

El autoensamblaje en la escala macroscópica

Self-assembly on the macroscopic scale

¹Jorge Eliecer Benitez-Prada, ²Héctor Plascencia-Mor, ³Eduardo Aguilera-Gómez, ⁴Julet Marcela Méndez-Hernández, ⁵Juan Francisco Reveles-Arredondo

Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Salamanca, Guanajuato, ¹je.benitezprada@ugto.mx; ²hplascencia@ugto.mx; ³eag@ugto.mx; ⁴jm.mendezhernandez@ugto.mx; ⁵fco.reveles@ugto.mx/C.P. 36885, México.

Recibido: 01 de noviembre 2022. Aceptado : 13 de diciembre 2022

Resumen—Se presenta una revisión del estado del arte del autoensamblaje en escala macroscópica, abarcando diez años, de 2012 a 2022. El estudio inicia mencionando su descubrimiento, definición, características fundamentales, y los dos tipos principales de autoensamblaje. En seguida se plantea la oportunidad de implementar el proceso de ensamblaje autónomo como alternativa de construcción en la escala macroscópica, especialmente en la ingeniería. De modo complementario, se exponen las ventajas del autoensamblaje en escala macroscópica y los desafíos respecto a su implementación física y virtual. Finalmente, se citan investigaciones relevantes para terminar mencionando las oportunidades de trabajo futuro y conclusiones acerca del autoensamblaje.

Palabras clave—Autoensamblaje, ensamblaje, construcción, autónomo, macroscópica, ingeniería.

Abstract—We present a review of the state of the art of self-assembly on a macroscopic scale, covering ten years, from 2012 to 2022. The study begins by mentioning its discovery, definition, fundamental characteristics, and the two main types of self-assembly. Next, we propose the opportunity to implement the autonomous assembly process as a construction alternative on the macroscopic scale, especially in engineering. In a complementary way, we expose the advantages of self-assembly on a macroscopic scale and the challenges regarding its physical and virtual implementation. Finally, we cite relevant research to finish mentioning the opportunities for future work and conclusions about self-assembly.

Keywords—Self-assembly, assembly, construction, autonomous, macroscopic, engineering.

1. Introducción

Al observar la naturaleza se pueden evidenciar sistemas con características únicas (por ejemplo, auto organización, auto reparación y auto reproducción), tanto en sistemas inorgánicos como en sistemas orgánicos (Bhalla, Bentley, et al., 2014; Bhalla & Bentley, 2012). Durante años

las características encontradas en la naturaleza han servido de inspiración a científicos e investigadores de diferentes áreas disciplinarias en el desarrollo de nuevas tecnologías, productos y procesos.

La auto organización se descubre a partir de la observación de diversos procesos existentes en la naturaleza

donde prevalece la construcción de formas, patrones y estructuras complejas de manera autónoma en función de partes individuales con características especiales, como puede verse en la Fig.1. Entre los diversos procesos podemos encontrar: la formación de cristales moleculares, el plegamiento de cadenas polipeptídicas en proteínas, el plegamiento de proteínas en sus formas funcionales, la organización espontánea de las células en tejidos, la organización de bacterias en colonias, e incluso a mayor escala, la formación de enjambres (como bandadas de pájaros o cardúmenes de peces), la formación de patrones climáticos, la formación de características geológicas y planetas completos (Abelmann et al., 2020; Bhalla, Bentley, et al., 2014; Bhalla, Ipparathi, et al., 2014; Hageman et al., 2018; Nakajima et al., 2012; Papadopoulou et al., 2017; Rubenstein et al., 2014; Tibbits, 2017). Las observaciones de los ejemplos mencionados anteriormente, dan evidencia de la existencia de un proceso de construcción autónoma que abarca desde la escala molecular (1×10^{-10} m) hasta la escala de nivel macroscópico (0.01 m en adelante) (Hacohen et al., 2015; Hafez et al., 2021; Haghighat et al., 2016; Martin Jílek et al., 2020; Rubenstein et al., 2014; Tibbits, 2017; Vandewalle et al., 2020). A nivel científico la auto organización con fines de construcción es mejor conocida como autoensamblaje.



Fig. 1. Procesos de auto organización existentes en la naturaleza. **Fuente:** Adaptada de pixabay.

Inicialmente, es importante comprender qué es y cómo funciona el autoensamblaje. El autoensamblaje se puede definir como un proceso de construcción de abajo hacia arriba (Liu et al., 2022) (las partes simples tienen codificada a detalle la información que da lugar al sistema o estructura de mayor complejidad), con la capacidad de organizar partes individuales de manera autónoma en patrones o estructuras con un grado de orden notable. La organización ocurre debido a interacciones locales (atracción o repulsión), gobernadas por las características propias de cada una de las partes, en ningún caso se genera por una fuerza externa aplicada de manera individual (Bhalla, Ipparathi, et al., 2014; Hageman et al., 2018; Kimura et al., 2018; Masumori & Tanaka, 2013; Rubenstein et al., 2014). Los movimientos de las partes individuales ocurren de manera aleatoria y son posibles gracias a las perturbaciones

del medio en el cual se lleva a cabo el autoensamblaje. Las perturbaciones propician un ambiente altamente energético en el cual las partes individuales compiten por medio de sus interacciones locales en busca de un equilibrio o un estado de mínima energía libre global. En el trayecto, existen normalmente multitud de estados intermedios de mínima energía libre local e incluso estados degenerados globales. Para considerar un proceso como autoensamblaje, las partes individuales que se van agrupando, necesariamente deben poseer la capacidad de salir de los estados intermedios o degenerados, esta propiedad es conocida como reversibilidad. La reversibilidad permite que el autoensamblaje sea adaptable y capaz de corregir errores, permitiendo a los patrones o estructuras construidas reconfigurarse con el objetivo de alcanzar el grado de orden o funcionalidad esperado (Hafez et al., 2021; Hageman et al., 2018; Ipparathi et al., 2017; Metzmacher et al., 2017). De manera idealizada, al final del autoensamblaje, únicamente se deben observar partes complementarias unidas por sí solas, formando un patrón o estructura final, debido a la adecuada sincronización de los siguientes factores: 1) partes diseñadas o programadas, 2) entorno de ensamblaje compatible, 3) fuerza o energía de activación, 4) fuerza de unión o interacción y 5) reversibilidad y corrección de errores (Bhalla, Bentley, et al., 2014; Hafez et al., 2021; Haghighat et al., 2016; Liu et al., 2022; Löthman et al., 2020; Papadopoulou et al., 2017; Tibbits, 2012a). La Fig.2(a)-(d) muestra una representación esquemática del autoensamblaje.

En términos de la conservación de la estructura final se pueden identificar principalmente dos clases de autoensamblaje, estático y dinámico. El autoensamblaje estático consiste en alcanzar un patrón o estructura final mediante el equilibrio energético, conservando el ensamblaje aún finalizado el proceso. Por otra parte, en el autoensamblaje dinámico, el patrón o estructura final solo existe mientras que el proceso persiste y el sistema permanece disipando energía, es decir, no está en equilibrio. En términos generales, el autoensamblaje estático produce patrones o estructuras fijas y el autoensamblaje dinámico produce patrones o estructuras en constante cambio y dependencia energética (Bhalla & Bentley, 2012; Hafez et al., 2021; Haghighat et al., 2016; Nakajima et al., 2012; Papadopoulou et al., 2017).

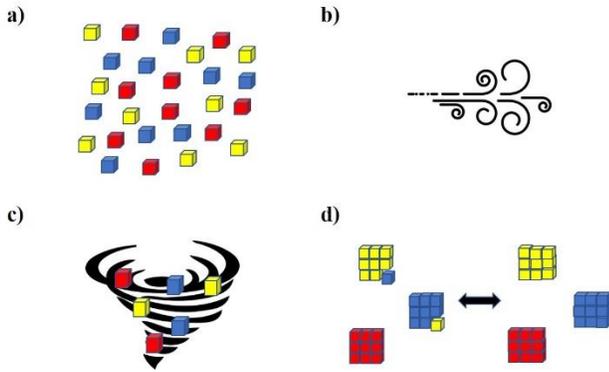


Fig. 2. Representación esquemática del autoensamblaje. (a) Partes diseñadas o programas. (b) Entorno. (c) Energía de activación. (d) Fuerza de unión y reversibilidad. **Fuente:** Autor.

Los procesos de construcción generalmente utilizados durante años en la ingeniería ocurren de arriba hacia abajo (se conceptualiza primero el sistema como un todo y posteriormente, basados en la información de la estructura de mayor complejidad, se piensa a detalle el cómo construir y ensamblar las partes simples que lo van a componer), debido a esto son altamente ineficientes (Ipparthy et al., 2017; Mitsui et al., 2014; Tibbits, 2012a). Se percibe una constante lucha en la manufactura, para lograr que las materias primas alcancen ciertas características y propiedades que permiten su posterior ensamblaje. El ensamblaje de estructuras complejas y funcionales requieren demasiadas operaciones de montaje mediante múltiples etapas. Como puede verse en la Fig.3, la manufactura y ensamblaje demandan gran cantidad de recursos, información, personal, tiempo y energía, sin garantía en la obtención de estructuras o máquinas sin errores (Hacohen et al., 2015; Tibbits, 2017).



Fig. 3. Método de diseño, manufactura y ensamblaje utilizado durante años.

Fuente: Adaptada de pixabay.

Aún más preocupante, debido a la presencia de limitaciones de todo tipo, impuestas por nuestro mundo físico,

se hace notoria una dificultad para continuar construyendo mediante los procesos ya conocidos. De hecho, en términos generales ya existen sistemas que son imposibles de construirse físicamente, incluso mediante las técnicas más sofisticadas. Podemos mencionar las dificultades existentes en el desarrollo de una gama amplia de dispositivos microelectrónicos y microelectromecánicos tridimensionales, por ejemplo, el desarrollo de dispositivos microelectrónicos se observa limitado a dispositivos bidimensionales construidos en base a procesos de construcción como la fotolitografía. Existe también limitantes en el campo de la robótica debido a la tendencia de miniaturización de los componentes. Es una tarea difícil y costosa generar una correcta manipulación de partes de tamaño reducido. De igual manera, en el área de la robótica de enjambre se convierte en una tarea compleja el diseño de componentes funcionales y rentables, con el objetivo de ejecutar tareas mediante la interacción de un número elevado de robots. Por otra parte, en la construcción de rascacielos de mayor altura y arquitecturas complejas se encuentran grandes problemas para el adecuado ensamblaje de componentes, debido a la complejidad de operaciones que requieren ser ejecutadas mediante una gran variedad de equipos y máquinas, las cuales se enfrentan al reto de construir en entornos desfavorables, como alturas elevadas, profundidades marítimas e incluso el espacio. De igual manera, el construir dichos equipos y máquinas basados en requerimientos con mayores exigencias y tamaños es tremendamente complejo y costoso a nivel industrial, paradójicamente requiere igualmente de equipos y máquinas de mayor complejidad. Realmente podemos considerar que la manera en la cual hemos logrado construir las cosas que nos rodean, se observa cada vez más limitada, incluso por una creciente disminución de las materias primas necesarias para la construcción de muchos sistemas, con baja probabilidad de ajustarse adecuadamente al entorno de manera sostenible y seguir evolucionando en la construcción de sistemas en cualquier magnitud (Mitsui et al., 2014; Tibbits, 2017, 2012b).

Desde el punto de vista de la ingeniería, el objetivo principal de investigar el autoensamblaje, debe ser reproducir el proceso de manera artificial (autoensamblaje construido por el hombre), e implementar su potencial en diversas aplicaciones, disciplinas y sistemas (Hafez et al., 2021; Okuyama et al., 2020). El autoensamblaje posee características únicas en comparación con los procesos de construcción utilizados durante años. Podemos mencionar que el proceso es inherentemente paralelo, adaptable, escalable, programable, rentable, preciso y robusto (Bhalla, Ipparthy, et al., 2014; M Jílek et al., 2021; Martin Jílek et al., 2020; Masumori & Tanaka, 2013; Mitsui et al., 2014). Debido a estas características, el autoensamblaje artificial es visto como el principal proceso candidato a reinventar la construcción, semejante, a la manera en que la naturaleza construye en todas las escalas. Adicionalmente, la industria debe comprometerse a adoptar alternativas de construcción cada vez más sostenible, siendo la implementación generalizada del autoensamblaje

artificial una gran oportunidad de alcanzar incluso este objetivo complementario, a pesar, que esto plantea superar importantes desafíos (Hacohen et al., 2015; Hageman et al., 2018; Masumori & Tanaka, 2013; Metzmacher et al., 2017; Niu et al., 2019; Rubenstein et al., 2014; Tibbits, 2012a).

2. Presentación

Sin lugar a duda la mayor inspiración para desarrollar el autoensamblaje artificial en escala macroscópica, visto como una alternativa para el futuro de la construcción, se encuentra en los sistemas biológicos a pequeña escala. Estos sistemas construyen con mayor complejidad, capacidad de información e instrucciones de ensamblaje que las estructuras más avanzadas posibles con las tecnologías actuales (Tibbits, 2012a). A pesar de esto, se ha descubierto que no todos los principios conocidos para el autoensamblaje en pequeñas escalas son fáciles de replicar en la escala macroscópica (Martin Jílek et al., 2020). Existe un simulador de autoensamblaje microscópico, construido en escala macroscópica. El simulador permitió comprobar cierto grado de discrepancia existente entre la escala macroscópica y microscópica (Hageman et al., 2018; Löthman et al., 2020). En cierta medida las diferencias ocurren por características propias de cada escala. Los sistemas de menor escala son agitados significativamente solo mediante energía térmica. A medida que incrementa la escala, los movimientos térmicos se hacen menos dominantes y solo es posible alcanzar agitación mediante la introducción de energía externa de considerable magnitud al sistema. Esto se debe a la necesidad de vencer los efectos que causan la fricción y la gravedad sobre las partes individuales en la escala macroscópica. Las implicaciones adicionales que deben considerarse al momento de implementar autoensamblaje en escala macroscópica, pueden ser la razón de una mayor concentración de investigación en menores escalas.

Existe extensa investigación y aplicación práctica del autoensamblaje artificial en la escala nanométrica (longitudes inferiores a 1×10^{-7} m), en donde el método de construcción de arriba hacia abajo, se ve limitado por la falta de herramientas o máquinas capaces de manipular partes con longitudes cada vez más pequeñas y las características de agitación pueden considerarse de transición entre la escala microscópica y la macroscópica. El autoensamblaje, es considerado prácticamente el único camino hacia la verdadera nanotecnología, como un proceso de abajo hacia arriba. El autoensamblaje artificial en escala macroscópica, apenas se empieza a considerar y requiere mayor investigación para su aplicación práctica de manera masiva (M Jílek et al., 2021; Tibbits, 2017).

Al abordar la escala de autoensamblaje macroscópica, existen múltiples ventajas en comparación con las escalas más pequeñas. Entre las ventajas del autoensamblaje artificial en escala macroscópica con respecto a otras escalas, se

encuentran: la posibilidad de observar a simple vista tanto las partes como el proceso en tiempo real. Esto proporciona un rastreo continuo de las partes individuales, su dinámica, sus interacciones, la evolución del autoensamblaje, la ocurrencia de enlaces correctos y erróneos mediante herramientas de observación simples. Como resultado se obtiene mayor información del proceso y no únicamente acerca de la estructura final del autoensamblaje, como puede verse en la Fig.4(a)-(f) (Abelmann et al., 2020; Martin Jílek et al., 2020; Löthman et al., 2020; Nakajima et al., 2012). En relación a las partes individuales, la escala macroscópica ofrece mayor flexibilidad en el diseño, a través de la geometría, textura, tamaño, masa, peso y polaridad. Como resultado se generan partes más inteligentes, capaces de dirigir el autoensamblaje de abajo hacia arriba mediante información codificada directamente (Bhalla, Ipparhi, et al., 2014; Bhalla & Bentley, 2012; Papadopoulou et al., 2017; Tibbits, 2012a). Adicionalmente, se puede utilizar mayor variedad de fuentes de energía: calor, gravedad, viento, agitación mecánica o turbulencia, pre y post tensión o compresión, campos magnéticos, entre otras oportunidades (Hafez et al., 2021; Papadopoulou et al., 2017; Tibbits, 2012a; Vandewalle et al., 2020). De la misma manera, existe gran variedad de fuerzas de interacción entre las partes individuales: fuerzas magnéticas, superficies adhesivas, fuerzas capilares, geometría entrelazada y superficies hidrofílicas e hidrofóbicas (Abelmann et al., 2020; Hacohen et al., 2015; Hafez et al., 2021; Kimura et al., 2018; Liu et al., 2022; Okuyama et al., 2020; Papadopoulou et al., 2017; Vandewalle et al., 2020). Finalmente, Existe mayor posibilidad de desarrollar algoritmos en entornos computacionales dedicados al seguimiento, modelado, retroalimentación, programación y control en el autoensamblaje en escala macroscópica (Bhalla, Bentley, et al., 2014; Haghighat et al., 2016). Todo lo anteriormente mencionado, brinda acceso a tipos de funcionalidad sin precedentes, al igual que brinda mejores oportunidades de comprender y optimizar el proceso de autoensamblaje con respecto a sistemas moleculares y a escala nanométrica (Bhalla, Ipparhi, et al., 2014; Bhalla & Bentley, 2012).

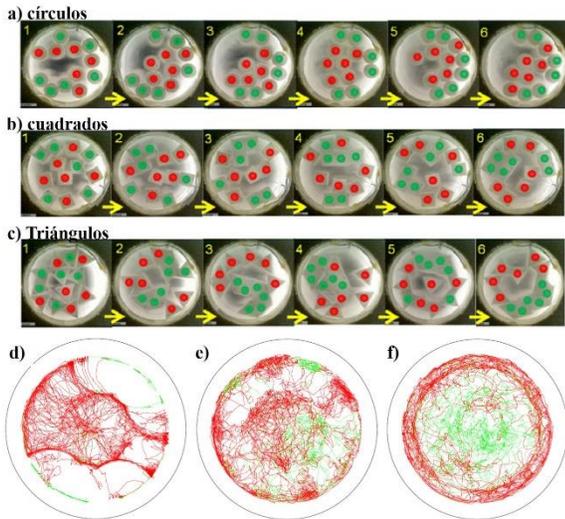


Fig. 4. Comportamiento típico de elementos en los casos circular, cuadrado y triangular. (a)-(c) Se muestran observaciones en diferentes tiempos. Trayectorias típicas del centro de los elementos en el contenedor. (d) Forma circular (e) Forma cuadrada (f) Forma triangular. **Fuente:** Adaptada de “Morphology-Induced Collective Behaviors: Dynamic Pattern Formation in Water-Floating Elements” (p. 3-4), Nakajima, K., Ngouabeu, A. M. T., Miyashita, S., Göldi, M., Füchslin, R. M., & Pfeifer, R., 2012, PLOS ONE, 7(6).

Por otra parte, se debe considerar la aparición de grandes desafíos. Algunos de los más relevantes son: la fabricación de las partes individuales con mayor precisión, complejidad e inteligencia (Bhalla & Bentley, 2012). El comprender qué gama de estructuras son posibles, limitados por problemas de inestabilidad mecánica, los cuales empeoran a medida que los ensamblajes se hacen más grandes (M Jílek et al., 2022). Para aprovechar el paralelismo inherente del proceso, lo ideal es evitar o reducir las subestructuras incompatibles (Bhalla, Ipparhi, et al., 2014; Ipparhi et al., 2017). Cuando se construye una estructura objetivo única, a partir de una copia de cada parte individual, es imposible tener partes acopladas fuera de la estructura objetivo, formando subestructuras. La Fig. 5 muestra subestructuras conocidas como incompatibles, que ocurren únicamente al construir múltiples estructuras al mismo tiempo con varias copias de las partes individuales.

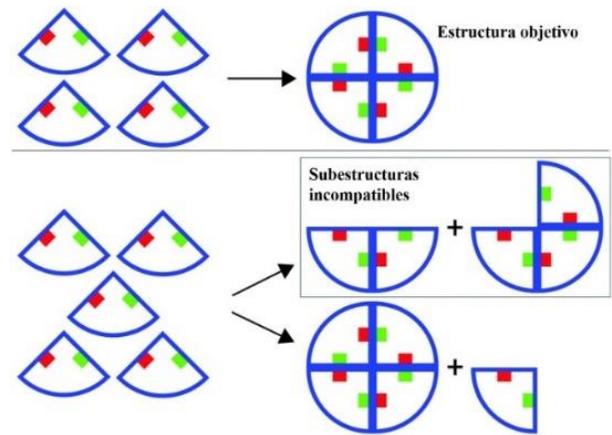


Fig. 5. Problema de las subestructuras incompatibles en el autoensamblaje paralelo. **Fuente:** Adaptada de “Yield prediction in parallel homogeneous assembly” (p. 7596), Ipparhi, D., Winslow, A., Sitti, M., Dorigo, M., & Mastrangeli, M., 2017, Soft Matter, 13(41).

También es necesario asegurar la secuencia de ensamblaje y garantizar que partes internas se ensamblen antes que las externas (Hacohen et al., 2015). Igualmente, es importante garantizar la especificidad del ensamblaje para garantizar el correcto posicionamiento de las partes en la estructura objetivo (Kimura et al., 2018; Okuyama et al., 2020). Finalmente, el rendimiento del autoensamblaje es difícil de lograr al 100%, debido a la característica estocástica del proceso (Kimura et al., 2018; Okuyama et al., 2020).

Varios de los desafíos del autoensamblaje en escala macroscópica, se han simplificado enormemente al implementarlo en una o dos dimensiones espaciales (Grünwald et al., 2016; O’Hara et al., 2014; Poty et al., 2014). El realizar autoensamblaje en tres dimensiones implica la complejidad de infinitos grados de libertad. Las partes individuales deben ser capaces de unirse desde todos los ángulos, orientaciones y velocidades posibles, alcanzando la configuración correcta (Hacohen et al., 2015). Por último, el deseo de crear estructuras cada vez más complejas y con mayor funcionalidad, mediante autoensamblaje, no es para nada una tarea fácil de lograr (Metzmacher et al., 2017).

A escala macroscópica se han desarrollado un número considerable de sistemas físicos, incluso a partir de partes con características muy simples. Los resultados de autonomía y funcionalidad son prominentes. En 1957, Penrose y Penrose, demostraron que era posible imitar características biológicas en la escala macroscópica (Tibbits, 2017). A partir de bloques de madera no electrónicos, diseñados geoméricamente con una forma A y B, lograron replicar la característica de auto reproducción. El sistema construido era bastante simple y utilizaba únicamente agitación mecánica en una pista restringida, como puede verse en la Fig. 6.

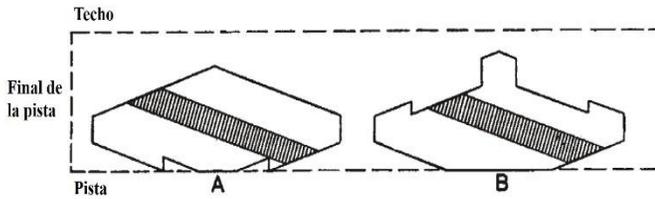


Fig. 6. Sistema macroscópico de auto reproducción. Elementos A y B en posición neutral. **Fuente:** Adaptada de “A Self-reproducing Analogue” (p. 1183), Penrose, L.S., Penrose, R., 1957, Nature, 179.

Dos experimentos fueron conducidos, el primero agregaba un par de piezas A y B unidas. La Fig. 7(a) muestra el complejo AB resultante al interior de la pista, el segundo agregaba el mismo par de piezas, pero unidas en el complejo BA, como puede verse en la Fig. 7(b).

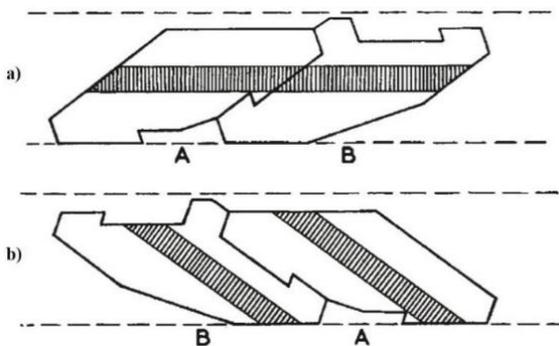


Fig. 7. Elementos A y B unidos. (a) Complejo AB. (b) Complejo BA. **Fuente:** Adaptada de “A Self-reproducing Analogue” (p. 1183), Penrose, L.S., Penrose, R., 1957, Nature, 179.

En ambos casos, fueron agregadas piezas A y B sin unión de manera aleatoria a lo largo de la pista junto con los complejos mencionados anteriormente. Se demostró que, dependiendo del complejo agregado, las piezas sin unión reproducían el conjunto inicial. La tabla 1., muestra las disposiciones experimentales y los resultados obtenidos.

Tabla 1. Análogo de auto reproducción no biológico.

Disposición experimental	Resultado
Disposición neutral	A/B/B/A/B/A/A/B/A/B/B
Experimento 1	AB...AB/B/AB/A/A/AB/AB/B
Experimento 2	BA...A/B/BA/BA/A/A/BA/B/B

Fuente: Adaptada de “A Self-reproducing Analogue” (p. 1183), Penrose, L.S., Penrose, R., 1957, Nature, 179.

El análogo no biológico de auto reproducción se considera un punto de partida en la construcción de modelos de autoensamblaje en la escala macroscópica, inspirando a la

construcción de modelos más complejos a partir de propiedades básicas similares.

A continuación, se exponen algunas implementaciones físicas y computacionales con evidencia de una correcta sincronización entre el diseño de las partes individuales, los rangos de las fuerzas de interacción, la adecuada configuración de la energía suministrada, el entorno y la posibilidad de corrección de errores en la creación de una variedad interesante de estructuras.

Los diferentes estudios desarrollados en el laboratorio de autoensamblaje del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), demuestran exitosos avances encaminados al desarrollo del autoensamblaje en escala macroscópica. En (Tibbits, 2012a), podemos distinguir una clara visión hacia el futuro de la construcción basados en la programación física. Se nos presentan, los ingredientes necesarios para desarrollar el autoensamblaje y su implementación física a través de varios proyectos desarrollados. Los proyectos Macrobot y Decibot demuestran que, para alcanzar un autoensamblaje, debemos implementar pasos de ensamblaje simples. En este proyecto específico, elaborar instrucciones simples, mediante secuencia de ángulos de plegado, permitió reconfigurar cadenas robóticas a gran escala sin importar la longitud de la cadena, alcanzando geometrías 1D, 2D o 3D.

Por otra parte, el proyecto Logic Matter mostró el diseño de partes individuales (módulos lógicos digitales mecánicos pasivos), con información codificada embebida que permitió guiar varios ensamblajes. El prototipo físico es capaz de generar ensamblaje autoguiado pasivo, mediante la implementación de una compuerta lógica digital NAND (Not-And) en un componente físico programado. El proyecto demostró características de corrección de errores y redundancia. El sistema calculó la salida o siguiente posición de cada parte individual con respecto a dos entradas previas, demostrando que la redundancia de una unidad permite descartar errores y promueve menor cantidad de fallos inesperados en la estructura objetivo.

El desarrollo de autoensamblaje, necesita energía de activación para transformar una estructura entre dos estados diferentes. Se demostró mediante el proyecto Biased Chains, un sistema pasivo capaz de plegarse de estructuras 1D a 3D. El sistema era previamente ensamblado mediante secuencia simple de unidades en una estructura 1D. Agitación manual, generaba la suficiente energía para promover el movimiento aleatorio de cada una de las partes hacia una orientación específica que construía una estructura 3D. La energía de activación utilizada se considera energía pasiva. Es necesario repensar los tipos de energías capaces de generar la transformación o construcción de nuestras estructuras. El objetivo final, en cuanto a energía, es el desarrollo de sistemas que consuman muy poca o incluso no la consuman, avanzando hacia sistemas sostenibles o incluso productores de energía.

En (Tibbits, 2012b) se implementó una instalación capaz de ejecutar autoensamblaje a escala macroscópica encargada para la conferencia TED de 2012. El proyecto incluyó un contenedor con dimensiones aproximadas de 3x3x4.5 m con la capacidad de girar alrededor de un solo eje impulsado por rotación externa de diferentes usuarios. Dentro del contenedor se ubicaron componentes autónomos que caían estocásticamente para ensamblarse en una estructura deseada determinista con diseño de dodecaedro del tamaño de un mueble. Este proyecto ofrece una visión futurista del aprovechamiento del autoensamblaje a escala macroscópica en procesos de construcción y demuestra la adecuada implementación de ingredientes necesarios como: geometría, atracción de partes individuales y energía externa.

En (Papadopoulou et al., 2017) se estudió la organización autónoma dinámica a gran escala de unidades llenas de helio. Los globos meteorológicos de tamaño aproximado de 0.9m se soltaron en el patio de un edificio de cuatro pisos, flotando caóticamente impulsados por ventiladores en el suelo. Surgieron varias estructuras, tales como, cubos, vigas y estructuras de celosía. Se demuestra la construcción autónoma a gran escala y la codificación directamente en componentes materiales sin necesidad de ingreso de comandos por computadora o electrónica integrada. Su investigación doctoral hace parte de múltiples estudios de casos que proponen procesos autónomos y evolutivos de construcción.

Adicionalmente, es importante mencionar, el proyecto BioMolecular Self-Assembly (Self-Assembly Lab, MIT, 2012), desarrollado en colaboración con el biólogo molecular Arthur J Olson. Mediante componentes con geometrías basadas en diferentes estructuras moleculares, era posible agitar manualmente vasos de precipitados que contenían una sola estructura objetivo y observar la correcta formación mediante autoensamblaje de manera completa y precisa. El proyecto Fluid Lattices (Self-Assembly Lab, MIT, 2014), estudió la influencia de un entorno (agua) no controlado para la formación de diferentes estructuras (crecimiento cristalino en escala macroscópica), a partir de módulos independientes con interacciones débiles y patrones de energía variados. Se observaron múltiples estructuras auto organizadas basadas en la dinámica del sistema. Self-Assembly Chair (Self-Assembly Lab, MIT, 2014) fue otro proyecto en entornos fluidos, que exploró la creación de estructuras específicas en contraposición al crecimiento emergente de cristales macroscópicos. Se autoensambló una silla a partir de partes únicas con ubicaciones precisas dentro de la estructura. El proceso duró aproximadamente siete horas y demostró el montaje alternativo para la fabricación de una estructura deseada con un grado de complejidad considerable. Otro enfoque del laboratorio de autoensamblaje del MIT, es explorar procesos biológicos mediante componentes no biológicos, sin el uso de robótica, en escala macroscópica.

Self-Replicating Spheres (Self-Assembly Lab, MIT) demostró simular procesos biológicos como el crecimiento, encapsulado y división, mediante componentes macroscópicos esféricos huecos con interacciones magnéticas ubicados sobre una mesa oscilante. De igual manera, Aerial Fan Assembly (Self-Assembly Lab, MIT, 2016), mostró estructuras con crecimiento sustancial y capacidad de volar que sobrevivían con respecto a estructuras que terminaban colapsando por crecimiento desmedido y posterior carencia de la capacidad de volar. Se demostró una característica biológica de evolución mediante criterios de aptitud ambiental en entornos aéreos al tiempo que un simulador de diseño y ensamblaje a escala macroscópica.

Dejando de lado los estudios desarrollados por el laboratorio de autoensamblaje del MIT, también se exhiben grandiosos avances y aplicaciones del autoensamblaje a escala macroscópica, en las siguientes investigaciones.

En (O'Hara et al., 2014) el enfoque de la investigación está en la aplicación del autoensamblaje de embarcaciones autónomas para generar estructuras marítimas como pistas de aterrizaje, puentes, puertos o bases marítimas. Se observa una unión importante de características de software y hardware para la realización de autoensamblaje programado. Se resaltan la implementación en aplicaciones a gran escala y el detalle en generar un sistema altamente robusto.

En (Hacohen et al., 2015) programaron el autoensamblaje de objetos tridimensionales asimétricos con una alta complejidad de diseño en la escala macroscópica. Su codificando de reglas de montaje fue mediante señales topográficas impresas en los componentes con diseño de ladrillos tetraédricos, inspirado en el mallado por defecto de objetos arbitrarios, como puede verse en la Fig. 8(a)-(e). Para la atracción entre los componentes se emplearon imanes incrustados, los cuales permitían la unión de los componentes que eran agitados dentro de un recipiente cerrado. Esta investigación demostró alto rendimiento y cero errores en las estructuras deseadas, incluyendo la caracterización de la dinámica del proceso mediante análisis de video y audio.

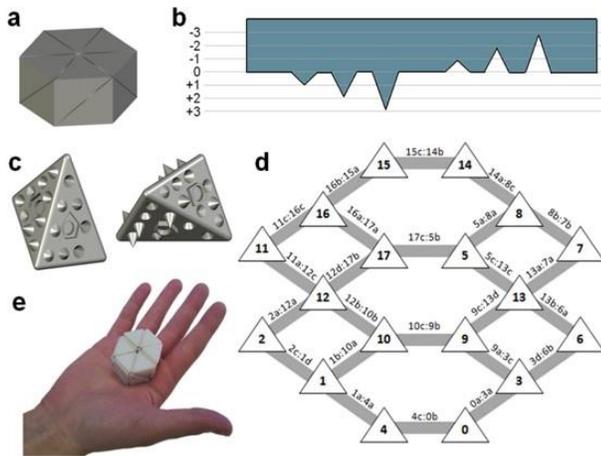


Fig. 8. Diseño y fabricación de objetos y ladrillos. (a) Prototipo de la estructura objetivo. (b) Representación de las alturas topográficas (c) Un ladrillo tetraédrico (número 13) desde 2 vistas diferentes. (d) Un gráfico que describe el objeto completo compuesto por sus ladrillos de construcción. (e) El objeto final impreso y ensamblado. **Fuente:** Tomada de “Meshing complex macro-scale objects into self-assembling bricks” (p. 3), Hacohen, A., Hanniel, I., Nikulshin, Y., Wolfus, S., Abu-Horowitz, A., & Bachelet, I., 2015, Scientific Reports, 5(1).

En (Haghighat et al., 2016) estudiaron y emplearon el autoensamblaje como metodología general para lograr la coordinación temporal y espacial de módulos constitutivos individuales, abordando aspectos de diseño, modelado y control. En su investigación presentaron tres estudios. El primero de ellos ocurría en un tanque de agua equipado con un sistema de control centralizado de caudales para bombas instaladas periféricamente. Ahí, los módulos flotantes que alcanzan los centímetros en sus dimensiones, con enclavamiento magnético, no dotados de ningún tipo de control activo, se llamaron módulos Lily pasivos. Estos módulos fueron monitoreados visualmente para seguir sus trayectorias y utilizar la información recopilada como control de agitación necesaria en la generación de estructuras deseadas. Se comprobaron la validez del diseño y las interacciones planteadas para una eficiente realización del autoensamblaje. El segundo estudio reprodujo en gran medida el primero, pero a una escala física mucho menor, logrando el autoensamblaje controlado de micropartículas de $200 \mu m$. El tercer estudio extiende la complejidad de los módulos Lily pasivos empleados en el primer estudio, convirtiéndolos en módulos activos, lo cual genera un control distribuido del proceso, representado en un conjunto de reglas sintetizadas de manera individual en los módulos Lily activos. Se puede afirmar que con su último estudio progresaron a un autoensamblaje de manera programable, muy interesante desde el punto de vista de la robótica de enjambre.

Otros estudios que involucran partes individuales activas, entendidas como partes capaces de influir de manera configurable en la construcción de alguna estructura objetivo mediante autoensamblaje, se enfocan en las propiedades de los materiales capaces de cambiar la forma de los componentes a través del tiempo, generalmente mediante estímulos ocasionados por el medio.

En (Metzmacher et al., 2017) se logró autoensamblaje debido a fuerzas capilares, la idea principal es inducir curvaturas locales de una interfaz líquido-aire mediante la forma de los componentes. Esto a su vez genera interacciones capilares capaces de generar atracción y repulsión entre las partes individuales. Existen varios estudios al respecto y evidencia de su aplicación en autoensamblaje. Sin embargo, lo novedoso al fabricar las partes individuales de vinil polisiloxano líquido con módulo de Young bajo ($Y \approx 1 \text{ MPa}$), es permitir modificar activamente la curvatura de los componentes, alternando entre interacciones capilares multipolares en función de la activación de un campo magnético externo. Esta investigación demuestra una alternativa de programación del autoensamblaje altamente reversible.

De manera similar, en (Vandewalle et al., 2020), se emplean polímeros con memoria de forma como material de fabricación de las partes individuales. Esta clase de material es capaz de reaccionar cambiando la forma de los componentes mediante la variación de la temperatura del líquido en el cual se realiza el autoensamblaje, como puede verse en la Fig. 9(a)-(d). Igualmente ocasionando interacciones capilares multipolares, capaces de ensamblar y desensamblar estructuras en múltiples configuraciones. Cada rombo tiene una longitud de arista de 1 cm, dando una escala a los dibujos, $T_m = 60^\circ \text{C}$.

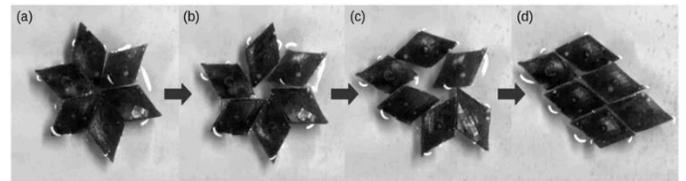


Fig. 9. Experimento de reconfiguración de un autoensamblaje. (a) configuración rómbica similar a una flor en $T < T_m$. (b y c) la temperatura del líquido alcanza T_m . (d) estructura isoédrica estable final en $T > T_m$. **Fuente:** Tomada de “Switchable self-assembled capillary structures” (p. 10324), Vandewalle, N., Poty, M., Vanesse, N., Caprasse, J., Defize, T., & Jérôme, C., 2020, Soft Matter, 16(45).

Existen muchísimos estudios enfocados al desarrollo del autoensamblaje, todos han aportado grandiosos descubrimientos y posibles mejoras para su implementación generalizada. Es una tarea difícil recopilarlos y mencionarlos todos, y es evidente que algunos fuera de las referencias de esta revisión seguramente sean de gran relevancia. En la escala

macroscópica el potencial del autoensamblaje es innegable y actualmente sigue siendo parte de los grandes retos a resolver. Evidencia de ello, estudios tan actuales como (Hafez et al., 2021; M Jílek et al., 2021, 2022; Liu et al., 2022).

2.1. Metodología de la selección del estado del arte

Se realizó una revisión sistemática de la literatura basada en las revisiones y artículos disponibles en las siguientes bases de datos: Web of Science, Wiley Online Library, CumInCAD, ResearchGate, SpringerLink, IEEE Xplore, ELSEVIER y Science. Fueron seleccionados estudios que comprenden un periodo de tiempo de 2012 a 2022, utilizando palabras clave pertinentes al autoensamblaje, específicamente en la escala macroscópica. Los estudios debían abordar el tema considerando al autoensamblaje como un proceso alternativo para la construcción de sistemas complejos en general. Se revisaron el título y el resumen de todos los resultados buscados, y los estudios elegibles potenciales recibieron una revisión del texto completo. Además, la lista de referencias de todas las revisiones encontradas en los resultados de la búsqueda se examinó manualmente en busca de artículos adicionales que coincidieran con los criterios de inclusión.

Los criterios de exclusión fueron la antigüedad, se rechazaron estudios fuera del límite establecido de 10 años. En caso de existir alguna información valiosa que se encuentre fuera de los estudios, se hace mención de los autores reconociendo su importancia, sin referenciar el correspondiente estudio.

2.2. Trabajo pendiente o futuro

Generalmente en la naturaleza el rendimiento del autoensamblaje es extraordinario. Sin embargo, esperar un rendimiento del 100% en los autoensamblajes artificiales, es realmente difícil. Alcanzar el 100% del rendimiento sigue siendo un reto en los autoensamblajes artificiales, debido principalmente a su característica estocástica. Es necesario identificar qué porcentaje es apropiado en cuanto a rendimiento, principalmente con el objetivo de lograr su implementación generalizada y aprovechar su característica de construcción en paralelo.

En relación al paralelismo inherente del autoensamblaje es necesario evitar la formación de subestructuras incompatibles o subestructuras atrapadas en estados intermedios de minimización de la energía. Las subestructuras incompatibles no permiten alcanzar las estructuras objetivo, a su vez afectan el rendimiento del proceso y ocasionan mayores tiempos de autoensamblaje. Para superar la formación de subestructuras incompatibles, delimitar el espacio de autoensamblaje es una opción a considerar. Esto se refiere a generar muchas estructuras objetivo, pero, una sola estructura a partir del número exacto de partes individuales en cada región delimitada. Otra alternativa, es aprovechar la característica de reversibilidad del

autoensamblaje. Básicamente, diseñar las partes individuales de tal manera que puedan romper sus enlaces incompletos debido, por ejemplo, a gradientes de fuerza de unión que garanticen solo la supervivencia de enlaces correctos de las partes individuales hasta alcanzar la estructura objetivo que no pueda colapsar.

La importancia de la morfología de las partes individuales en el autoensamblaje, incluso como alternativas de solución al rendimiento y al paralelismo del proceso, está altamente comprobada. Inicialmente, el enfoque con respecto a la morfología fue implementar autoensamblaje con diferentes formas geométricas (cuadrados, triángulos, círculos, cuboides, prismas, esferas, entre otros) y reconocer que su comportamiento de auto organización cambiaba dependiendo de la morfología de las partes. Estos estudios se enfocaban más en el proceso que en la estructura objetivo lograda. Posteriormente, la investigación se centró en la construcción de estructuras objetivo definidas, esto generó un problema de mayor complejidad. El desafío está en identificar la manera correcta de discretizar la estructura objetivo y calcular las morfologías indicadas para cumplir con su autoensamblaje. A medida que la estructura objetivo crece en complejidad y funcionalidad, las morfologías requieren mayores niveles de precisión, codificación de información y especificidad. La tarea del diseño se vuelve cada vez más detallada y complicada. A futuro, se requiere identificar si existe un punto de equilibrio entre complejidad de construcción y diseño.

La concentración de partes individuales con respecto al entorno de autoensamblaje es un factor importante al momento de promover interacciones. Si el medio en el cual ocurre el autoensamblaje tiene demasiado espacio libre en comparación al espacio ocupado por las partes individuales, generalmente se reduce el número de interacciones y la obtención de una estructura objetivo se dificulta. Por otra parte, exceder el número de parte individuales dentro de un medio demasiado restringido ocasiona poco movimiento entre las partes y debido a esto baja ocurrencia de interacciones. Entonces debe existir una proporción conveniente de concentración de partes individuales en un medio para la adecuada realización de autoensamblaje y es necesario investigar más al respecto.

Es necesario garantizar la secuencia correcta del autoensamblaje. Algunos de los enfoques desarrollados son: la utilización de plantillas guía, la implementación de geometrías de adentro hacia afuera (matrices geométricas al interior de la estructura), la selectividad de unión, la singularidad de forma, diferencias en las eficiencias de unión e incluso agregar de manera manual o automatizada las partes con diferentes intervalos de tiempo, a medida que crece el autoensamblaje. A pesar de todos los avances logrados por dichos enfoques, sigue siendo difícil evitar que partes internas se ensamblen primero que partes externas. Algunas alternativas plantean considerar condiciones ambientales cambiantes en el entorno junto a

componentes programables o capaces de responder de manera diferente a través del tiempo.

La estabilidad mecánica de las estructuras que se obtienen por medio del autoensamblaje necesita ser investigada. Es decir, requerimos también preocuparnos por las estructuras una vez construidas y finalizado el proceso de autoensamblaje. ¿Es posible obtener estructuras capaces de soportar torsión, flexión o cortante?, hasta ahora no se ha realizado este tipo de estudio sobre las estructuras obtenidas posterior al proceso. Únicamente se ha percibido la intención de utilizar aditamentos, tales como, algún tipo de pegamento, posteriores al autoensamblaje para garantizar una unión permanente de la estructura objetivo.

Por otra parte, sí se ha investigado la estabilidad mecánica de las estructuras a medida que crecen en tamaño durante el autoensamblaje. En la mayoría de casos, a medida que crece la estructura, se alcanza cierto límite en donde la estructura se vuelve inestable. Este límite hace imposible generar una estructura de mayor nivel y ocasiona el colapso de la misma al agregar nuevas partes. Una estrategia para contrarrestar la inestabilidad mecánica durante el proceso, involucra la inserción de partes individuales con diferentes características de fuerzas de interacción, que se equilibren mutuamente a medida que crece el autoensamblaje, esto genera la auto estabilización del sistema. Ciertamente, investigar más acerca de la estabilidad mecánica de las estructuras obtenidas durante y posterior al proceso de autoensamblaje, es una ruta prometedora para estructuras de mayor complejidad y funcionalidad.

En el autoensamblaje se implementan conjuntos de reglas simples para desarrollar patrones o estructuras. Se vuelve tedioso definir dichas reglas y garantizar su simplicidad, a medida que la estructura objetivo crece en complejidad. Se considera que existe gran oportunidad en el desarrollo de algoritmos centrados en el autoensamblaje. Estos algoritmos podrían aliviar el planteamiento de las reglas de manera rápida y precisa. Incluso es posible que mediante estos algoritmos se amplíen los conjuntos de reglas hasta ahora implementadas. Otra alternativa es el uso de algoritmos para controlar en tiempo real los niveles de perturbación del sistema. De esta manera es posible optimizar los tiempos de ensamblaje y promover la formación de la estructura deseada. No es difícil imaginar entonces sistemas logrando la capacidad de autoensamblaje y auto desmontaje, es decir, estructuras dinámicas no solo influenciadas por la energía que ingresa o sale del sistema sino por reglas programadas de manera eficiente.

2.3. Discusiones y conclusiones

El autoensamblaje a escala macroscópica, visto como una alternativa de construcción, similar al proceso de estructuración biológica necesita mayor atención por parte de

la industria. Es necesario juntar conocimientos de biología, química, informática, ingeniería, inteligencia artificial, ciencia de los materiales, entre otras disciplinas con el objetivo de alcanzar una verdadera revolución de nuestro mundo físico. Dicha revolución sería observada a través de partes individuales y materiales que integran información, son capaces de adaptarse, interactúan entre ellos y con el entorno, se autoensamblan, se auto reparan e incluso se auto reproducen. Al conseguir partes individuales y procesos de ensamblaje más inteligentes, se pueden alcanzar en paralelo otros objetivos, por ejemplo, aprovechamiento de recursos materiales, baja necesidad de mano de obra, tiempo de trabajo reducido, reducción de espacios ocupados por grandes fábricas, menor utilización de equipos/máquinas y la reducción del alto consumo energético actual. Desde nuestro punto de vista, el consumo energético debe ser tratado con prioridad dentro de todos los procesos de transformación de materia prima y construcción.

Somos conscientes de que la aplicación generalizada del autoensamblaje tomará tiempo, y que probablemente no todas las industrias consideren su implementación. Seguramente, el autoensamblaje en escala macroscópica se abrirá camino poco a poco, inicialmente en entornos extremos, como el espacio. La única manera de acelerar un poco la transición de los mecanismos actuales de construcción es direccionar la investigación hacia estructuras cada vez más complejas en diseño y funcionalidad. Alcanzar estructuras de alto nivel, con capacidades únicas, mediante esta nueva tecnología generará el impacto necesario para su aplicación masiva a nivel industrial. Para lograr este objetivo, es necesario desarrollar metodologías fáciles de replicar con implementaciones físicas asociadas. Esto demostrará la viabilidad y superioridad del autoensamblaje en escala macroscópica con respecto a los procesos actuales. Es decir, la nueva alternativa de construcción debe probar su capacidad en la resolución de problemas y optimización de procesos de una manera más adaptable, escalable y sostenible que los procesos de construcción generalmente utilizados durante años.

Para evolucionar de nuestra forma de construcción actual hasta el autoensamblaje, sobre todo en escala macroscópica, debemos comprender que factores son importantes en la implementación física del proceso. Debemos sincronizar de manera adecuada todos los factores involucrados en un autoensamblaje y replicar la maravillosa manera en que construye la naturaleza. Grandes avances se identifican a lo largo de esta revisión del tema. El diseño de las partes para autoensamblaje, abarca su morfología, sus propiedades físico/químicas y sus mecanismos de activación o ausencia de ellos (partes activas o pasivas). El conjunto de todas las características que involucra el diseño, es generalmente nombrado como información embebida en las partes individuales. Podemos concluir, que existe alto impacto en el diseño de esa información con respecto a la generación

de diferentes patrones o estructuras objetivo, a los caminos de auto organización que siguen las partes y sus interacciones.

De la misma manera, está demostrado que el diseño del entorno, sus propiedades físicas y químicas, su forma de contorno y condiciones ambientales afectan directamente al tipo de patrón o estructura resultante del autoensamblaje. Adicionalmente, existe una relación fuerte de la frecuencia de interacciones entre las partes individuales y el tiempo de autoensamblaje. Generalmente se busca que las perturbaciones generadas en el medio, sean suficientes para generar movimiento y encuentros entre las partes, pero no tan grandes que superen las fuerzas de interacción y no ocurra el autoensamblaje. Existen casos particulares de autoensamblaje en los que no se utiliza ningún tipo de agitación para garantizar el proceso. Sin embargo, se ha comprobado que utilizar agitación aumenta el orden de las estructuras y permite explorar diferentes configuraciones del autoensamblaje, observando la característica de reversibilidad de los sistemas.

El proceso de autoensamblaje reúne partes individuales interactuando en un entorno específico, mediante reglas simples. Un enfoque interesante dentro del estudio del autoensamblaje es la noción del proceso como un cómputo físico. Desde esta perspectiva, se ha comprobado que entornos de simulación permiten estudiar el desarrollo de autoensamblaje en múltiples escenarios, bajo condiciones y restricciones diferentes. Los entornos de simulación han permitido garantizar en cierta medida el éxito y la optimización de sistemas de autoensamblaje antes de realizar una implementación física. Estos entornos han sido traducidos a sistemas físicos de manera exitosa, a pesar de las dificultades que esto conlleva. Los resultados obtenidos físicamente satisfacen las estructuras objetivo planteadas como consecuencia del autoensamblaje y están de acuerdo a lo previsto en las simulaciones.

Se han desarrollado también autoensamblajes programados, esto implica transformar en cierta medida el proceso completamente estocástico a parcialmente aleatorio. Los resultados en esta área son fascinantes y en ningún caso llegan a convertirse en procesos automatizados, ya que la información embebida en las partes sigue dirigiendo el autoensamblaje de manera autónoma y no existe direccionamiento externo preciso en la formación de estructuras objetivo. Generalmente este tipo de autoensamblaje emergente ocupa robots realizando tareas en enjambres o sistemas de control y retroalimentación aplicados sobre el entorno y la energía de activación. En realidad, es posible concluir que la cooperación de conocimiento multidisciplinario nos permitirá alcanzar coalescencia de nuestro mundo digital y físico.

Adicionalmente, podemos concluir que en la escala macroscópica es posible estudiar con mayor detalle y facilidad la dinámica del proceso de autoensamblaje, con respecto a

pequeñas escalas. Esto permite comprender de mejor manera el proceso y el tipo de estructuras que es posible obtener. Esto es factible gracias a una amplia flexibilidad de diseño, entornos, energías de activación y fuerzas de interacción. Finalmente, señalar que incluso un autoensamblaje en escala macroscópica de bajo rendimiento puede ser eficaz frente a los mecanismos de construcción actuales. Esta conclusión puede ser prematura, sin embargo, para un proceso relativamente nuevo, los grandes avances permiten ilusionarse con una alternativa diferente de construcción de manera similar a como observamos que construyen los sistemas biológicos.

2.4. Agradecimientos

Jorge Eliecer Benitez Prada agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) su apoyo para la realización de estudios doctorales, a través de la beca otorgada por medio de la convocatoria Becas Nacional (Tradicional) 2020-2 con número de CVU 766334. Juliet Marcela Méndez Hernández agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) su apoyo para la realización de estudios doctorales, a través de la beca otorgada por medio de la convocatoria Becas Nacional (Tradicional) 2019-2 con número de CVU 791577. Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato división de ingenierías campus Irapuato-Salamanca (DICIS) por el apoyo al posgrado y por la infraestructura proporcionada para la realización de este artículo.

3. Referencias

- Abelmann, L., Hageman, T. A. G., Löthman, P. A., Mastrangeli, M., & Elwenspoek, M. C. (2020). Three-dimensional self-assembly using dipolar interaction. *Science Advances*, 6(19), eaba2007. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2007>
- Bhalla, N., & Bentley, P. J. (2012). *Programming Self-Assembling Systems via Physically Encoded Information BT - Morphogenetic Engineering: Toward Programmable Complex Systems* (R. Doursat, H. Sayama, & O. Michel (eds.)). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33902-8_7
- Bhalla, N., Bentley, P. J., Vize, P. D., & Jacob, C. (2014). Staging the Self-Assembly Process: Inspiration from Biological Development. *Artificial Life*, 20(1), 29–53. https://doi.org/10.1162/ARTL_a_00095
- Bhalla, N., Ipparhi, D., Klemp, E., & Dorigo, M. (2014). *A Geometrical Approach to the Incompatible Substructure Problem in Parallel Self-Assembly BT - Parallel Problem Solving from Nature – PPSN XIII* (T. Bartz-Beielstein, J. Branke, B. Filipič, & J. Smith (eds.); pp. 751–760). Springer International Publishing.

- Grünwald, M., Tricard, S., Whitesides, G. M., & Geissler, P. L. (2016). Exploiting non-equilibrium phase separation for self-assembly. *Soft Matter*, *12*(5), 1517–1524. <https://doi.org/10.1039/C5SM01922B>
- Hacohen, A., Hanniel, I., Nikulshin, Y., Wolfus, S., Abu-Horowitz, A., & Bachelet, I. (2015). Meshing complex macro-scale objects into self-assembling bricks. *Scientific Reports*, *5*(1), 12257. <https://doi.org/10.1038/srep12257>
- Hafez, A., Liu, Q., & Santamarina, J. C. (2021). Self-assembly of millimeter-scale magnetic particles in suspension. *Soft Matter*, *17*(29), 6935–6941. <https://doi.org/10.1039/D1SM00588J>
- Hageman, T., Löthman, P., Dirnberger, M., Elwenspoek, M., Manz, A., & Abelman, L. (2018). Macroscopic equivalence for microscopic motion in a turbulence driven three-dimensional self-assembly reactor. *Journal of Applied Physics*, *123*, 24901. <https://doi.org/10.1063/1.5007029>
- Haghighat, B., Mastrangeli, M., Mermoud, G., Schill, F., & Martinoli, A. (2016). Fluid-Mediated Stochastic Self-Assembly at Centimetric and Sub-Millimetric Scales: Design, Modeling, and Control. In *Micromachines* (Vol. 7, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/mi7080138>
- Ipparthi, D., Winslow, A., Sitti, M., Dorigo, M., & Mastrangeli, M. (2017). Yield prediction in parallel homogeneous assembly. *Soft Matter*, *13*(41), 7595–7608. <https://doi.org/10.1039/C7SM01189J>
- Jílek, M., Somr, M., Kulich, M., Zeman, J., & Přeučil, L. (2021). Towards a Passive Self-Assembling Macroscale Multi-Robot System. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(4), 7293–7300. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3096748>
- Jílek, M., Stránská, K., Somr, M., Kulich, M., Zeman, J., & Přeučil, L. (2022). Self-Stabilizing Self-Assembly. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(4), 9763–9769. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3191795>
- Jílek, Martin, Kulich, M., & Preucil, L. (2020). *Centimeter-scaled Self-Assembly: A Preliminary Study*. <https://doi.org/10.5220/0009830104380445>
- Kimura, K., Okuyama, T., Okano, T., & Suzuki, H. (2018). Selective bonding method for self-assembly of heterogeneous components using patterned surfaces. *Sensors and Actuators A: Physical*, *279*, 306–312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.001>
- Liu, Y., Chen, Y., Jiang, X., Ni, Q., Liu, C., Shang, F., Xia, Q., & Zhang, S. (2022). Self-Assembly at a Macroscale Using Aerodynamics. In *Applied Sciences* (Vol. 12, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/app12157676>
- Löthman, P. A., Hageman, T. A. G., Elwenspoek, M. C., Krijnen, G. J. M., Mastrangeli, M., Manz, A., & Abelman, L. (2020). A Thermodynamic Description of Turbulence as a Source of Stochastic Kinetic Energy for 3D Self-Assembly. *Advanced Materials Interfaces*, *7*(5), 1900963. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/admi.201900963>
- Masumori, A., & Tanaka, H. (2013). *Morphological computation on two dimensional self-Assembly system*. <https://doi.org/10.1145/2503385.2503412>
- Metzmacher, J., Poty, M., Lumay, G., & Vandewalle, N. (2017). Self-assembly of smart mesoscopic objects. *The European Physical Journal E*, *40*(12), 108. <https://doi.org/10.1140/epje/i2017-11599-y>
- Mitsui, M., Masumori, A., Asakura, R., & Tanaka, H. (2014). *Applying Self-Assembly and Self-Reconfigurable Systems for Printer*. <https://doi.org/10.7551/978-0-262-32621-6-ch086>
- Nakajima, K., Ngouabeu, A. M. T., Miyashita, S., Göldi, M., Fuchslin, R. M., & Pfeifer, R. (2012). Morphology-Induced Collective Behaviors: Dynamic Pattern Formation in Water-Floating Elements. *PLOS ONE*, *7*(6), e37805. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037805>
- Niu, R., Du, C. X., Esposito, E., Ng, J., Brenner, M. P., McEuen, P. L., & Cohen, I. (2019). Magnetic handshake materials as a scale-invariant platform for programmed self-assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(49), 24402–24407. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910332116>
- O’Hara, I., Paulos, J., Davey, J., Eckenstein, N., Doshi, N., Tosun, T., Greco, J., Seo, J., Turpin, M., Kumar, V., & Yim, M. (2014). Self-assembly of a swarm of autonomous boats into floating structures. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1234–1240. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907011>
- Okuyama, T., Hikida, T., Okano, T., & Suzuki, H. (2020). Selective self-assembly of three-component system based on hydrophilic/hydrophobic patterning. *Sensors and Actuators A: Physical*, *312*, 112143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112143>
- Papadopoulou, A., Laucks, J., & Tibbits, S. (2017). From Self-Assembly to Evolutionary Structures. *Architectural*

Design, 87(4), 28–37.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ad.2192>

Poty, M., Lumay, G., & Vandewalle, N. (2014). Customizing mesoscale self-assembly with three-dimensional printing. *New Journal of Physics*, 16(2), 23013.
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/2/023013>

Rubenstein, M., Cornejo, A., & Nagpal, R. (2014). Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 345(6198), 795–799.
<https://doi.org/10.1126/science.1254295>

Tibbits, S. (2012a). Design to Self-Assembly. *Architectural Design*, 82(2), 68–73.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ad.1381>

Tibbits, S. (2017). From Automated to Autonomous Assembly. *Architectural Design*, 87(4), 6–15.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ad.2189>

Tibbits, S. (2012b). The self-assembly line. In *ACADIA 2012 - Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 2012-October*, 365–372.
<https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2012.365>

Vandewalle, N., Poty, M., Vanesse, N., Caprasse, J., Defize, T., & Jérôme, C. (2020). Switchable self-assembled capillary structures. *Soft Matter*, 16(45), 10320–10325.
<https://doi.org/10.1039/D0SM01251C>