

# Diseño de C.I. neuronal híbrido para robot de enjambre en exploración espacial

I.C. Design hybrid neural for swarm robot in space exploration

Presentación: 06/08/2024

## Rubén Roberto Navarro

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Tucumán  
[rubenrobertonavarro@gmail.com](mailto:rubenrobertonavarro@gmail.com)

## Juan Carlos Colombo

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Tucumán  
[colombojcc@gmail.com](mailto:colombojcc@gmail.com)

## Rubén Egea

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Tucumán  
[rubenegea@hotmail.com](mailto:rubenegea@hotmail.com)

## Resumen

En este trabajo se plantea el diseño de un C.I con red neuronal híbrida para su utilización en robots de enjambre que realizan misiones de exploración espacial. Siendo una aplicación de los trabajos realizados en el proyecto de investigación “optimización de sistemas de inteligencia artificial basados en deep learning con dispositivos nanoelectrónicos híbridos, analógicos y digitales”.

Este circuito integrado presenta una serie de ventajas con respecto a la implementación de las redes neuronales con computación digital exclusivamente ya que se disminuye drásticamente el número de componentes necesarios para su fabricación con la consiguiente disminución del área de silicio utilizada en el circuito integrado, disipación de potencia y consumo de corriente.

Estas mejoras permitirían la posibilidad de que se realicen tareas tales como el entrenamiento in situ de la red neuronal, mejorando de esta manera el comportamiento emergente del enjambre de forma tal de tener una adaptación más rápida e inteligente de los robots al entorno.

**Palabras clave:** Inteligencia Artificial, SoC, Robótica Enjambre, Exploración Espacial, Comportamiento emergente

## Abstract

In this work, the design of a C.I with a hybrid neural network is proposed for use in swarm robots that carry out space exploration missions. Being an application of the work carried out in the research project “optimization of artificial intelligence systems based on deep learning with hybrid, analog and digital nanoelectronic devices”.

This integrated circuit presents a series of advantages with respect to the implementation of neural networks with digital computing exclusively since the number of components necessary for its manufacture is drastically reduced with the consequent decrease in the silicon area used in the integrated circuit, heat dissipation, power and current consumption.

These improvements would allow the possibility of carrying out tasks such as in situ training of the neural network, thus improving the emergent behavior of the swarm in such a way as to have a faster and more intelligent adaptation of the robots to the environment.

**Keywords:** Artificial Intelligence, SoC, Swarm Robotics, Space Exploration, Emergent Behavior

## Introducción

En los últimos años se puede observar que se ha producido un resurgimiento de la investigación aeroespacial por múltiples factores siendo uno de los más importantes el resurgimiento de la rivalidad entre occidente

compuesto por EE. UU y la unión europea y por el otro lado Rusia y China. Además, la cada vez mayor escasez de recursos naturales también se está convirtiendo en un potente motor que impulsa la búsqueda de valiosos recursos en el espacio.

Sin embargo la exploración espacial presenta numerosos riesgos y desafíos por lo que las misiones de exploración robótica se están haciendo más frecuentes ya que estas no implican el riesgo de pérdida de vidas humanas con el respectivo impacto negativo para la correspondiente agencia espacial.

Estas misiones presentan muchos inconvenientes por un lado los robots deben operar en forma autónoma sin la intervención constante de un control en tierra, dado que por ejemplo cualquier orden enviada desde la tierra a un robot en Marte tiene un retardo de 4,5 minutos con lo que si consideramos el tiempo de retorno el centro de control tendrá un tiempo ciego de 9 minutos.

Por el otro tenemos condiciones ambientales extremas que incluyen un alto vacío, radiación electromagnética, altas temperaturas (450 grados en Venus), temperaturas extremadamente bajas (- 270 grados en el vacío), ambientes corrosivos como por ejemplo Venus con sus lluvias de ácido sulfúrico, etc. Finalmente, el robot no dispone de apoyo en el caso de una falla o accidente, por lo que hasta una falla menor puede poner en riesgo la misión y los miles de millones de dólares que se han invertido en ella.



a. Robot Lunokov I URSS.



b. Robot rover Perseverance.

Figura 1. Robots de exploración espacial.

Uno de los países pioneros en la utilización de robots para exploración espacial fue Rusia comenzando su uso en la exploración de la Luna con el robot Lunokov I que se muestra en la imagen 1a, este era un vehículo lunar con ocho ruedas motrices independientes, formado por un compartimento en forma de bañera coronado con una gran tapa convexa.

Estaba equipado con una antena en forma de cono, una antena helicoidal altamente direccional, cuatro cámaras de televisión, y dispositivos extensibles especiales para realizar ensayos de densidad. De este modelo hasta la actualidad se ha producido un enorme desarrollo en la complejidad y funciones de los robots. El rover Perseverance que se usará en la próxima misión en Marte se muestra en la figura 1b, mide 3 metros de largo, 2,7 metros de ancho y pesa 1.043 kilos. Tiene un sistema de visión de 23 cámaras, dos micrófonos de alta sensibilidad para escuchar los sonidos de Marte, un complejo laboratorio con 7 instrumentos científicos y un brazo robótico de dos metros. A pesar de los grandes avances producidos en las misiones de exploración espacial de robot único estas presentan una serie de limitaciones entre las que podemos citar:

- **Poca Autonomía:** Estos robots tienen una alta dependencia del centro de control limitando sus prestaciones.
- **Tiempo Ciegos:** El tiempo de retardo de la información desde y hasta el centro de control puede ser catastrófico ya que en el mismo se pueden producir eventos que afecten la misión.
- **Bajo rendimiento:** Dado los tiempos ciegos se debe limitar las operaciones realizadas a un mínimo de forma tal de no arriesgar la misión.
- **Condiciones dinámicas:** dado que el clima puede variar en forma imprevista y en segundos a lo largo de la misión se constituye en un riesgo permanente para la misma.
- **Alta vulnerabilidad:** La falla de cualquier elemento o sistema del robot puede implicar el fracaso de la misión.

Es por ello que se están realizando diversas investigaciones para solucionar estas deficiencias siendo uno de los campos más prometedores la utilización de la robótica de enjambre.

## Desarrollo

La robótica de enjambre es un campo de investigación dentro de la inteligencia artificial. Esta rama de investigación estudia el desarrollo de nuevos mecanismos de organización y coordinación descentralizados y distribuidos de múltiples entidades robóticas. Basándose en los comportamientos que se observan en la naturaleza sobre todo con los insectos tales como hormigas o abejas. Estas entidades robóticas son relativamente

simples y tienen capacidades de comunicación entre si donde se busca que el comportamiento del conjunto produzca un comportamiento emergente es decir un comportamiento superior que el que se puede obtener con cada uno de los individuos.



a. Hormigas formando un puente.



b. Hormigas formando una balsa.

Figura 2. Ejemplos de comportamiento emergente en la naturaleza.

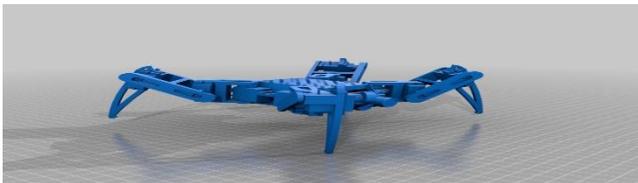
Por ejemplo, una hormiga sola no puede cruzar un río, pero un conjunto de ellas puede formar un puente como se muestra en la figura 2a o incluso armar una balsa con sus propios cuerpos para cruzar el mismo como se ve en la figura 2b. De esta manera se obtienen comportamientos colectivos inteligentes a través de la interacción de cada uno de los individuos del enjambre y con el entorno. Por otro lado, la robótica de enjambre presenta una serie de ventajas frente al concepto de robot único que son:

- **Escalabilidad:** Si se sustraen o se aumentan entidades robóticas al enjambre este no pierde su capacidad de actuación
- **Inteligencia colectiva:** El enjambre presenta en su conjunto un comportamiento más inteligente que las capacidades de cada una de las entidades robóticas aisladas.
- **Autoorganización:** Las entidades robóticas del enjambre se organizan entre sí para poder llevar a cabo las tareas colectivas asignadas.
- **Resiliencia:** La pérdida de individuos del enjambre no implica que el mismo deje de efectuar la tarea colectiva asignada

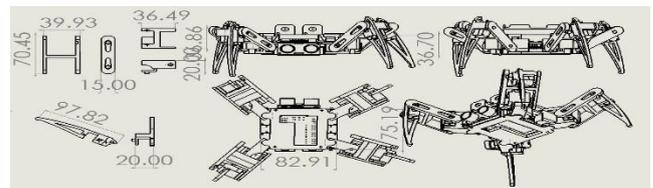
La exploración espacial con robótica de enjambre hace uso de las capacidades de los enjambres de robots anteriormente citadas para planificar, coordinar y ejecutar misiones en las superficies de diferentes planetas, lunas y cuerpos celestes. Las propiedades del enjambre garantizan la exploración con niveles de resiliencia, magnitud y alcance totalmente nuevos. También plantea grandes desafíos sobre todo en el manejo de los altos niveles de complejidad que implica su programación.

### Diseño del robot de enjambre

El robot que se utilizara para la implementación del enjambre, debe ser un robot simple con una capacidad de procesamiento y consumo de energía mínimo además de poseer funciones de comunicación. Por eso se ha tomado como base un SoC ESP32 para controlar un robot araña de 4 patas que se fabricara con una impresora 3D como se muestra en la fig. 3.



a. Modelo 3D robot.



b. Planos de fabricación.

Figura 3. Diseño del robot araña.

Cada pata tendrá tres servomotores para el control de su movimiento, estos servomotores serán del tipo SG90 los cuales tienen una capacidad de 1.5 Kg de torque para que pueda desplazarse en diferentes ambientes.

Dispone además de tres emisores de ultrasonido para determinar los obstáculos del entorno. Donde para la comunicación entre los individuos del enjambre se utiliza el protocolo ESP NOW y para el envío de la información de estado de cada uno de los individuos del enjambre se utiliza la red wifi.

### C.I. Neuronal Híbrido

El ESP32 se comunica mediante un puerto I2C con el circuito integrado neuronal híbrido como se ve en la fig. 4 enviando la información obtenida de los sensores y recibiendo como respuesta las correspondientes acciones a realizar. En una primera etapa para las pruebas de robótica de enjambre se va a realizar un modelado de tarea

de agregación. Esta tarea consiste en la agregación de un enjambre de robots dispersos en el entorno utilizando la información de sus sensores locales.

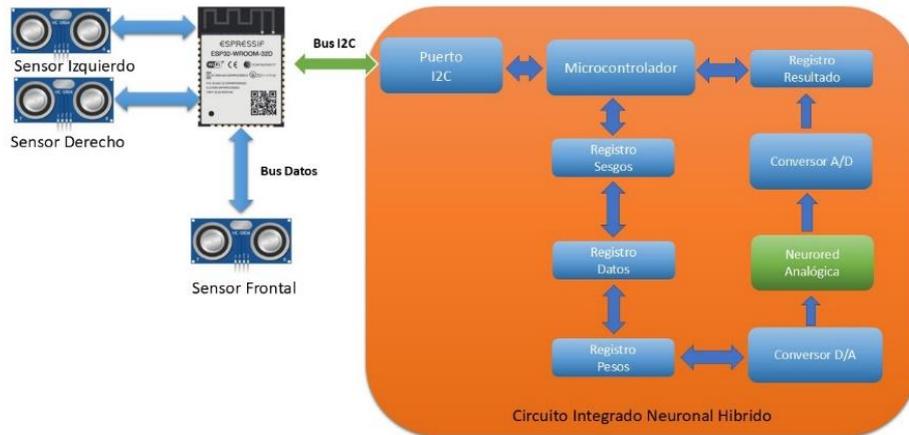


Figura 4. Diagrama en bloques unidad de control robot araña.

Este tipo de tareas se considera un requisito previo para abordar otras tareas como el movimiento coordinado, el autoensamblaje, la formación de patrones o el transporte colectivo de objetos. Siendo el objetivo de estos ensayos comparar los resultados de las diferentes estrategias evolutivas en varios enjambres de diferente tamaño. Analizando cuál aprende más rápido y genera políticas de mayor calidad, teniendo en cuenta la escalabilidad y su capacidad de generalización.

Para ello se define un entorno sin obstáculos para simplificar el comportamiento de los robots. Los robots son los principales componentes que interactúan con el entorno, que en este caso es desconocido, ya que, cada robot desconoce los movimientos que ejecutará el resto del enjambre. En cada paso,  $t$ , cada robot observa su estado,  $S(t, u_d, u_i, u_f, v)$ . Los posibles estados del problema están determinados por los datos capturados de los sensores ultrasónicos derecho, izquierdo y frontal además del comando de velocidad ejecutado anteriormente.

Una vez que los robots han percibido la información del entorno, se selecciona una acción a realizar para pasar del estado siguiente. La función de fitness que puede verse en la ecuación 1, se basa en la utilizada en la propuesta de ABDOLRASOL, Maher GM. (2021).

$$f(t) = \frac{z(t)}{n} \tag{1}$$

Donde  $z$  es el tamaño del clúster más grande que se ha formado y  $n$  el número de robots. La función de fitness se ha definido de forma tal que no sea lineal, ponderando las mejores soluciones y penalizando las mediocres como puede verse en la ecuación 2.

$$f(t) = \begin{cases} -10 & \text{si } z(t)/n = 1/n \\ (10 * z(t)/n) - 10 & \text{si } (z(t)/n) < 0.5 \\ 10 * z(t)/n & \text{si } (z(t)/n) \geq 0.5 \end{cases} \tag{2}$$

La política de entrenamiento utiliza una red neuronal de clasificación para mapear la información de las entradas y salidas que se muestra en la Fig. 5. Esta se ha implementado en el circuito neuronal híbrido.

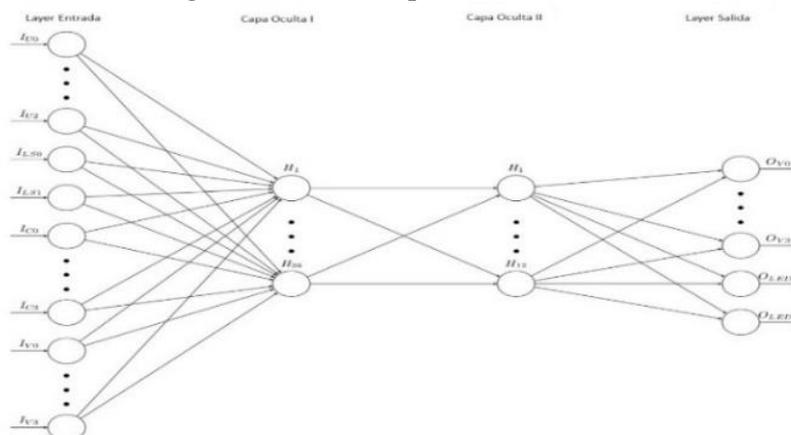


Figura 5. Red neuronal de control del robot de enjambre.

Esta red consta de 2 capas ocultas más las capas de entrada y salida, la función de activación de cada una de sus neuronas es tanh y obtiene la información del entorno discretizada para acelerar el proceso de aprendizaje.

Además, cada robot del enjambre ejecutará la misma red para conseguir un comportamiento colectivo generando los mismos criterios de decisión para las mismas transiciones de estado.

### Ensayo y simulación

Cada una de las neuronas ha sido implementada con un circuito analógico que utiliza un total de 16 amplificadores operacionales con 8 transistores cuyo circuito se muestra en la figura 6.

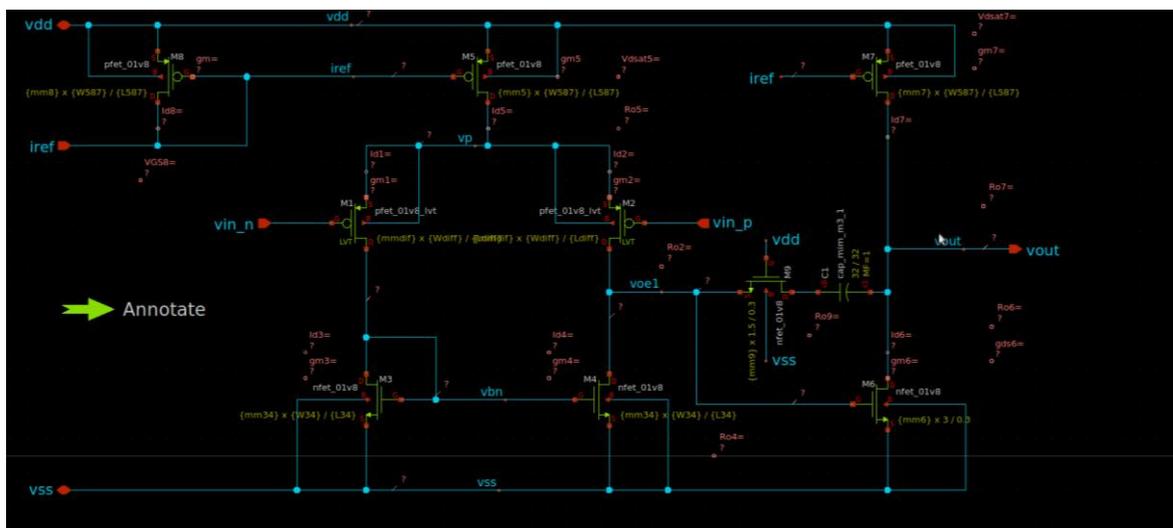


Figura 6. Amplificador operacional en XSCHEM

Se realizaron diferentes simulaciones del C.I. en el entorno del XSCHEM que es el software proporcionado por el fabricante para el diseño de circuitos integrados de 120 nm. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla I. En la misma se comparan tres tipos de red, la red analógica denominada Analog, una red digital optimizada denominada Dig. I y una red digital sin optimizar denominada Dig. II las cuales han sido implementadas en una FPGA Artix-7 de Xilinx.

Tabla 1. Número de transistores y potencia disipada para red de 64 neuronas

Tipo Red	Numero Transistores	Potencia Consumida
Analog	8192	0.8 $\mu$ W
Dig. I	2247400	0,22 mW
Dig. II	2631600	0.43 mW

Al analizar esta tabla debe tenerse en cuenta que al utilizar una fpga comercial, los recursos de hardware no se encuentran optimizados. Por lo que el número de transistores en las redes digitales puede reducirse utilizando un ASIC para su implementación. Sin embargo, la diferencia de componentes utilizados entre ambas tecnologías es notable. Por lo que es posible esperar integrar redes neuronales muy complejas con funciones de entrenamiento en etapas posteriores del proyecto.

Una vez finalizado el diseño del Layaout del circuito integrado este será enviado a una empresa del medio para la fabricación de algunos prototipos, además se están fabricando una decena de robots con el diseño propuesto para que cuando esté disponible el C.I. realizar las pruebas de comportamiento emergente del enjambre pudiendo determinarse cuales son las mejores estrategias de inteligencia artificial para su implementación.

## Conclusiones

Se ha realizado el diseño de un circuito integrado híbrido analógico como aplicación de las tecnologías desarrolladas en el proyecto “optimización de sistemas de inteligencia artificial basados en deep learning con dispositivos nanoelectrónicos híbridos, analógicos y digitales”.

Este tiene como objetivo la implementación de una red neuronal para el control del comportamiento emergente de un enjambre de robots para exploración espacial. El C.I. desarrollado presenta ventajas en cuanto al número de componentes, potencia disipada y consumo de corriente como se observa en las simulaciones realizadas con respecto a las soluciones basadas en computación digital exclusivamente. Encontrándose en este momento en la etapa de diseño del layout para su posterior fabricación y prueba.

## Referencias

Zhou, Zhi-Hua. *Machine learning*. Springer nature, 2021.

SHINDE, Pramila P.; SHAH, Seema. *A review of machine learning and deep learning applications*. En 2018 Fourth international conference on computing communication control and automation (ICCUBEA). IEEE, 2018. p. 1-6.

ABDOLRASOL, Maher GM, et al. *Artificial neural networks based optimization techniques: A review*. Electronics, 2021, vol. 10, no 21, p. 2689.

WALCZAK, Steven. *Artificial neural networks*. En Advanced methodologies and technologies in artificial intelligence, computer simulation, and human-computer interaction. IGI global, 2019. p. 40-53.

HAENSCH, Wilfried; GOKMEN, Tayfun; PURI, Ruchir. *The next generation of deep learning hardware: Analog computing*. Proceedings of the IEEE, 2018, vol. 107, no 1, p. 108-122.

GARG, Sahaj, et al. *Dynamic precision analog computing for neural networks*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, vol. 29, no 2: Optical Computing, p. 1-12.

SCELLIER, Benjamin, et al. *Energy-based learning algorithms for analog computing: a comparative study*. Advances in Neural Information Processing Systems, 2024, vol. 36.

DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy; TRIANNI, Vito. *Swarm robotics: Past, present, and future [point of view]*. Proceedings of the IEEE, 2021, vol. 109, no 7, p. 1152-1165.

DIAS, Pollyanna G. Faria, et al. *Swarm robotics: A perspective on the latest reviewed concepts and applications*. Sensors, 2021, vol. 21, no 6, p. 2062.

MAJID, M. H. A.; ARSHAD, M. R.; MOKHTAR, R. M. *Swarm robotics behaviors and tasks: a technical review*. Control engineering in robotics and industrial automation: Malaysian society for automatic control engineers (MACE) technical series 2018, 2022, p. 99-167.