia mecánica y térmica que el PLA, siendo crucial para las piezas que soportarán los motores y los imanes.

Sistema de potencia eléctrica:

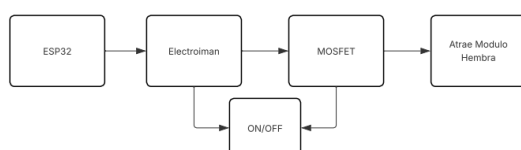
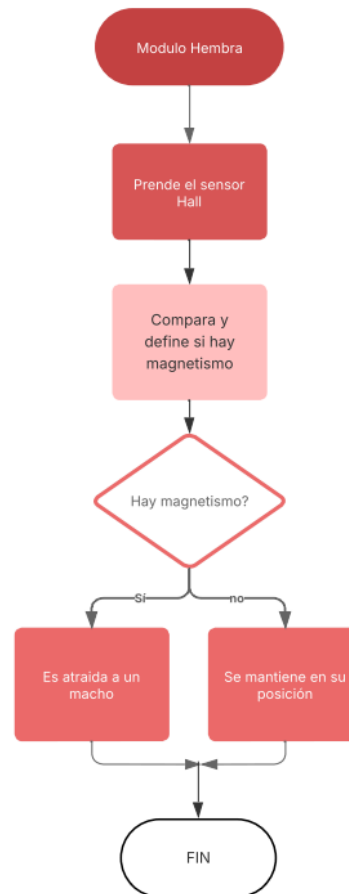
Sistema de acoplamiento:

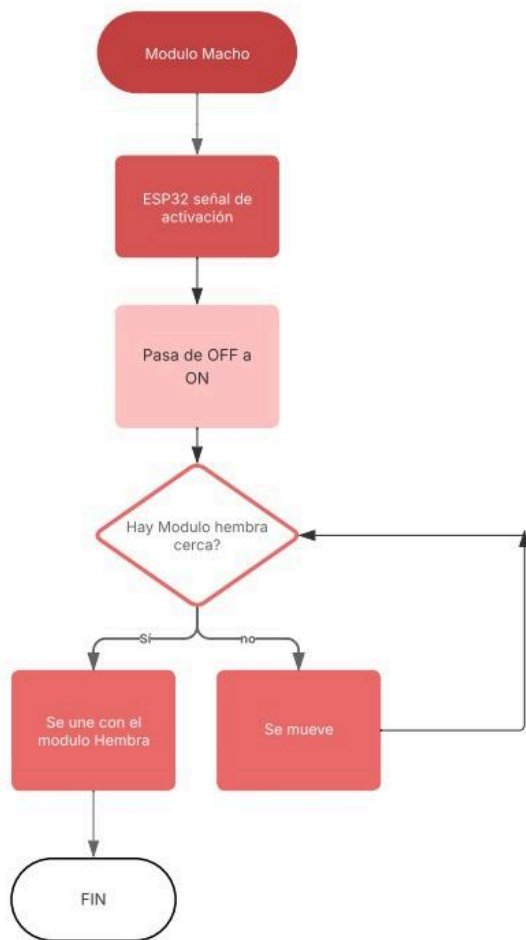
Sistema de control de movimiento:

- Arquitectura: Las dos caras sobre el eje de las ruedas se dedican a la locomoción. Las cuatro caras restantes (arriba, abajo, frente, atrás) se diseñan para alojar el sistema de acoplamiento magnético.

Sistema de módulo de control de enjambre

Software





RESULTADOS

CONCLUSIONES

Trabajo Futuro: Aunque este diseño es una base sólida, el potencial de SYMA apenas comienza. Las líneas de investigación futuras, como las identificadas en estudios similares, incluyen:

- Mejora de la Estimación de Pose: Integrar una Unidad de Medición Inercial (IMU) en cada módulo para fusionar datos de odometría (conteo de ruedas) y acelerómetro/giroscopio mediante un Filtro de Kalman, mejorando drásticamente la precisión de la localización.

- Algoritmos de Control Avanzado: Implementar un planeador de trayectorias (ej. A*) en cada módulo y un coordinador de tareas a nivel de enjambre, permitiendo la reconfiguración autónoma para formar estructuras complejas.
- Optimización de Hardware: Diseñar una PCB (Placa de Circuito Impreso) personalizada que integre el ESP32, los drivers y el manejo de energía, reduciendo el tamaño y aumentando la fiabilidad.
- Nuevos Módulos: Desarrollar módulos heterogéneos (ej. un módulo "pinza", un módulo "cámara") que puedan unirse al enjambre SYMA para dotarlo de nuevas capacidades.

Este reporte ha establecido un plan de diseño integral y viable para la plataforma SYMA. La arquitectura seleccionada, basada en SMORES-EP, junto con innovaciones clave como el acoplamiento por electroimanes de retención (EPMs) y la comunicación por ESP-NOW, ofrece un balance óptimo entre funcionalidad, bajo costo y simplicidad de implementación. Hemos demostrado que el proyecto es relevante, alcanzable y responde a necesidades claras en educación e innovación, alineándose con los ODS 4, 9 y 12.

BIBLIOGRAFÍA

- Arcila López, M. (2023). Robot modular auto reconfigurable – Diseño e implementación [Trabajo de grado, Universidad EIA]. Repositorio Institucional EIA.
- Liu, C., Whitzer, M., & Yim, M. (2019). A Distributed Reconfiguration Planning

Algorithm for Modular Robots. IEEE Robotics and Automation Letters, 4(4), 4231–4238.

Romanishin, J. W., Gilpin, K., Claici, S., & Rus, D. (2015). 3D M-Blocks: Self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).

Sproewitz, A., Billard, A., Dillenbourg, P., & Ijspeert, A. J. (2009). Roombots—Mechanical Design of Self-Reconfiguring Modular Robots for Adaptive Furniture. International Conference on Robotics and Automation.

Wixted, A. J., D. M. A., & R. C. (2016). Electropermanent Magnet Based Latching Connectors for Modular Robotics. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).

Zourntos, T. (2020). A Comparative Study of ESP-NOW and BLE for IoT Applications. Journal of Communications, 15(5)