

# 1. Portada

Fecha de presentación del proyecto	
Sesión de Consejo de aprobación	
Clave del proyecto asignada por Consejo Divisional	

## 1.1. Título del proyecto

Arquitectura Cognitiva Inspirada en Neuronas Espejo: Aplicada a robots de servicio y enjambres robóticos.

## 1.2. Grupo de Investigación:

Neurociencias Cognitivas Computacionales del Laboratorio de Neurociencia Computacional, Robótica Evolutiva e Interfaces (CEREBRAL).

## 1.3. Responsables y colaboradores del proyecto

### Responsables:

- Dra. Alicia Montserrat Alvarado González
- Dr. Antonio López Jaimes

Profesores Asociados, Tiempo Completo. Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.

### Colaboradores:

- Dr. Erik Reyes, Profesor curricular. Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas.
- Dra. Maribel Hernández, Profesora Investigadora Titular, Tiempo Completo. Departamento de Procesos y Tecnología.

## 1.4. Orientación

- Investigación básica
- Investigación aplicada
- Desarrollo o adaptación

## 1.5. Fecha de inicio y duración

Octubre 2025, tres años de duración.

## 2. Propuesta

### 2.1. Resumen

Una arquitectura cognitiva es un sistema que emula un sistema cognitivo integrado que combina conductas sensorimotoras, razonamiento basado en conocimiento y habilidades sociales en la forma de un robot inteligente.

Las arquitecturas cognitivas tradicionales suelen enfocarse en la resolución de tareas individuales, pero carecen de mecanismos naturales de imitación, empatía y aprendizaje social. Las neuronas espejo, descubiertas en el córtex premotor y parietal de primates, permiten observar y ejecutar acciones de manera compartida, sirviendo de base para la imitación, el aprendizaje por observación y la empatía emocional. La pregunta central de este proyecto es: ¿Cómo diseñar una arquitectura cognitiva que, inspirada en el funcionamiento de las neuronas espejo, permita a un agente artificial aprender conductas y respuestas sociales a través de la observación y la interacción? Más aún, ¿es posible transferir el conocimiento aprendido en un dominio (como controlar el movimiento de un brazo robótico) aceleran el aprendizaje en otro (como el movimiento de plataformas robóticas).

### 2.2. Antecedentes

#### 2.2.1. Arquitecturas cognitivas

Las arquitecturas cognitivas son una parte de la investigación en Inteligencia Artificial General que busca crear programas que puedan razonar sobre problemas a través de diferentes dominios, desarrollar ideas, adaptarse a nuevas situaciones y reflexionar sobre sí mismos [1]. Las arquitecturas cognitivas intentan proporcionar evidencia de qué mecanismos particulares logran producir un comportamiento inteligente [2]. Más aún, deben cambiar a través del desarrollo y utilizar eficientemente el conocimiento para realizar nuevas tareas [3].

Actualmente se reconocen tres grandes paradigmas que agrupan a las arquitecturas cognitivas con base en su tipo de representación y el procesamiento de información que implementan: simbólicas (también conocido como cognitivista), emergentes (coneccionista) e híbridas:

- **Arquitecturas Simbólicas:** Utilizan símbolos para representar conceptos. Los símbolos (etiquetas, cadenas de caracteres, marcos), las reglas de producción y la inferencia lógica no probabilística son representaciones simbólicas. Éstas pueden ser manipuladas usando un conjunto predefinido de instrucciones. Estas instrucciones pueden implementarse como si se aplicaran reglas a los símbolos que representan los hechos conocidos sobre el mundo. Sin embargo, son menos flexibles y robustos en entornos dinámicos y para el procesamiento perceptual.
- **Arquitecturas sub-simbólicas:** Se basan en modelos de redes neuronales artificiales para resolver los problemas de adaptabilidad y aprendizaje. Tienen la desventaja de no ser transparentes por lo que la inferencia lógica en un sentido tradicional se vuelve problemática. Además, sus conocimientos existentes pueden deteriorarse con el posterior aprendizaje de nuevos comportamientos (problema del olvido catastrófico).
- **Arquitecturas Híbridas** intentan combinar elementos de ambos enfoques.

Además, el desarrollo de la inteligencia artificial general puede llevarse a cabo con base en los siguientes enfoques [4]: sistemas que piensen como humanos, sistemas que piensen racionalmente, sistemas que actúen como humanos y sistemas que actúen racionalmente. En los sistemas de **pensamiento de tipo humano** los errores cometidos por un sistema inteligente deben coincidir con los errores cometidos normalmente por personas en situaciones similares. En los sistemas de **pensamiento racional** se deben producir conclusiones coherentes y correctas para tareas arbitrarias. Se hace una distinción similar para las máquinas que actúan como seres humanos o actúan racionalmente. No se espera que las máquinas en ninguno de estos grupos piensen como los humanos, solo se tienen en cuenta sus acciones o comportamiento.

### 2.2.2. Antecedentes del proyecto

El proyecto que proponemos en este documento es una continuación y ampliación del proyecto divisional denominado “Interfaces cerebro computadora con perspectiva a su aplicación en Robots de servicio doméstico”. Dicho proyecto fue apoyado inicialmente por PRODEP-SEP en el marco de la convocatoria 2017 de Nuevos PTC. Posteriormente, fue aceptado por el Consejo Divisional de Ciencias Naturales e Ingeniería con el objetivo de darle continuidad durante el periodo julio 2017 a diciembre 2019, con una extensión de un año, es decir, hasta enero del 2020. Más adelante, fue aprobado por el Consejo mediante el Acuerdo DCNI-06-190-20 el 13 de julio del 2020 por tres años y que finalizó el 6 de septiembre de 2023.

Su objetivo fue desarrollar una Interfaz Cerebro-Computadora con base en señales de electroencefalograma para controlar un robot de servicio doméstico. El cual debía tener un aspecto robótico y amigable, contar con dos brazos antropomorfos, y ser de bajo costo. El proyecto estaba dividido en los siguientes rubros: procesamiento de las señales cerebrales, navegación y sujeción de un robot de servicio doméstico.

El presente proyecto busca darle énfasis al desarrollo de la inteligencia artificial del robot para la navegación y sujeción a partir de mecanismos de imitación, empatía y aprendizaje social, tanto de humanos como de otros robots.

Adicionalmente, hemos llevado a cabo las siguientes tareas:

- Diseño de una arquitectura cognitiva tomando en cuenta el funcionamiento del cerebro humano pero cuyo aprendizaje está basado en algoritmos genéticos.
- Desarrollo de algunos módulos de la arquitectura cognitiva, aplicados a enjambres robóticos, los cuales han sido reportados en la tesina [5].
- Implementación de un brazo robótico antropomorfo con simulación de mecanorreceptores (sensores de contacto), reportado en la tesina [6].

## 2.3. Objetivos

### 2.3.1. Objetivo general

Desarrollar una arquitectura cognitiva inspirada en neuronas espejo, basada en memorias cognitivas y programación evolutiva, que permita el aprendizaje y la transferencia cruzada de habilidades motoras en brazos robóticos antropomorfos y enjambres robóticos.

### 2.3.2. Objetivos específicos

#### Arquitectura cognitiva

1. Diseñar un núcleo cognitivo con memorias perceptiva, motora, procedural y de largo plazo.
2. Integrar un módulo espejo para abstraer intenciones motoras en una representación intermedia independiente de la morfología.
3. Evaluar la transferencia cruzada de habilidades entre Brazo robótico y enjambre.

#### Aprendizaje con programación evolutiva y aprendizaje perceptual

1. Implementar programación evolutiva con un ciclo de aprendizaje perceptual en simulación.
2. Implementar la arquitectura en un enjambre robótico heterogéneo.

#### Robot simulado

- Agregar sensores de tacto (*bumpers*) en la palma de la mano, en los dedos -medio, índice y pulgar- y en el antebrazo.

#### Robot físico

- Sensores de tacto
  - Implementación del tacto usando sensores electrónicos.
  - Implementación del tacto usando bioplástico.
- Brazos
  - Mover los hombros hacia la izquierda y hacia la derecha.
  - Gira los brazos sobre su propio eje -hacia adentro y hacia afuera.
  - Mover el codo hacia arriba y hacia abajo.
- Plataforma robótica

## 2.4. Descripción

### 2.4.1. Hipótesis

Se plantea que una arquitectura cognitiva inspirada en neuronas espejo, enriquecida con programación evolutiva y aprendizaje perceptual, permitirá que los brazo robóticos aprenda movimientos a partir de observaciones humanas, y que un enjambre robótico adquiera comportamientos colectivos de manipulación imitando a sus pares. Asimismo, lo aprendido en un dominio podrá transferirse al otro, mejorando la eficiencia y adaptabilidad en tareas de manipulación.

### 2.4.2. Metodología

- Implementar los siguientes nodos: Corteza Parietal, Ínsula, Corteza Occipital, Corriente ventral, Corriente dorsal, Corteza temporal, Corteza Motora Primaria, Circunvolución callosa, Circunvolución callosa anterior, Corteza Motora Secundaria, Corteza Premotora, Memoria procedural, Memoria motora, Memoria perceptiva, Memoria a largo plazo, Módulo Espejo, Análisis contextual, Módulo perceptual predictivo
- Aprendizaje motor: basado en un sistema simbólico mediante el uso de programación evolutiva, que explica el “proceso de razonamiento” como una secuencia de búsqueda, prueba, selección y consolidación de soluciones. El ciclo de aprendizaje motor ocurre de la siguiente manera:
  1. El Programa Genético genera candidatos de controladores a partir de primitivas motoras y condiciones perceptivas.
  2. Los controladores se ejecutan en el simulador a través del Controlador del Simulador.
  3. El simulador devuelve los datos del escenario (posición de objetos, contacto, obstáculos) y los datos del movimiento del robot.
  4. Los datos son procesados y devueltos al Programa Genético, que evalúa el desempeño del controlador mediante una función de adaptación (ej. éxito en el agarre, estabilidad del transporte, ausencia de colisiones).
  5. Si el controlador cumple con los criterios, se almacena en la memoria procedural y eventualmente en la memoria a largo plazo.
  6. Si ningún controlador es exitoso, el Programa Genético genera nuevas variantes (mutación, recombinación), enriqueciendo la base de experiencia.
- Aprendizaje por imitación: basado en un algoritmo con inspiración en el funcionamiento de las neuronas espejo. Es decir, que el observador (ya sea el robot del enjambre o el brazo robótico) lleve a cabo lo siguiente:
  - Reconocer que el movimiento observado es equivalente al de su propia intención. Identificar qué acciones son significativas en función de la situación.
  - Generación interna de planes motores imitando los actos observados (imaginación motora).
  - Analizar el contexto en el que se desarrolla una acción y hacer una representación de éste. Podría hacerse una representación semántica del gesto.
  - Desarrollar un mecanismo para el aprendizaje de nuevas primitivas motoras.
- Tareas de validación del Brazo robótico: tareas de sujeción y colocación con objetos de distintas formas (cubo/pelota/taza) y pesos.
- Tareas de validación del Enjambre: coordinación de varios robots para transportar una caja desde un punto A a un punto B.
- Tareas de validación de la Transferencia intra-enjambre: uno aprende del brazo; 2–3 robots aprenden sólo observando al primero.

- Aplicación A: Brazo robótico antropomorfo
  - Implementar sensor de tacto con circuitos electrónicos.
  - Implementar sensor de tacto con bioplástico que percibe humanos.
  - Incorporar el software de movimiento de mano y antebrazo.
  - Implementar movimiento de los actuadores del brazo físico.
  - Adaptar la arquitectura cognitiva en el brazo.
- Aplicación B: Enjambre robótico
  - Construir circuito para movimiento del robot arlo.
  - Armar robot mbot Ranger con orugas.
  - Armar robot mbot con seis patas.
  - Armar robot mbot 1.1.
  - Adaptar la arquitectura cognitiva en cada robot.

## 2.5. Formación de recursos humanos

Este proyecto tiene el objetivo de formar alumnado de las licenciaturas de Ingeniería en Computación y de Ingeniería Biológica. Al menos a dos alumnos de proyecto terminal de cada ingeniería y cuatro de servicio social de Computación, con disponibilidad de aceptar más, dependiendo del interés del alumnado. En la tabla 1 se podrá ver más detalle de la cantidad de alumnado requerido por actividad.

## 2.6. Productos esperados

1. Desarrollo de una arquitectura cognitiva inspirada en neuronas espejo, basada en memorias cognitivas y programación evolutiva, que permita el aprendizaje y la transferencia cruzada de habilidades motoras en brazos robóticos antropomorfos y enjambres robóticos.
2. Comunicación de resultados: 2 artículos de Revista Indexada: Uno en el primer año respecto al tacto con bioplástico y otro en el segundo año respecto a la arquitectura cognitiva.
3. Desarrollo de un prototipo de sensor de tacto en un brazo robótico con bioplástico que percibe humanos.
4. Presentaciones en:
  - Simposio de la Licenciatura de Ingeniería Biológica
  - Semana de la computación y matemáticas
  - Simposio de las Licenciaturas de la DCNI.
5. Artículos en revistas de investigación y de divulgación científica.

## **2.7. Impacto esperado del proyecto**

### **Líneas de investigación de la Unidad**

Este proyecto impacta en las siguientes líneas emblemáticas de la Unidad de acuerdo con las Políticas Operativas de Investigación UAM-C, Objetivos de la Investigación de la Unidad, I.1:

- Articular y potenciar las capacidades de las divisiones y departamentos de la Unidad para la generación y aplicación del conocimiento.
- Generar oportunidades e innovaciones de interés y utilidad a comunidades, empresas y, en general, a organismos y entidades de los sectores público, social y empresarial.

### **Plan Nacional de Desarrollo**

Por otro lado, la problemática nacional en la que se pretende incidir de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo es el Eje general 4: Desarrollo Sustentable.

### **Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030**

Adicionalmente, el proyecto puede contribuir significativamente a los siguientes ejes de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción global adoptado por las Naciones Unidas: Objetivo 12 Producción y consumo responsables.

## **2.8. Recursos necesarios para el proyecto:**

- Infraestructura física actual del proyecto:
  - Robot físico y su versión simulada con dos brazos y manos antropomórfas y una base con dos motores. Los brazos físicos tienen el hardware y software para:
    - Girar el antebrazo sobre su propio eje -hacia adentro y hacia afuera.
    - Flexionar los cinco dedos de cada mano.
    - Mover el dedo pulgar hacia el centro de la mano.
  - Las actividades del proyecto se pueden realizar en los siguientes lugares, en caso de que el alumnado lo requiera:
    - Laboratorio de Apoyo Interdisciplinar de Innovación Tecnológica (ubicado en el B1 de la Unidad Cuajimalpa).
    - Laboratorio de Interfaces Planta-Computadora ubicado en el Centro de Experimentación en Docencia e Investigación ‘El Encinal’.
    -
- Infraestructura humana actual:
  - Dra. Alicia Montserrat Alvarado González  
Participación: Análisis de señales eléctricas del bioplástico y creación de arquitectura cognitiva.

- Dr. Antonio López Jaimes  
Participación: Aplicación de modelos de optimización para la planeación de rutas y sujeción.
  - Dr. Erik Reyes  
Participación: Reparación de la plataforma robótica.
  - Dra. Maribel Hernández  
Participación: Desarrollo de bioplásticos para que no se dañen los sensores de la mano robótica y para implementar tacto.
  - Una alumna de proyecto terminal desarrollando el sentido del tacto físico.
  - Una alumna de proyecto terminal probando distintos biomateriales.
- Infraestructura humana requerida: Se requiere la siguiente cantidad de alumnado de Proyecto Terminal y de Servicio Social para apoyar en el desarrollo de las actividades mostradas en la tabla 1:

Tarea	Num. alumnos
Brazo robótico físico	2
Brazo robótico simulado	2
Enjambre robótico físico	2
Enjambre robótico simulado	2
Arquitectura cognitiva	3

Cuadro 1: Cantidad de alumnado deseable para el proyecto. Se pueden aceptar más si lo requiere el alumnado.

- Presupuesto calendarizado.

Descripción	Precio
1 Motor Mount and Wheel Kit	\$3,026.00
1 Makeblock mBot 1.1 Kit	\$2,221.37
1 Makeblock MBot Ranger	\$3,762.32
1 Makeblock Mbot Add-On Pack-Six-Legged Robot	\$1,073.06

- No hay financiamiento externo.

### 3. Calendario de actividades



Periodo	Año 1			Año 2			Año 3		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
<b>Actividades:</b>									
Revisión de fundamentos neuroinspirados y definición del modelo cognitivo general.	x								
Diseño del flujo de información sensorial-motora entre nodos y sus interconexiones.	x								
Definición de protocolos de comunicación (ROS topics, mensajes y parámetros globales)	x								
Establecimiento del entorno de simulación y repositorio de control de versiones.	x								
Implementación y análisis del nodo Corteza Somatosensorial		x	x	x					
Responsable: Montserrat y dos alumnas.									
Implementación y análisis del nodo Corteza Occipital					x	x		x	
Responsable: Montserrat y un alumno.									
Implementación y análisis del nodo Corriente Ventral:									
Responsable: Montserrat y un alumno.					x				
Implementación y análisis del nodo Módulo Espejo y Aprendizaje por imitación:		x	x	x					
Responsable: Montserrat y un alumno.									
Implementación y análisis del nodo Análisis contextual:		x	x	x					
Responsable: Montserrat y un alumno.									
Implementación y análisis del nodo Módulo perceptual predictivo:									
Responsable: Montserrat y un alumno.			x						
Implementación y análisis del nodo Corteza Motora y Aprendizaje motor:									
Responsable: Antonio, Montserrat y dos alumnas.			x	x	x				
Implementación y análisis del nodo Sistema Límbico:									
Responsable: Montserrat y un alumno					x				
Implementación y análisis del nodo Hipocampo:									
Responsable: Montserrat y un alumno					x				
Implementación y análisis del nodo Corteza Parietal:									
Responsable: Antonio, Montserrat y dos alumnos			x	x	x				
Implementación y análisis del nodo Giro Cingulado:									
Responsable: Montserrat y un alumno					x	x	x	x	x

Periodo	Año 1			Año 2			Año 3		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
<b>Actividades:</b>									
Implementación y análisis de los nodos de Memoria Responsable: Montserrat y un alumno.				x					
Tareas de validación:									
Responsables: Antonio, Montserrat y tres alumnos					x	x	x		
Implementar sensor de tacto:									
Responsables: Maribel, Montserrat y dos alumnas	x	x	x						
Armar robots físicos:									
Responsables: Erik, Montserrat y un alumno	x	x	x						
Preparación de artículos	x	x	x	x	x	x	x	x	x

## 4. Información para el seguimiento del proyecto:

### 4.1. Calendarización de productos esperados a lo largo del proyecto

Productos	Año 1	Año 2	Año 3
<b>Formación de recursos humanos nivel licenciatura</b>			
Servicio Social	4	2	2
Proyecto terminal	3	3	3
<b>Publicaciones</b>			
Artículos		1	1
Memorias o Proceedings		1	
<b>Difusión o Divulgación</b>			
Conferencias	1	1	1
<b>Otros</b>			
Patente		1	

#### 4.1.1. Resultados esperados

- Una arquitectura cognitiva que aportará al desarrollo de la Inteligencia Artificial General al incorporar una aproximación de neuronas espejo que permitirá transferir conocimiento en distintos dominios.
- Un brazo robótico que puede identificar el toque de un humano o de un objeto.
- La participación del alumnado en las actividades de este proyecto tendrá un impacto formativo en el desarrollo de:
  - Habilidades blandas como: trabajar armónicamente en equipo, perseverancia en la solución de problemas, disciplina para aplicar los conocimientos adquiridos, voluntad para mantenerse actualizado en su área de trabajo, responsabilidad y ética en su desempeño profesional, conciencia de la realidad social y responsabilidad ecológica, adaptación a diferentes entornos tecnológicos.
  - Habilidades transversales como: lenguaje disciplinar, aprender a aprender, comunicarse eficazmente en forma oral y escrita en español y comprender textos técnicos en español e inglés.

## Referencias

- [1] I. Kotseruba and J. K. Tsotsos, “40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications,” *Artificial Intelligence Review*, vol. 53, no. 1, pp. 17–94, 2020.
- [2] A. Cangelosi and M. Asada, *Cognitive robotics*. MIT Press, 2022.
- [3] J. E. Laird, *The Soar Cognitive Architecture*. The MIT Press, 2012.

- [4] S. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 1995.
- [5] R. García Núñez, A. Y. Cortés López, A. M. Alvarado González, and A. López Jaimes, “Algoritmos de neuronas espejo para el aprendizaje de enjambres robóticos,” 2024.
- [6] M. Abarca Antonio, M. B. Mejía Escutia, A. M. Alvarado González, and A. López Jaimes, “Simulación de mecanorreceptores usando un sensor de contacto.,” Master’s thesis, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Cuajimalpa, 2025.