

ROBÓTICA EVOLUTIVA Y SU INCORPORACIÓN A INDUSTRIA 4.0

EVOLUTIONARY ROBOTICS AND ITS INCORPORATION TO INDUSTRY 4.0

Fernando Aldana Franco

RESUMEN

La robótica evolutiva es una rama de la robótica autónoma que desarrolla componentes de morfología y control de robots basados en la experiencia de estos en los ambientes de trabajo. Este conjunto de técnicas se basa en la selección y adaptación de las especies en la naturaleza. Por lo que se busca la adaptación a ambientes que implican condiciones de dinamismo elevadas. Este es el caso de los ambientes de Industria 4.0, en donde la tecnología interactúa entre sí y con el personal de las fábricas. Particularmente, representan un desafío importante para la Inteligencia Artificial desde la perspectiva de la toma de decisiones a partir del intercambio masivo de datos. Esto se traduce en un problema de coordinación entre entes artificiales que les permita realizar tareas colaborativas. Lo que la robótica evolutiva ofrece a estos escenarios es la emergencia de sistemas de comunicación, que son establecidos a través de reglas que se producen mediante mecanismos de optimización y la interacción entre robots en su entorno. Lo que permite la integración de soluciones de robótica autónoma a los escenarios de Industria 4.0.

PALABRAS CLAVE: robótica evolutiva, Industria 4.0, comunicación emergente, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos

ABSTRACT

Evolutionary Robotics is a branch of Autonomous Robotics that develops components of morphology and control of robots based on their experience in work environments. This set of techniques is based on the selection and adaptation of species in nature. Therefore, adaptation to environments that involve high dynamism conditions is sought. This is the case in Industry 4.0 environments, where technology interacts with each other and with factory personnel. This represents an important challenge for Artificial Intelligence from the perspective of decision-making based on the massive exchange of data. This translates into a coordination problem between artificial entities that allows them to perform collaborative tasks. What Evolutionary Robotics offers to these scenarios is the emergence of communication systems, which are established by rules that are produced through optimization mechanisms and the interaction between robots in their environment. This allows the integration of autonomous robotics solutions to Industry 4.0 scenarios.

KEYWORDS: evolutionary robotics, Industry 4.0, emergent communication systems, artificial neural networks, genetic algorithms

1. INTRODUCCIÓN

Las revoluciones industriales son propulsoras del cambio de tecnología. Así, la primera revolución industrial se relaciona con la aparición del motor a vapor. La segunda revolución se caracteriza por la integración de la tecnología eléctrica a los procesos industriales. Lo que representó una mejora a los sistemas de producción, mejorando las características de operación de los procesos de manufactura incorporando motores eléctricos.

La tercera revolución industrial se caracteriza por el uso de tecnología electrónica y computacional. Lo que permitió aumentar el grado de autonomía de los procesos y reducir la participación de personal humano en tareas peligrosas. Durante esta se incorporaron los microcontroladores y microprocesadores para permitir a los artefactos industriales repetir una secuencia de pasos para resolver un problema.

La cuarta revolución industrial es un esfuerzo por aumentar el grado de autonomía en los procesos de fabricación. Es decir, se busca que las fábricas puedan operar la mayor cantidad de tiempo posible. Lo que se traduce en la optimización de ganancias y costos de operación.

Para lograrlo, se propone la incorporación de sistemas ciberfísicos para complementar los sistemas electrónico-computacionales existentes. Los sistemas ciberfísicos son aquellos que tienen un componente físico y uno cibernético (Roblek, Mesko & Krapez, 2016). Lo que vuelve a todos los elementos del proceso de manufactura en productores y consumidores de datos. Así, la intención fundamental es aumentar la autonomía de las fábricas a partir de sistemas de decisión basados en datos. Lo que permite establecer acciones a nivel individual, pero también de forma colectiva. A esta nueva revolución industrial se le conoce como Industria 4.0 y está integrada por diferentes componentes como (ver figura 1): *cloud computing*, internet de las cosas (IoT), realidad aumentada, manufactura aditiva, simulación, ciberseguridad, *Big Data*, integración de sistemas y robótica autónoma (RA). Adicionalmente, la Industria 4.0 depende de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para lograr los niveles de autonomía deseados.

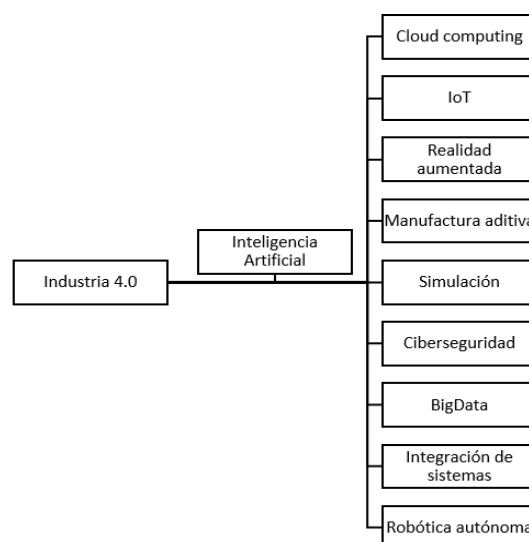


Figura 1. Ramas de desarrollo de la Industria 4.0. Fuente: elaboración propia

En el caso del *cloud computing*, se emplea principalmente para almacenar los datos generados en sistemas informáticos remotos. Esto porque se busca reducir los costos que implica para las diferentes fábricas la actualización de la infraestructura computacional asociada al almacenamiento de la información.

El internet de las cosas (IoT) es, probablemente, el modelo de comunicación más importante en Industria 4.0. Está formado por cuatro capas: física, red, *cloud* y aplicación. Se integra por componentes electrónicos que permiten a los diferentes aparatos enviar datos a través de una red. Estos datos son generados por sensores de diferentes tipos y adquiridos en la capa física. Los datos son almacenados en un servidor remoto y sirven para tomar decisiones mediante algún componente de Inteligencia Artificial (Gokhale, Bhat & Bhat, 2018). Existen otros modelos de comunicación en Industria 4.0, como es el caso de *Machine to Machine* (M2M), pero que no implican el almacenamiento y utilización de los datos.

La realidad aumentada representa una herramienta que permitirá a las empresas construir entornos virtuales en espacios reales. Estos pueden ser útiles para entrenar personal, pero también para reducir los costos de las consolas de control. Por su parte, la manufactura aditiva tiene la finalidad de permitir la construcción de equipo especializado en las fábricas. También representa una opción para producir refacciones necesarias para el mantenimiento de la maquinaria. La simulación puede combinarse con la realidad aumentada para mejorar los sistemas de entrenamiento del personal. Aunque también puede ser aplicada en combinación con la manufactura aditiva para probar materiales nuevos en el proceso previo a la construcción de nuevos productos. Su principal objetivo es reducir los costos de prueba en una fábrica.

Al tener un constante flujo de datos en esta nueva perspectiva de producción, es importante que estos no sean interceptados por agentes externos. Particularmente, se vuelve trascendental el proteger los datos que implican secretos industriales. De ello se encarga la ciberseguridad, que trata de reducir al mínimo posible el acceso a los datos de un fabricante.

Por su parte, el *Big Data* es un conjunto de algoritmos computacionales que generan aprendizaje en los sistemas. Se diferencian de los algoritmos tradicionales de IA, porque se diseñan para trabajar con grandes cantidades de datos. Esta rama está en una etapa inicial.

La integración de los sistemas puede resultar el punto medular de toda la Industria 4.0. Debido a que todos los componentes de la fábrica pueden producir datos y tomar decisiones individuales, la intención es lograr la coordinación entre los diferentes elementos, lo que permitirá que los elementos de las fábricas sigan un mismo propósito. Esto es algo similar a lo que ocurre con la estrategia “divide y vencerás”, en donde se busca dividir un problema general en subproblemas. Al final, la integración de las soluciones individuales resuelve el objetivo general del problema inicial. En el caso de la robótica autónoma (RA) incorporada a Industria 4.0, se busca que permita contar con robots que puedan resolver tareas diversas (Eric, Geuna, Guerzoni & Nuccio, 2018). Estas tareas pueden ser aquellas que resulten riesgosas para humanos. Pero también aquellas en donde la fuerza de un dispositivo como estos sea útil. Inclusive en tareas en donde un humano resulte más lento que un robot. Para ello se utilizan componentes de la ingeniería de control, la electrónica y la Inteligencia Artificial (Liu & Wu, 2018).

De este modo, este tipo de robots debe contar con la capacidad de tomar decisiones para resolver un problema. Pero también deben contar con las herramientas de control suficientes para contender con el medio en donde se encuentran inmersos (Goel & Gupta, 2020). Es decir, capacidades para eludir colisiones, planificación, navegación, interacción con humanos, robots y otras máquinas.

Desde la perspectiva de la integración de los sistemas, la interacción de los robots es un problema importante. Una primera aproximación de solución implica sistemas definidos por los diseñadores, con protocolos de comunicación incluidos y un conjunto de mensajes cuyo contenido debe ser interpretado por los robots. A esta perspectiva de resolución de los problemas se le conoce como distal. Sin embargo, entre más complejo sea el entorno en donde los robots van a desarrollar sus tareas, más difícil se vuelve el diseño de sistemas de comunicación eficientes. Sin contar con las dificultades en la integración del sistema de comunicación con el sistema de control. Por ello se deben incorporar herramientas de la robótica autónoma que permitan una perspectiva diferente de solución a los sistemas de integración entre robots. Particularmente aquellas soluciones que reducen la complejidad del diseño, privilegiando la experiencia de los robots en contacto con los entornos y tareas que deben resolver. Lo que puede permear más allá de la Industria 4.0 y adaptarse a la vida diaria de las personas.

1. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

La robótica evolutiva (RE) es una rama de la RA que nace a principios de la década de los años 90. Su autoría es discutida entre dos grupos de investigación en universidades de Inglaterra e Italia. Se trata de una nueva perspectiva para producir componentes de morfología y/o control de robots que se encuentra inspirada en la evolución de los seres vivos (Chettibi, Lehtihet, Haddad & Hanchi, 2004).

Esto quiere decir que se trata de un conjunto de métodos bioinspirados que se emplean como mecanismos de optimización (Corucci, 2017). Se ponen a prueba las características de los robots y conforme avanza el proceso, estas mejoran (Birglen & Schlicht, 2018). Es por ello por lo que una de las principales características de esta rama es que privilegia la experiencia sobre el diseño. Lo que se traduce que las soluciones emergen como una consecuencia de las presiones del entorno (Doncieux, Bredechem Mouret & Eiben, 2015).

En RE existen cuatro componentes que conforman el proceso de diseño de un robot (ver figura 2): Elemento a optimizar, algoritmo de optimización, medio de optimización y función de aptitud.

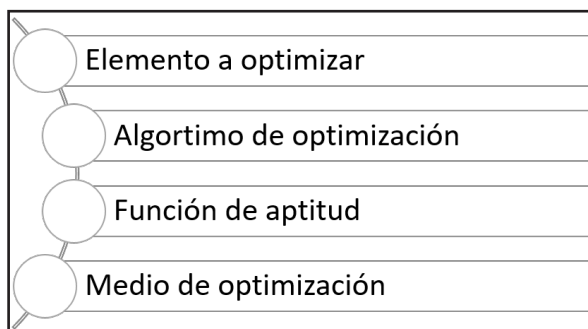


Figura 2. Componentes de un proceso en RE. Fuente: elaboración propia

En cuanto al primer elemento, es posible evolucionar morfología y/o el control de un robot. Cuando se trata de morfología, la optimización comprende variables como forma, dimensiones, material de fabricación, sistema de locomoción, sensores, actuadores, tarjeta de control (Bredeche, Haasdijk & Prieto, 2018). Estas características se codifican en una representación computacional.

Por su parte, cuando se trata evolucionar un sistema de control (Duarte, Gomes, Oliveira & Christensen, 2017), este puede tomar la forma de algunas herramientas de IA. Entre ellas se encuentra la lógica difusa, los árboles de decisión, las redes bayesianas o las redes neuronales artificiales (RNA). Son estas últimas las que se emplean con mayor frecuencia en el campo de la RE para el control de robots. Esto se debe a la capacidad que tienen para manejar ruidos de los componentes electrónicos y la plasticidad para reducir el efecto de algún fallo en un componente físico.

Las RNA son sistemas multicapa que discriminan información y se trata de un modelo computacional bioinspirado de la sinapsis eléctrica de las neuronas naturales (Nolfi & Mirolli, 2009). Existen diferentes topologías y características que también pueden optimizarse. Lo común es conectar las señales de los sensores del robot a la capa de entrada, mientras que de la capa de salida se obtienen las señales actuantes que modifican el estado de motores y otros elementos finales (ver figura 3). Se pueden incluir diferentes capas intermedias en la estructura de la red. Un mayor número de capas intermedias aumenta la capacidad de discriminación del robot, haciendo el elemento de control menos reactivo y más deliberativo. Esto puede tener una semejanza con lo que ocurre en las estructuras del sistema nervioso central, en donde si la información atraviesa menos neuronas se asocia con tareas reactivas, por ejemplo, los movimientos de reflejos. Mientras que aquellas señales que siguen una trayectoria con mayor procesamiento de la información se asocian con tareas deliberativas, por ejemplo, el movimiento fino de las manos.

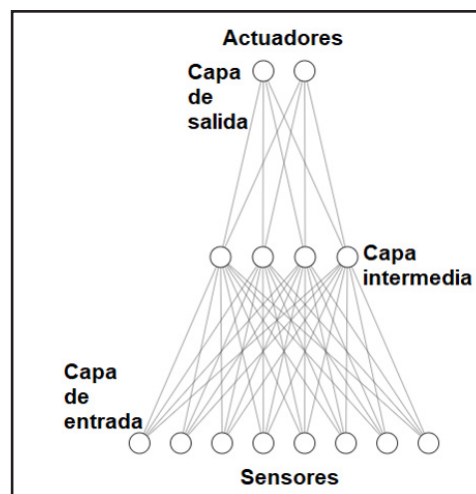


Figura 3. Prototipo de RNA empleada para el control en RE. Fuente: elaboración propia

Entre más grande sea una RNA, más complejo es el espacio de búsqueda computacional que debe explorar el algoritmo de optimización. La complejidad de la tarea de optimización también aumenta cuando se quiere evolucionar la topología

de la red y sus pesos sinápticos mediante el mismo procedimiento. Como en el caso de la morfología, las RNA también deben ser codificadas computacionalmente hablando, lo que depende del algoritmo de optimización empleado.

Sobre este elemento, los algoritmos de optimización provienen de un campo de la IA llamado Computación Evolutiva. El más empleado en RE es el algoritmo genético generacional (AGG). Se trata de un algoritmo inspirado en la teoría evolutiva de Darwin. Por lo que se espera que aquellos individuos artificiales que tengan un mejor rendimiento en las condiciones del entorno tendrán mayor probabilidad de mantener su representación en el proceso evolutivo artificial (Silva, Correia & Christensen, 2016).

Los AGG pueden combinarse fácilmente con las RNA. En la versión básica de un AGG, las RNA se codifican en forma binaria mediante una cadena de *bits* como si se tratara de cromosomas. Inicialmente se genera un conjunto de individuos de forma aleatoria. Estos individuos son puestos a prueba en un entorno real o simulado. Se cuantifica la habilidad de cada individuo (solución) para resolver una tarea mediante una función de aptitud. Basado en el puntaje obtenido, se aplica un conjunto de operadores. Entre ellos se encuentra la selección, en donde se eligen los padres potenciales para individuos de una nueva generación. Una vez seleccionados se aplica el operador de cruza que permite combinar las representaciones numéricas de los padres potenciales para formar un nuevo individuo. Posteriormente se aplica la mutación, que consiste en alterar aleatoriamente un conjunto de *bits* de los individuos de la próxima generación mediante un porcentaje de mutación, que suele fijarse a 1% o 2%. Existen otros operadores que permiten mejorar las características del AGG como es la selección, que permite conservar algunos de los padres en la próxima generación. Otro de los operadores más comunes es el elitismo, en donde se identifica el individuo con aptitud mayor para conservarlo intacto en la siguiente generación. Una vez aplicados los operadores, se verifica si se cumple la condición de parada. En caso de no satisfacerse, la generación de hijos se pone a prueba y se repite el ciclo básico (ver figura 4).

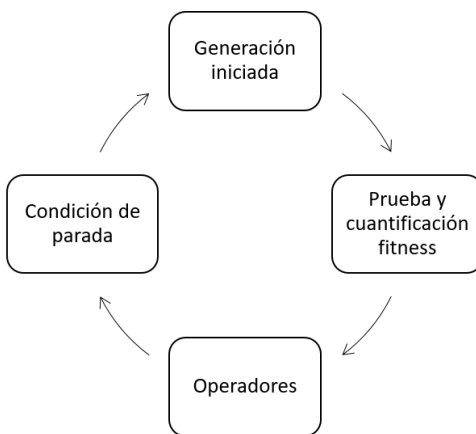


Figura 4. Ciclo de funcionamiento de un algoritmo genético generacional. Fuente: elaboración propia

La función de aptitud es una función matemática que cuantifica qué tan buena es una solución para un problema dado. Se trata de una idea que proviene de la biología y de la etología. En el caso de la RE se establece en cada *step* de prueba

y cada *trial* de los individuos. También puede realizarse de forma general, es decir, cuantificar si un individuo llegó a una meta establecida al final de un *trial* o prueba.

En cuanto al medio de prueba, este puede ser un ambiente simulado o uno real. Inclusive se puede combinar un proceso evolutivo que ocurre desde el inicio y casi hasta el final en un ambiente simulado. En estos casos, las últimas generaciones ocurren en un entorno real. Lo que reduce la discrepancia entre las condiciones reales y las condiciones simuladas, también llamado *reality gap*.

Dada la forma en que se conducen los procesos de diseño en RE, se puede identificar que las presiones del medio moderan la emergencia de las soluciones. Por lo que la influencia del diseñador se reduce. A esta perspectiva se le conoce como perspectiva proximal (Nolfi, 2021). La perspectiva proximal no siempre tiene correspondencia con la perspectiva distal.

Uno de los campos de investigación más prometedores en RE es el de los sistemas de comunicación emergentes. Estos sistemas son aquellos en donde el diseñador define algunas condiciones mínimas sobre su funcionamiento (Hasselmann, Robert & Birattari, 2018). Por ejemplo, el tipo de comunicación a emplear. Esta puede ser mediante radiofrecuencia, por sonido o visual. Las reglas del sistema de comunicación, así como el valor y significado de cada señal emerge de las presiones del medio (Marocco, Cangelosi & Nolfi, 2003). Para que un sistema de comunicación emergente se establezca, son necesarias diferentes condiciones, las cuales no han sido del todo estudiadas.

Una de ellas es la utilidad del sistema, es decir, deben ser una herramienta que permita la solución de una tarea. Para que el sistema emerja y se establezca se requiere que tenga utilidad para la población de robots (Trianni & Dorigo 2006). Si una tarea no es suficientemente compleja, es probable que el sistema de comunicación no se establezca porque resulta innecesario para su solución (Floreano & Lipson, 2021).

Otra de las condiciones es la conformación del equipo. Los grupos de robots pueden ser homogéneos si comparten las mismas características a nivel morfológico. También pueden ser heterogéneos, si cuentan con diferentes características morfológicas, por ejemplo, sensores y/o actuadores diferentes. La comunicación tiende a emerger en forma más sencilla en grupos homogéneos. Aunque en los grupos heterogéneos puede emerger como una consecuencia de la cooperación en la solución de una tarea (Damiano & Dumouchel, 2018) o por la competitividad en un ambiente (Stoy, 2021).

En cuanto al tipo de tareas que actualmente se resuelven mediante comunicación emergente se encuentran las de forrajeo (Mitri, Floreano y Keller, 2009). Un escenario relacionado consiste en un par de áreas (comida y veneno). Un conjunto de robots debe alcanzar la zona de comida y evitar la zona de veneno. Los robots utilizan la comunicación para señalar la posición de una zona de comida y así atraer al resto del equipo. También suelen emplear la comunicación para enviar señales que le avisen al resto del equipo que uno de los robots ha encontrado una zona de veneno y el grupo debe evitarla.

Otra de las tareas en donde se ha experimentado con comunicación en RE es un escenario conformado por dos áreas circulares de color diferente (blanco y negro). Un par de robots deben sincronizarse para cruzar las áreas circulares. Es decir, un robot debe cruzar la zona blanca mientras el otro cruza la zona en negro (De Greeff & Nolfi, 2010).

Una tarea más compleja es la solución de laberintos. En ellos, un conjunto de robots parte de una posición inicial y deben explorar el laberinto hasta encontrar el punto de salida (Matsuda, Hubert & Ikegami, 2014). En este caso, la comunicación puede emplearse para coordinar el movimiento de los robots detrás de un líder. También para coordinar los puntos de exploración del laberinto. Los laberintos pueden ser simples como unos del tipo T-Maze, que consisten en un pasillo que se divide en dos pasillos (Blynell y Floreano, 2003). También pueden ser laberintos más complejos con múltiples paredes y obstáculos.

Adicionalmente, también se pueden resolver tareas de rescate (Bakhshipour, Ghadi & Namdari, 2017). Estas tareas consisten en espacios en donde un conjunto de robots parte de una posición inicial. El grupo debe encontrar el objeto a rescatar y regresar al punto de partida. En este caso, la comunicación sirve para coordinar el movimiento y la exploración del ambiente. Pero también para encontrar el camino al punto inicial o para señalar al objeto encontrado.

Dadas las características y ejemplos presentados, no es difícil imaginar el potencial de aplicación de la RE a ambientes de Industria 4.0. Mediante los sistemas de comunicación emergente, los robots autónomos pueden identificar zonas de almacenamiento, identificar productos y planear trayectorias. También pueden encontrar y transportar materia prima y productos. Inclusive pueden dividir el trabajo de una tarea general para ser resuelta en forma más sencilla.

3.CONCLUSIÓN

La incorporación de RE a ambientes de Industria 4.0 es posible. La característica más importante que puede ofrecer la RE a los nuevos ambientes industriales es la emergencia de las soluciones. Estas provienen de la perspectiva proximal, que privilegia la experiencia del robot con el entorno. Lo que favorece la emergencia de herramientas como los sistemas de comunicación. Sin los sistemas de comunicación emergentes, los diseñadores deben definir los medios de comunicación, así como los mensajes y su significado mediante la perspectiva distal. Esto puede ser una tarea compleja, que se vuelve más difícil cuando la cantidad de robots involucrados crece. Pero mediante la perspectiva proximal, los robots establecen los mecanismos de comunicación, los mensajes, sus significados y la respuesta de los robots a los estímulos comunicativos, todo ello mediante la experiencia con el medio ambiente.

4. REFERENCIAS

- Bakhshipour, M., Ghadi, M. J. & Namdari, F. (2017). Swarm robotics search & rescue: A novel artificial intelligence-inspired optimization approach. *Applied Soft Computing*, 57, 708-726.
- Birglen, L. & Schlicht, T. (2018). A statistical review of industrial robotic grippers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 88-97.
- Blynell, J. & Floreano, D. (2003). Exploring the T-maze: Evolving learning-like robot behaviors using CTRNNs. In *Workshops on Applications of Evolutionary Computation* (pp. 593-604). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bredeche, N., Haasdijk, E., & Prieto, A. (2018). Embodied evolution in collective robotics: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 12.

- Chettibi, T., Lehtihet, H. E., Haddad, M. & Hanchi, S. (2004). Minimum cost trajectory planning for industrial robots. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 23(4), 703-715.
- Corucci, F. (2017). Evolutionary developmental soft robotics: towards adaptive and intelligent soft machines following nature's approach to design. In *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges* (pp. 111-116). Springer, Cham.
- Damiano, L. & Dumouchel, P. (2018). Anthropomorphism in human-robot co-evolution. *Frontiers in psychology*, 9, 468.
- De Greeff, J. & Nolfi, S. (2010). Evolution of implicit and explicit communication in mobile robots. In *Evolution of communication and language in embodied agents* (pp. 179-214). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Doncieux, S., Bredeche, N., Mouret, J. B. & Eiben, A. E. G. (2015). Evolutionary robotics: what, why, and where to. *Frontiers in Robotics and AI*, 2, 4.
- Duarte, M., Gomes, J., Oliveira, S. M. & Christensen, A. L. (2017). Evolution of repertoire-based control for robots with complex locomotor systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 22(2), 314-328.
- Eric, E., Geuna, A., Guerzoni, M. & Nuccio, M. (2018). Mapping the evolution of the robotics industry: A cross country comparison.
- Floreano, D. & Lipson, H. (2021). From individual robots to robot societies. *Science Robotics*, 6(56), eabk2787.
- Goel, R. & Gupta, P. (2020). Robotics and industry 4.0. In *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development* (pp. 157-169). Springer, Cham.
- Gokhale, P., Bhat, O. & Bhat, S. (2018). Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1), 41-44.
- Hasselmann, K., Robert, F. & Birattari, M. (2018). Automatic design of communication-based behaviors for robot swarms. In *International Conference on Swarm Intelligence* (pp. 16-29). Springer, Cham.
- Liu, J. & Wu, J. (2018). *Multiagent robotic systems*. CRC press.
- Marocco, D., Cangelosi, A. & Nolfi, S. (2003). The emergence of communication in evolutionary robots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1811), 2397-2421.
- Matsuda, E., Hubert, J. & Ikegami, T. (2014). A robotic approach to understanding the role and the mechanism of vicarious trial-and-error in a t-maze task. *PloS one*, 9(7), e102708.

- Mitri, S., Floreano, D. & Keller, L. (2009). The evolution of information suppression in communicating robots with conflicting interests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15786-15790.
- Nolfi, S. (2021). *Behavioral and Cognitive Robotics: An adaptive perspective*.
- Nolfi, S., & Mirolli, M. (2009). *Evolution of communication and language in embodied agents*. Springer Science & Business Media.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of industry 4.0. *Sage Open*, 6(2), 2158244016653987.
- Silva, F., Correia, L., & Christensen, A. L. (2016). Evolutionary robotics. In *Evolutionary Robotics* (No. 7). Scholarpedia.
- Stoy, K. (2021). Co-evolution of Initial Configuration and Control in Evolutionary Robotics. In *ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life*. MIT Press.
- Trianni, V. & Dorigo, M. (2006). Self-organisation and communication in groups of simulated and physical robots. *Biological cybernetics*, 95(3), 213-231.

SEMBLANZA DEL AUTOR

Fernando Aldana Franco

Ingeniero en Instrumentación Electrónica (2008), maestro en Inteligencia Artificial (2011) y doctor en Inteligencia Artificial (2017), grados obtenidos en la Universidad Veracruzana. Investigador invitado al Laboratorio de Robótica y Vida Artificial del Consejo Nacional de Investigación en Roma (2016). Profesor de la Universidad Veracruzana en las carreras de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Civil e Ingeniería Química. Técnico académico de tiempo completo encargado del laboratorio de electromagnetismo, electrónica y control de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica-Xalapa, Universidad Veracruzana. Líneas de investigación: robótica evolutiva, comunicación emergente, modelado computacional de estructuras neurobiológicas, control inteligente, internet de las cosas, domótica e inmótica. faldana@uv.mx