



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

TESIS

“IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DEL
AUTOEMSAMBLAJE DE CLAVIJA EN AGUJERO
UTILIZANDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

M. EN I. JORGE ELIECER BENITEZ PRADA

DIRECTORES DE TESIS:

DR. HÉCTOR PLASCENCIA MORA

DR. EDUARDO AGUILERA GÓMEZ

SALAMANCA, GTO

AGOSTO, 2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por guiarme y brindarme fortaleza en cada paso de este viaje académico.

A mi esposa, Julet Marcela Méndez Hernández, y a mi hijo, Jerónimo Benítez Méndez, por su amor incondicional y apoyo constante. Estoy enormemente agradecido por el hogar que hemos formado juntos, que se ha convertido en el pilar de mi vida diaria. Este hogar me da fortaleza hoy y siempre, y es la fuente de motivación que impulsa mis mayores logros, sin importar el esfuerzo que se requiera. Su presencia y aliento han sido fundamentales para alcanzar este hito.

A mi madre, María de la Cruz Prada Salazar, por su amor, sacrificio y por ser una fuente de inspiración y apoyo inquebrantable a lo largo de mi vida.

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por su apoyo en la realización de mis estudios doctorales, a través de la beca otorgada en la convocatoria Becas Nacional (Tradicional) 2020-2 con número de CVU 766334.

Mi gratitud también al Dr. Héctor Plascencia Mora y al Dr. Eduardo Aguilera Gómez, por permitirme trabajar a su lado durante este proyecto. Gracias por compartir sus conocimientos, enriquecer mi trabajo con sus valiosos aportes, y facilitar todas las condiciones necesarias para culminar este proyecto en tiempo y forma. Aprecio profundamente sus consejos, su tiempo, su comprensión, y la oportunidad de aprender tanto a nivel personal como profesional.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a los estudiantes Alan Johan González Razo, Adolfo Pérez Rodríguez, Maximiliano Arguijo Ramírez, Mario Alberto Bravo Morales y Alberto Esquivel Betancourt, de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Su motivación y curiosidad hacia la investigación desarrollada se tradujeron en una participación activa durante sus prácticas profesionales y servicio social. Sus aportes fueron significativos para la puesta en marcha del banco experimental y el sistema de detección de trayectorias. Espero que esta experiencia haya sido tan enriquecedora para ustedes como lo fue para mí.

Finalmente, deseo expresar mi profundo agradecimiento a México, que siento como una segunda patria. Este país me ha brindado oportunidades inigualables y me ha permitido alcanzar el nivel académico más alto en mi carrera. A mis amigos, agradezco enormemente tenerlos a mi lado y la motivación mutua que buscamos para nuestro crecimiento personal y profesional. Esta conexión me ha hecho sentir menos solo, incluso en un país diferente al que nací. A mis mascotas, les agradezco por ser parte integral de mi hogar, por su alegría y amor constante, que han sido una fuente de compañía y diversión en cada momento de este proceso.

Resumen

El ensamblaje de componentes manufacturados en productos finales requiere tradicionalmente de intervención humana y de elevados recursos. Sin embargo, los procesos de autoensamblaje, que utilizan interacciones físicas espontáneas para formar estructuras complejas, prometen ensamblajes más eficientes y sostenibles. Esta investigación explora la viabilidad del autoensamblaje macroscópico, específicamente en la inserción autónoma de una clavija en agujero.

La hipótesis plantea la posibilidad de identificar y controlar los elementos que constituyen el autoensamblaje, como el diseño del componente, el entorno del proceso, las fuerzas involucradas y la reversibilidad del ensamblaje, para lograr la inserción autónoma de una clavija en agujero.

A través de un minucioso estudio teórico, se explora el proceso tradicional de ensamblaje de clavija en orificio, que incluye el diseño, el concepto de triángulo de fricción, los modos de falla y un modelo de inserción bidimensional. Estos aspectos teóricos proporcionan una base sólida para comprender las características que debe cumplir el autoensamblaje.

Un estudio detallado del autoensamblaje cubre su concepto, funcionamiento y aplicaciones. Se analizan ejemplos históricos de implementaciones de autoensamblaje macroscópico y algunos de estos sistemas se replican mediante ingeniería inversa. Los conocimientos teóricos y prácticos en esta etapa permiten comprender de manera integral la metodología para generar un proceso autónomo de inserción de clavijas en agujero.

Además, la observación y experimentación previa utilizando un prototipo básico de autoensamblaje a escala macroscópica en tres dimensiones complementa todo el conocimiento para diseñar y fabricar un banco de pruebas experimental que permita el análisis de factores controlados proponiendo un diseño experimental.

La construcción del sistema de pruebas experimentales valida la hipótesis planteada; el sistema permite la inserción de clavijas de diferentes alturas en el agujero sincronizando los elementos que constituyen un autoensamblaje. Posteriormente, se determinan los factores controlables con influencia significativa en la respuesta de inserción y se ajusta un modelo probabilístico capaz de predecir el autoensamblaje.

La investigación concluye con la determinación de la configuración óptima de factores, un modelo de probabilidad de ocurrencia del autoensamblaje con un error menor al 12%, un análisis riguroso del proceso de inserción mediante el seguimiento de trayectorias en tiempo real y un análisis de varianza para diferentes alturas de clavijas, encontrando una diferencia estadísticamente significativa en los tiempos medios de inserción. Este estudio tiene el potencial de contribuir significativamente a la ingeniería mecánica al ofrecer una metodología robusta para el autoensamblaje macroscópico, aplicable en diversas industrias que buscan ensambles eficientes y autónomos.

Abstract

The assembly of manufactured components into final products traditionally requires human intervention and high resources. However, self-assembly processes, which utilize spontaneous physical interactions to form complex structures, promise more efficient and sustainable assemblies. This research explores the feasibility of macroscopic self-assembly, specifically in the autonomous insertion of a peg in a hole.

The hypothesis posits the possibility of identifying and controlling the elements that constitute self-assembly, such as component design, process environment, involved forces, and the reversibility of the assembly, to achieve the autonomous insertion of a peg in a hole.

Through a meticulous theoretical study, the traditional peg-in-hole assembly process undergoes exploration, including design, the concept of the friction triangle, failure modes, and a two-dimensional insertion model. These theoretical aspects provide a solid foundation for understanding the characteristics that the self-assembly must meet.

A detailed study of self-assembly covers its concept, functioning, and applications. Historical examples of macroscopic self-assembly implementations undergo analysis, and some of these systems undergo replication through reverse engineering. Theoretical and practical knowledge at this stage allows for a comprehensive understanding of the methodology to generate an autonomous peg-in-hole insertion process.

Furthermore, prior observation and experimentation using a basic self-assembly prototype on a macroscopic scale in three dimensions complement all the knowledge to design and manufacture an experimental test bench that enables the analysis of controlled factors by proposing an experimental design.

The construction of the experimental test system validates the hypothesis raised; the system allows the insertion of pins of different heights into the hole by synchronizing the elements that constitute a self-assembly. Subsequently, the controllable factors with significant influence on the insertion response are determined, and a probabilistic model capable of predicting self-assembly is adjusted.

The research concludes with the determination of the optimal configuration of factors, a probability model of self-assembly occurrence with an error of less than 12%, a rigorous analysis of the insertion process through real-time trajectory tracking, and an analysis of variance for different peg heights, finding a statistically significant difference in the mean insertion times. This study has the potential to significantly contribute to mechanical engineering by offering a robust methodology for macroscopic self-assembly, applicable in various industries seeking efficient and autonomous assemblies.

Índice

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	5
1.3. HIPÓTESIS	7
1.4. OBJETIVOS	7
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	7
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EL AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA	9
2.1. ESTUDIO DEL ENSAMBLAJE DE CLAVIJA EN AGUJERO	9
2.1.1. <i>Ensamblaje</i>	9
2.1.2. <i>Diseño para ensamblaje</i>	9
2.1.3. <i>Ensamblaje de clavija en agujero</i>	14
2.1.4. <i>Caso ideal de ensamblaje de clavija en agujero</i>	14
2.1.5. <i>El triángulo de fricción</i>	15
2.1.6. <i>Modos de falla durante la inserción de clavija en agujero</i>	18
2.1.7. <i>Modelo de inserción de clavija en agujero en dos dimensiones</i>	19
2.2. ESTUDIO DEL AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA	43
2.2.1. <i>Qué es el autoensamblaje</i>	43
2.2.2. <i>Cómo funciona el autoensamblaje</i>	45
2.2.3. <i>Tipos de autoensamblaje</i>	45
2.2.4. <i>Escalas del autoensamblaje</i>	46
2.2.5. <i>Aplicaciones del autoensamblaje</i>	47
2.2.6. <i>Ingeniería inversa de sistemas de autoensamblaje implementados a escala macroscópica</i>	47
2.2.7. <i>Sistemas de autoensamblaje implementados a escala macroscópica a través del tiempo</i>	61
2.3. AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA DE CLAVIJA EN AGUJERO EN TRES DIMENSIONES	74
2.3.1. <i>Observaciones iniciales mediante prototipo básico del banco experimental de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones</i>	74
2.3.2. <i>Banco experimental para pruebas de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones</i>	81

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA DE CLAVIJA EN AGUJERO EN TRES DIMENSIONES MEDIANTE DISEÑO DE EXPERIMENTOS	97
3.1. PLANEACIÓN PREVIA AL EXPERIMENTO	97
3.1.1. <i>Identificación y exposición del problema</i>	97
3.1.2. <i>Elección de los factores, los niveles y los rangos</i>	97
3.1.3. <i>Selección de la variable de respuesta</i>	98
3.1.4. <i>Especificaciones de los componentes utilizados en los experimentos.</i>	99
3.2. ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	101
3.3. REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	101
3.3.1. <i>Regresión logística binaria</i>	101
3.3.2. <i>Regresión logística binaria para los factores de mayor influencia</i>	110
3.3.3. <i>Validación del ajuste de la probabilidad de ocurrencia del autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero</i>	119
3.3.4. <i>Análisis de varianza de un factor</i>	120
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES DE LA TESIS	126
4.1. RESUMEN	126
4.2. EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS	127
4.3. APORTACIÓN CIENTÍFICA	128
4.4. CONCLUSIONES	128
4.5. TRABAJO FUTURO	131
REFERENCIAS	133
ANEXOS	140
ANEXO 1. PUBLICACIONES Y ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS DEL DOCTORADO	140
ANEXO 2. MATRIZ DE DISEÑO, ORDEN ALEATORIZADO Y RESPUESTA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	143

Índice de figuras

Figura 1. Diseño de extremo a extremo: a) simétrico, b) asimétrico.	10
Figura 2. Diseño asimétrico: a) leve, b) pronunciado, c) componente receptor.	11
Figura 3. Diseño: a) se bloqueará, b) no se puede bloquear.	11
Figura 4. Diseño: a) se entrelazará, b) no se puede entrelazar.	11
Figura 5. Características de los componentes que afectan su manipulación manual: a) muy pequeño, b) resbaladizo, c) afilado, d) flexible. modificado de [35].	11
Figura 6. Diseño sobre el eje de inserción: a) simétrico, b) asimétrico.	12
Figura 7. Generalidades de diseño que favorecen y guían la inserción: a) clavija bloqueada en las esquinas, b) chaflanes para facilitar la inserción, c) diseño alargado para facilitar inserción del componente, d) alivios de aire para facilitar inserción en agujero ciego. modificado de [35].	12
Figura 8. Componentes estandarizados: a) diseño con dos tipos de tornillo, b) nuevo diseño.	13
Figura 9. Consideraciones para facilitar la inserción/fijación: a) auto localización, b) componente localizado antes de soltarlo. modificada de [35].	13
Figura 10. Sujetadores mecánicos comunes. modificada de [35].	13
Figura 11. Caso ideal de ensamblaje de clavija en agujero.	14
Figura 12. Representación del triángulo de fricción en 2D.	15
Figura 13. Fuerza externa aplicada para superar la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento de los cuerpos.	17
Figura 14. Dirección de la fuerza aplicada en relación al triángulo de fricción: a) no ocurre movimiento, b) si ocurre movimiento.	17
Figura 15. Condición de bloqueo en el ensamblaje de clavija en agujero.	18
Figura 16. Condición de acunamiento en el ensamblaje de clavija en agujero.	19
Figura 17. Configuraciones de contacto para el ensamblaje de clavija en agujero en dos dimensiones.	21
Figura 18. Configuraciones de transición para el ensamblaje de clavija en agujero en dos dimensiones.	21
Figura 19. Sistemas de coordenadas para determinar la posición relativa de la clavija con respecto al agujero.	22
Figura 20. Punto (a_1, b_1) conocido en el sistema de coordenadas (a, b) .	22
Figura 21. Puntos de interés (vértices de la clavija) para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero.	23
Figura 22. Parámetros lineales de contacto para la configuración 3.	26

Figura 23. Puntos de contacto para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero en la configuración 3.	27
Figura 24. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 3: a) trayectorias de diferentes puntos, b) movimiento de la clavija.	30
Figura 25. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 3: a) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 12.7\text{ mm}$, b) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 25.4\text{ mm}$, c) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 38.1\text{ mm}$.	30
Figura 26. Parámetro lineal de contacto para la configuración 5.	31
Figura 27. Puntos de contacto para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero en la configuración 5.	31
Figura 28. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 5: a) trayectorias de diferentes puntos, b) movimiento de la clavija.	35
Figura 29. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 5: a) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 12.7\text{ mm}$, b) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 25.4\text{ mm}$, c) $d = 12.7\text{ mm}$, $L = 38.1\text{ mm}$.	35
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 3.	36
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 5.	38
Figura 32. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de contacto 3 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .	40
Figura 33. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de transición entre 3 y 5 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .	40
Figura 34. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de contacto 5 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .	41
Figura 35. Variación del espacio de solución para la configuración de contacto 3 con respecto al ángulo de inclinación de la clavija.	42
Figura 36. Variación del espacio de solución para la configuración de contacto 5 con respecto al ángulo de inclinación de la clavija.	42
Figura 37. Procesos de auto organización existentes en la naturaleza, adaptada de https://pixabay.com/es/ .	43
Figura 38. Representación esquemática del autoensamblaje: a) partes diseñadas y programadas, b) entorno, c) energía de activación, d) fuerza de unión y reversibilidad.	45
Figura 39. Tipos de autoensamblaje. adaptada de [52].	46
Figura 40. Escalas del autoensamblaje, adaptada de [28].	46
Figura 41. Análogo mecánico de auto reproducción de penrose: a) componente tipo A, b) componente tipo B, c) ensamblaje AB, d) ensamblaje BA.	48
Figura 42. Dimensiones del modelo cad realizado en Solidworks®: a) componente tipo A, b) componente tipo B.	48
Figura 43. Componentes fabricados por impresión 3D en resina: a) componente tipo A, b) componente tipo B.	49

Figura 44. Regiones de información física codificada a través de la forma. tomada de [54].	49
Figura 45. Medio original del autoensamblaje en el análogo mecánico de auto reproducción.	50
Figura 46. Dimensiones del modelo cad de la réplica del medio de autoensamblaje realizado en Solidworks®.	50
Figura 47. Réplica fabricada del medio de autoensamblaje para el análogo mecánico de auto reproducción.	51
Figura 48. Reglas debido al medio para el autoensamblaje de componentes A y B.	51
Figura 49. Lámina de acrílico que se instala en la parte frontal de la pista (medio de autoensamblaje).	52
Figura 50. Réplica fabricada del análogo de auto reproducción – modelo Penrose.	52
Figura 51. Resultados experimentales de la réplica fabricada del análogo mecánico de auto reproducción – modelo Penrose: a) autoensamblaje sin semilla; b) resultado del autoensamblaje sin semilla; c) autoensamblaje con semilla AB; d) resultado del autoensamblaje con semilla AB; e) autoensamblaje con semilla BA; f) resultado del autoensamblaje con semilla BA.	54
Figura 52. Ensamblaje espontáneo de popotes: componente único. tomada de [47].	55
figura 53. componentes recortados a partir de popotes para replicar el experimento original de Campbell.	55
Figura 54. Tipos de meniscos: a) meniscos que curvan el fluido en la misma dirección; b) meniscos que curvan el fluido en direcciones opuestas. modificada de [47].	56
Figura 55. Variaciones del diseño básico de popotes para el experimento de ensamblaje espontaneo de Campbell. creada a partir del material complementario de [47].	57
Figura 56. Tipos de componentes para la réplica del experimento de ensamblaje espontáneo de popotes.	58
Figura 57. Medio para replicar el experimento de ensamblaje espontáneo de Campbell.	58
Figura 58. Resultados experimentales de la réplica del ensamblaje espontáneo de popotes: a) autoensamblaje de popotes con corte transversal; b) resultado del autoensamblaje de popotes con corte transversal; c) autoensamblaje de popotes con corte en ángulo; d) resultado del autoensamblaje de popotes con corte en ángulo; e) autoensamblaje de popotes con corte longitudinal; f) resultado del autoensamblaje de popotes con corte longitudinal.	61
Figura 59. Componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero: a) vista superior de las clavijas de diámetro de 6.35 mm; b) vista frontal de las clavijas con alturas diferentes ($h=d$, $h=2d$, $h=3d$); c) vista superior de la superficie de contacto de las clavijas con un agujero central pasante de diámetro 6.35 mm (área superficial=2792.2 mm ²); d) vista frontal de la superficie de contacto de las clavijas con el agujero que permite observa la altura del agujero igual al diámetro de las clavijas.	75
Figura 60. Impresoras 3D utilizadas para fabricar los componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero: a) makerbot replicator; b) elegoo mars.	75

Figura 61. Proceso de medición de los componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero.	76
Figura 62. Medio del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero.	77
Figura 63. Proceso de autoensamblaje básico de la clavija 12: a) estado inicial de la clavija t=0 s; b) clavija posicionada en el agujero t=26 s; c) clavija explorando la superficie cercana al agujero (rodando) t=99 s; d) estado final de la clavija (inserción) t=111 s.	78
Figura 64. Proceso de autoensamblaje básico de la clavija 50: a) estado inicial de la clavija t=0 s; b) clavija explorando la superficie sin posicionamiento exitoso en el agujero (rodando) t=60 s; c) clavija explorando la superficie sin posicionamiento exitoso en el agujero (rodando) t=300 s.	78
Figura 65. Histograma de tiempo de inserción para clavijas con h=d.	79
Figura. 66. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para cada clavija con h=d.	80
Figura 67. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para las diferentes holguras entre agujero y clavija.	80
Figura 68. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para los diferentes pesos de las clavijas.	81
Figura 69. Prueba de normalidad de los tiempos de inserción para clavijas con h=d.	81
Figura 70. Clavijas del banco experimental de autoensamblaje en escala macroscópica: a) vista superior de las clavijas d=12.7 mm; b) vista lateral de las clavijas h=d, h=2d y h=3d.	82
Figura 71. Placa con cinco agujeros como componente donde se debe insertar la clavija para considerar autoensamblaje satisfactorio: a) vista superior; b) vista isométrica.	82
Figura 72. Alternativas para restringir la caída de las clavijas en el autoensamblaje: a) concentración de clavijas alta; b) clavijas y componentes neutrales; c) (_____).	83
Figura 73. Robot de cerdas (bristlebot). tomada de https://saposyprincesas.elmundo.es/ocio-en-casa/experimentos/como-hacer-un-robot-casero/	84
Figura 74. (_____): a) (_____); b) (_____); c) (_____).	84
Figura 75. (_____).	85
Figura 76. Impresora 3D ultimaker 2.	85
Figura 77. Técnicas de impresión 3D: a) impresión con filamento, duración de la impresión: 1 día 21 h 34 min; b) (_____).	86
Figura 78. (_____).	87
Figura 79. (_____).	87
Figura 80. Energía de activación: a) máquina de alimentación automatizada de partes modelo EA-25 de la marca shinko; b) diagrama estructural de la máquina; c) regulador integrado modelo C8-3VF.	88

Figura 81. Resistencia máxima del trimpot regulador de la frecuencia de vibración. 89

Figura 82. Conexión y montaje de los acelerómetros inerciales MPU6050: a) esquema de conexión; b) montaje sobre el marco móvil; c) (). 89

Figura 83. Curvas de aceleración máxima para valores de resistencia del trimpot de frecuencia: a) voltaje 0 en el centro del marco móvil; b) voltaje 50 en el centro del marco móvil; c) voltaje 100 en el centro del marco móvil; d) voltaje 0 en la periferia del marco móvil; e) voltaje 50 en la periferia del marco móvil; f) voltaje 100 en la periferia del marco móvil. 90

Figura 84. Curvas de aceleración máxima para valores de resistencia del trimpot de frecuencia: a) voltaje 0 en el centro de la (); b) voltaje 50 en el centro de la (); c) voltaje 100 en el centro de la (); d) voltaje 0 en la periferia de la (); e) voltaje 50 en la periferia de la (); f) voltaje 100 en la periferia de la (). 91

Figura 85. (): a) (); b) (); c) (); d) (); e) (); f) (). 93

Figura 86. (): a) (); b) (); c) (); d) (); e) (); f) (). 94

Figura 87. (): a) (); b) (); c) (); d) (). 96

Figura 88. Resultado de la detección del proceso de autoensamblaje a través del tiempo para un dispositivo atrapado en estado intermedio ($t = 60$ a 90 s) y posteriormente posicionado correctamente (sistema reversible). 96

Figura 89. (). 99

Figura 90. (). 106

Figura 91. (). 106

Figura 92. (). 107

Figura 93. (). 107

Figura 94. (): a) (); b) ();

c) (_____). 108

Figura 95. (_____):
a) (_____); b) (_____);
c) (_____); d) (_____);
e) (_____); f) (_____). 109

Figura 96.
(_____). 110

Figura 97. (_____):
a) (_____); b) (_____);
c) (_____); d) (_____);
e) (_____); f) (_____). 110

Figura 98.
(_____). 114

Figura 99.
(_____). 115

Figura 100.
(_____). 115

Figura 101.
(_____). 116

Figura 102. (_____):
a) (_____); b) (_____);
c) (_____). 116

Figura 103. (_____): a) (_____);
b) (_____); c) (_____);
d) (_____); e) (_____);
f) (_____). 117

Figura 104.
(_____). 118

Figura 105. (_____): a) (_____);
b) (_____); c) (_____);
d) (_____); e) (_____);
f) (_____). 119

Figura 106. Prueba de normalidad para los datos de la respuesta de tiempo de inserción. 121

Figura 107. Prueba de normalidad para los datos transformados de la respuesta de tiempo de inserción. 122

Figura 108. Resultado gráfico de la prueba simultánea de tukey para diferencias de las medias. 124

Figura 109. Gráfica de cajas y bigotes para la transformación de tiempo de inserción en función de la altura de la clavija. 124

Figura 110. Gráfica cuatro en uno de los residuos para la transformación de tiempo.	125
Figura A1. Disertación en congresos, certificados otorgados en calidad de ponente: a) congreso internacional de investigación, innovación y divulgación científica: perspectivas disruptivas de la universidad señor de sipán, Perú; b) iii congreso internacional de ingeniería mecánica – coiim 2022, Perú.	141
Figura A2. Artículo de divulgación científica: “una revisión del autoensamblaje enfocado en escala macroscópica” [91], publicado en la revista ingenio magno de la universidad santo tomas, Colombia, 2022.	141
Figura A3. Dirección de tesis de licenciatura: notificación de registro de trabajo de tesis de licenciatura bajo la asesoría del Dr. Héctor Plascencia Mora y el M. en. I. Jorge Eliecer Benitez Prada, 2023.	142
Figura A4. Curso optativo: constancia de calificación de curso optativo: “diseño de experimentos y probabilístico” tomado en la universidad de guanajuato, para el aseguramiento del conocimiento básico necesario para el desarrollo del proyecto de tesis, 2023.	142

Índice de tablas

Tabla 1. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero.	24
Tabla 2. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero para la configuración de contacto 3.	28
Tabla 3. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero para la configuración de contacto 5.	32
Tabla 4. Reglas de interacción existentes para la formación de los ensamblajes AB y BA. adaptada de [54].	49
Tabla 5. Implementaciones físicas del autoensamblaje a través del tiempo.	62
Tabla 6. Características de la máquina de alimentación automatizada de partes shinko modelo EA-25.	88
Tabla 7. Especificaciones de los componentes utilizados en los experimentos.	100
Tabla 8. Estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión logística binaria del experimento factorial fraccionado a la mitad.	103
Tabla 9. Análisis de varianza (prueba de wald) del experimento factorial fraccionado a la mitad.	105
Tabla 10. Estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión logística binaria del experimento factorial completo.	112
Tabla 11. Análisis de varianza (prueba de wald) del experimento factorial completo.	114
Tabla 12. Datos utilizados para el anova de un factor.	120
Tabla 13. Anova (análisis de varianza) de un factor para la respuesta de tiempo de inserción con valores transformados.	122
Tabla 14. Agrupación de las medias utilizando el método de tukey y una confianza del 95%.	123
Tabla 15. Prueba simultánea de tukey para diferencias de las medias.	123
Tabla A1. Matriz de diseño para el experimento factorial fraccionado a la mitad.	143
Tabla A2. Orden aleatorizado de las corridas para la realización del experimento factorial fraccionado a la mitad.	144
Tabla A3. Matriz de diseño para el experimento factorial completo.	148
Tabla A4. Orden aleatorizado de las corridas para la realización del experimento factorial completo.	149
Tabla A5. Respuesta de inserción para las corridas de validación.	151

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

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 [1]. 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 [2]. El simulador permitió comprobar cierto grado de discrepancia existente entre la escala macroscópica y microscópica [3], [4]. 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 [5], [6].

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 [7], [8]. 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 [9]–[11]. 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 [12], [13]. 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 [14]–[17]. Finalmente, Existe mayor posibilidad de desarrollar algoritmos en entornos computacionales dedicados al seguimiento, modelado, retroalimentación, programación y control en el autoensamblaje en escala macroscópica [18], [19]. Todo lo anteriormente mencionado, brinda acceso a tipos de funcionalidad sin

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

precedentes, al igual que brinda mejores oportunidades de comprender y optimizar el proceso de autoensamblaje con respecto a sistemas moleculares y a escala nanométrica. 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 [10]. 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 [20]. Para aprovechar el paralelismo inherente del proceso, lo ideal es evitar o reducir las subestructuras incompatibles [9], [21]. 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.

También es necesario asegurar la secuencia de ensamblaje y garantizar que partes internas se ensamblen antes que las externas [14]. Igualmente, es importante garantizar la especificidad del ensamblaje para garantizar el correcto posicionamiento de las partes en la estructura objetivo. Finalmente, el rendimiento del autoensamblaje es difícil de lograr al 100%, debido a la característica estocástica del proceso [15], [17].

Varios de los desafíos del autoensamblaje en escala macroscópica, se han simplificado enormemente al implementarlo en una o dos dimensiones espaciales [22]–[24]. 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 [14]. 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 [25].

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 [26], demostraron que era posible imitar características biológicas en la escala macroscópica. A partir de bloques de madera no electrónicos, diseñados geométricamente 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. Dos experimentos fueron conducidos, agregando un par de piezas A y B unidas, en el primero unidas como semilla AB y el segundo como semilla BA. En ambos casos, fueron agregadas piezas A y B sin unión de manera aleatoria a lo largo de la pista junto con las semillas mencionadas anteriormente. Se demostró que, dependiendo de la semilla agregada, las piezas sin unión reproducían la semilla inicial. 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 [1], 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

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

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 [27], 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 3 x 3 x 4.5 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 Papadopoulos et al. [11], se estudió la organización autónoma dinámica a gran escala de unidades llenas de helio. Los globos meteorológicos de tamaño aproximado de 0.9 m 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

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

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. [23], 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 Hachohen et al. [14], 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. 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.

En Haghighat et al. [19], 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

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

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 μm . 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. [25], 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. [13], 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. 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, $T_m = 60^\circ\text{C}$.

Existen muchísimos estudios enfocados al desarrollo del autoensamblaje, todos han aportado grandiosos descubrimientos y posibles mejoras para su implementación generalizada. En la escala macroscópica el potencial del autoensamblaje es innegable y actualmente sigue siendo parte de los grandes retos a resolver, sobre todo en sistemas en tres dimensiones y en problemas de mayor complejidad a la formación de patrones, como puede ser el problema de inserción de clavija en agujero.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La manufactura mecánica utiliza diferentes técnicas como fundición, estampado y mecanizado para fabricar piezas o componentes previamente diseñados. En general, para convertir dichas piezas o componentes individuales previamente fabricados en productos terminados o máquinas funcionales, es necesario llevar a cabo un proceso de ensamblaje, conformando un conjunto o subconjuntos de componentes unidos de manera ordenada [28]. Esta manera de hacer o construir las cosas fue desarrollada por el hombre con el fin de generar sistemas artificiales complejos y funcionales, y por supuesto, fue ampliamente adoptada en múltiples disciplinas en diferentes escalas dimensionales, desde la escala molecular hasta la macroscópica. Sin embargo, existe evidencia sólida en la naturaleza de

una manera alternativa de construir sistemas u objetos de manera autónoma y paralela, a partir de principios físicos e interacciones espontáneas, que recibe el nombre de autoensamblaje.

Generalmente, en la ingeniería hemos prestado gran atención en el producto terminado, su diseño, su funcionalidad, su vida útil, y cada una de las características o propiedades que deseamos como resultado, aunque, prestando poca atención en cómo construirlo. Debido a esto, nuestros procesos de construcción, en gran parte, se llevan a cabo mediante técnicas muy especializadas, de manera manual, automatizada o una combinación de estas, con inmensas líneas de montaje, demandando altos requerimientos de información, programación y control, personal altamente capacitado, máquinas o herramientas especiales, espacios físicos o de instalación cada vez más grandes, consumos energéticos elevados y en general altos costos. Lo mencionado anteriormente, ha convertido las técnicas convencionales de fabricación en estrategias poco sostenibles e incluso limitadas para el desarrollo de nuevos avances científicos, como ya se demostró en la nanotecnología. Por tal motivo, necesitamos orientarnos hacia la búsqueda de nuevas alternativas o metodologías que simplifiquen, mejoren o cambien totalmente la manera de construir las cosas.

Los procesos involucrados a partir de la idea de un producto o máquina funcional, hasta la creación del mismo, son el diseño, la manufactura y el ensamblaje, cada uno de ellos inicialmente utilizado de manera independiente, es decir, considerados sin conexión alguna [29]. Esta desconexión originó que gran cantidad de diseños exhibieran dificultades de fabricación y ensamblaje, promoviendo una cultura de constantes rediseños y elevados tiempos de desarrollo de productos, reflejándose en altísimos costos. La evidente desconexión, además, propicio la necesidad de comprender los límites y alcances de la manufactura en etapas tempranas del diseño de los componentes, esto logró unificar el diseño y la manufactura, disminuyendo lo que se conoció como diseño sobre pared “lo diseñamos, tú lo construyes”, es decir, el área de manufactura era responsable de lidiar con los problemas no previstos por el diseñador [30]. El enfoque unificado demostró mayor eficiencia en el proceso de diseño al proporcionar datos de manufactura a los diseñadores y afectó positivamente en el costo final del producto. Sin embargo, prestó poca atención al proceso de ensamblaje, al enfocarse únicamente en la fabricación de las partes. Cuando se considera la fabricación de un producto muy poca atención se presta en cómo se puede armar, la razón principal, es que para el ser humano es claro que no puede fabricar componentes sin el uso de equipos debido a limitaciones físicas, aunque puede llegar a realizar labores de ensamblaje más complejas utilizando capacidades que incluso los equipos más sofisticados no pueden duplicar [31]. Sin embargo, la mayoría de los productos o máquinas funcionales están conformadas por numerosos componentes simples desde el punto de vista de su fabricación, y no, por una sola parte compleja. Fue entonces inevitable considerar también los medios por los cuales los componentes serían ensamblados, esta vez considerando el ensamblaje del producto en etapas tempranas del diseño, esto encaminó el desarrollo de metodologías que consideraban los procesos involucrados en la construcción de las cosas, como procesos estrechamente conectados. Las metodologías más destacadas son el diseño para ensamblaje de Boothroyd y Dewhurst (DFA, design for assembly) que considera dos factores de análisis, la minimización del número de partes separadas, y la mejora en las características de ensamblaje de las partes restantes [32]; el método de evaluación de ensamblaje desarrollado en Hitachi (AEM, assembly evaluation method) que utiliza el principio de un movimiento para una parte; el método de diseño orientado a ensamblajes de Warnecke y Bassle, que evalúa la utilidad o el valor funcional de cada parte y finalmente el método Lucas de B. L. Miles y K. G. Swift que implementa el análisis funcional, manejo, alimentación y ajuste de las partes [30], todas ellas demostraron ser

enfoques unificadores, capaces de simplificar la construcción del producto y reducir los costos totales.

Actualmente, nos encontramos en la convergencia de múltiples avances científicos y tecnológicos que han permitido explorar nuevas técnicas de diseño y manufactura. Hoy podemos fabricar componentes con geometrías complejas y todo tipo de materiales, cada vez con menores costos y procesos más simplificados. En tal caso, estará todo preparado para aprender a explotar el poder del autoensamblaje de manera artificial y enfocado en la ingeniería para la producción de sistemas, atraídos fuertemente por la aparición del orden a partir del desorden [33], incluso pensando en la idea de no requerir ni siquiera de la intervención humana en la generación de estructuras o patrones. Siendo así, la actual investigación busca unirse a un esfuerzo multidisciplinario en la comprensión de los requerimientos que permiten replicar el autoensamblaje en la fabricación en general, específicamente dentro del ámbito de ingeniería a escala macroscópica. Se desea presentar el autoensamblaje como alternativa de solución de un problema práctico de ensamblaje ampliamente utilizado en la industria, como es el caso del sistema de clavija en agujero.

1.3. HIPÓTESIS

Es posible desarrollar y validar una metodología para facilitar la correcta inserción de una clavija en un agujero mediante un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica utilizando diseño de experimentos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar y validar una metodología para facilitar la correcta inserción de una clavija en un agujero mediante un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica utilizando diseño de experimentos.

1.4.2. Objetivos específicos

- a) Identificar las características existentes que favorecen o desfavorecen un ensamblaje convencional del sistema de clavija en agujero.
- b) Estudiar los sistemas de autoensamblaje artificial existentes mediante ingeniería inversa para determinar las reglas de diseño y construcción del proceso.
- c) Diseñar los componentes del sistema de clavija en agujero para generar físicamente las reglas locales que permitan el autoensamblaje.
- d) Determinar y desarrollar el entorno, las fuerzas perturbadoras y las fuerzas de unión que permitan ejecutar el autoensamblaje, cuidando la característica particular de reversibilidad deseada en el proceso.
- e) Orientar, posicionar y unir temporalmente un sistema de clavija en agujero a escala macroscópica, con el objetivo de facilitar su correcta inserción mediante un proceso de autoensamblaje.

- f) Realizar experimentos, utilizando un diseño apropiado para el análisis de los factores a controlar y aquellos que no son posible controlar, al igual que aquellos que tienen efecto sobre el desarrollo del autoensamblaje del sistema de clavija en agujero.
- g) Validar el conjunto de reglas y características para llevar a cabo el autoensamblaje del sistema de clavija en agujero.
- h) Identificar las mejoras o trabajo futuro de la investigación realizada.
- i) Contribuir al desarrollo de bases teóricas y metodológicas que faciliten la extensión del uso de la metodología de autoensamblaje en diferentes sistemas de ingeniería.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EL AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA

2.1. ESTUDIO DEL ENSAMBLAJE DE CLAVIJA EN AGUJERO

2.1.1. Ensamblaje

El ensamblaje consiste en la adición o unión de componentes individuales previamente manufacturados con el objetivo de formar una estructura de mayor complejidad, conocida como producto final. La formación de una estructura de mayor complejidad, no implica el uso de componentes individuales demasiado singulares, un proceso de ensamblaje difícil ni mucho menos un producto final atípico. En realidad, el incluir estructura de mayor complejidad dentro del significado de ensamblaje da mayor relevancia a su objetivo, al referirse a las características y funciones únicas deseadas en el producto final que no podrían alcanzar los componentes de manera separada [34]. Por tal motivo el ensamblaje es un proceso esencial de manufactura que no debe considerarse en el mismo sentido que los procesos de manufactura como el mecanizado, el moldeado o la fabricación aditiva [35].

El ensamblaje se puede dividir en dos etapas conocidas como: 1) la etapa de manipulación (adquisición, posicionamiento, orientación y movimiento) y 2) la etapa de inserción/fijación (acople y ajuste final) [35]. La correcta ejecución de ambas etapas garantiza en gran medida la obtención del producto deseado. Sin embargo, abordar la manipulación e inserción/fijación de los componentes al momento de su ensamblaje y no desde etapas tempranas del diseño ha demostrado causar fallas. Para evitar la aparición de errores en un nivel avanzado de la cadena productiva, lo cual ocasiona pérdida de tiempo y costos adicionales del producto final, generalmente es recomendable implementar métodos como el diseño para ensamblaje (DFA, por sus siglas en inglés).

2.1.2. Diseño para ensamblaje

El DFA pertenece a la familia de métodos de diseño para excelencia (o diseño para X, o DFX) [36]. La familia de métodos DFX proporcionan un enfoque sistemático y holístico del diseño de un producto, se encuentran en constante crecimiento y abarcan desde la etapa temprana de la idea conceptual hasta su entrega final, es decir, toda la cadena productiva. El DFA se enfoca en cubrir la mayor cantidad de aspectos del diseño del producto con el objetivo de lograr el ensamblaje más fácil [35]. Adicionalmente, la implementación del DFA resulta en la reducción de tiempo de fabricación y costo del producto, ya que facilita la identificación temprana de posibles problemas y su solución. Sin embargo, se debe recordar que crear, a partir del diseño, el ensamblaje más simple implica conocimiento, tiempo y dificultad aun cuando hace del proceso de diseño más eficiente.

El propósito de abordar el método de DFA dentro de la tesis es explorar antecedentes de diseño que facilitan la inserción en el ensamblaje de clavija en agujero desde la etapa conceptual del autoensamblaje con el objetivo de conocerlos e implementarlos durante su desarrollo, aun cuando no se aplica como tal el método DFA. En consecuencia, se describen las generalidades de diseño del estudio del DFA considerados como facilitadores del ensamblaje de clavija en agujero y también su futuro autoensamblaje.

2.1.2.1. Tipo de ensamblaje

El primer asunto que debe resolverse cuando pensamos en ensamblar componentes es como realizar dicho ensamblaje. El método de DFA considera importante diseñar de acuerdo con el tipo de proceso a emplear, ya sea ensamblaje manual, automatizado de propósito general (líneas de ensamblaje), automatizado de propósito especial o la combinación de estos [35]. El objetivo de la tesis es el autoensamblaje de componentes (clavija, placa con agujeros) a escala macroscópica, en este sentido, la respuesta del proceso a emplear es evidente. Sin embargo, el desarrollo de aspectos y principios de diseño para el autoensamblaje a escala macroscópica no ha sido desarrollado dentro del método de DFA. La alternativa más viable basándonos en este método es abordar los principios de diseño desde la perspectiva del ensamblaje manual, debido a que generalmente los criterios para ensamblaje automatizado son más estrictos. Además, la mayoría de procesos de ensamblaje automatizado no son independientes de operaciones manuales. El ensamblaje automatizado se enfoca en mayor medida en resolver la complejidad de manipulación e inserción/fijación de los componentes para su correcto ensamblaje. Por el contrario, el ensamblaje manual se enfoca principalmente en las características de los componentes, debido a las habilidades inherentes del ser humano en tareas de manipulación e inserción/fijación. El autoensamblaje es un proceso autónomo, es decir, sin intervención humana y puede parecer contraintuitivo abordarlo desde la perspectiva de ensamblaje manual. Sin embargo, el autoensamblaje es interpretable de forma sencilla como una programación física de componentes, entorno, energía y fuerzas, lo cual se acerca más a un enfoque basado en características de diseño que del proceso de ensamblaje en sí mismo.

2.1.2.2. Generalidades de diseño para la etapa de manipulación en ensamblaje manual

Se describen las directrices generales que debe considerar un diseñador para facilitar la etapa inicial de manipulación de componentes mediante ensamblaje manual [35]:

- El diseño de los componentes debe ser simétrico de extremo a extremo, idealmente con simetría rotacional, ver Figura 1. La figura a), muestra un cilindro simétrico respecto al eje mostrado, a un plano vertical que contiene el eje y a un plano horizontal que lo divide en dos. En cambio, la figura b), es asimétrica respecto a este plano horizontal, presentando mayor dificultad para su manipulación durante el ensamblaje.

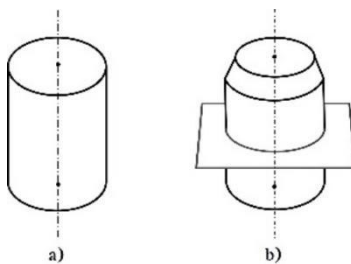


Figura 1. Diseño de extremo a extremo: **a)** simétrico, **b)** asimétrico.

- Cuando el componente no pueda diseñarse simétrico, debe ser claramente asimétrico, ver Figura 2). La figura a) presenta una ligera asimetría, ya que la distancia entre centros de los agujeros inferiores es menor que en los superiores. La figura b) es más asimétrica debido a los chaflanes en la parte inferior, lo que indica claramente que esa sección debe orientarse hacia abajo durante el ensamblaje. La ausencia de chaflanes en el componente a) requiere precisión en la ubicación de los agujeros, aumentando el riesgo de error en su alineación.

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

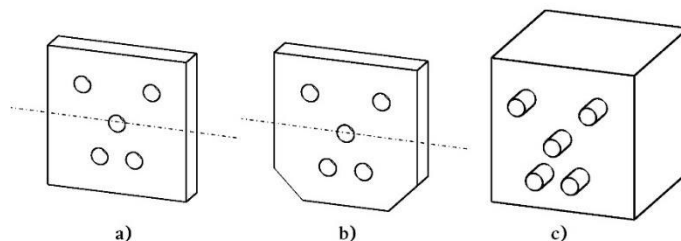


Figura 2. Diseño asimétrico: **a)** leve, **b)** pronunciado, **c)** componente receptor.

- Los componentes deben tener características que eviten su bloqueo si tienden a apilarse en su almacenamiento previo al ensamblaje, ver Figura 3.

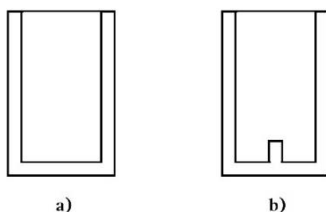


Figura 3. Diseño: **a)** se bloqueará, **b)** no se puede bloquear.

- Los componentes deben tener características que eviten el entrelazamiento en su almacenamiento previo al ensamblaje, ver Figura 4.

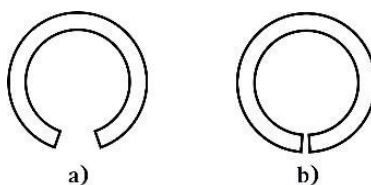


Figura 4. Diseño: **a)** se entrelazará, **b)** no se puede entrelazar.

- Se deben evitar componentes que se peguen, que sean resbaladizos, delicados, flexibles, muy pequeños, muy grandes, peligrosos de manipular (componentes afilados, componentes que se astillan fácilmente) o muy pesados, ver Figura 5.

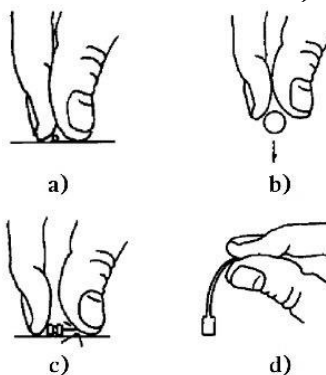


Figura 5. Características de los componentes que afectan su manipulación manual: **a)** muy pequeño, **b)** resbaladizo, **c)** afilado, **d)** flexible. Modificado de [35].

2.1.2.3. Generalidades de diseño para la etapa de inserción/fijación en ensamblaje manual

Se describen las directrices generales que debe considerar un diseñador para facilitar la etapa final de inserción/fijación de componentes mediante ensamblaje manual [35]:

- El diseño de los componentes debe considerar simetría rotacional sobre el eje de inserción, ver Figura 6.

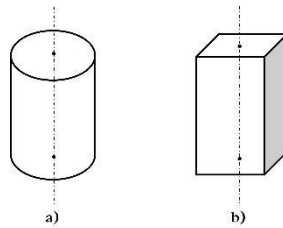


Figura 6. Diseño sobre el eje de inserción: **a)** simétrico, **b)** asimétrico.

- Se requiere diseñar evitando la resistencia durante la inserción, para lo cual es fundamental diseñar los componentes incorporando características que faciliten el proceso. Entre las alternativas más efectivas se encuentran: 1) Proporcionar holguras adecuadas entre dos componentes, evitando holguras positivas o interferencias excesivas que resulten en una tendencia a que los componentes se bloqueen o cuelguen durante la inserción, 2) Evitar aristas incorporando chaflanes o redondeos, que guíen la inserción, 3) Incorporar diseños alargados puede facilitar la inserción al proporcionar una superficie de guía más extensa, lo que mejora la alineación y estabilidad de los componentes durante el acoplamiento y 4) Añadir alivios de aire, especialmente en agujeros ciegos. Los alivios de aire permiten liberar la presión generada por el aire atrapado en el fondo del agujero, ver Figura 7.

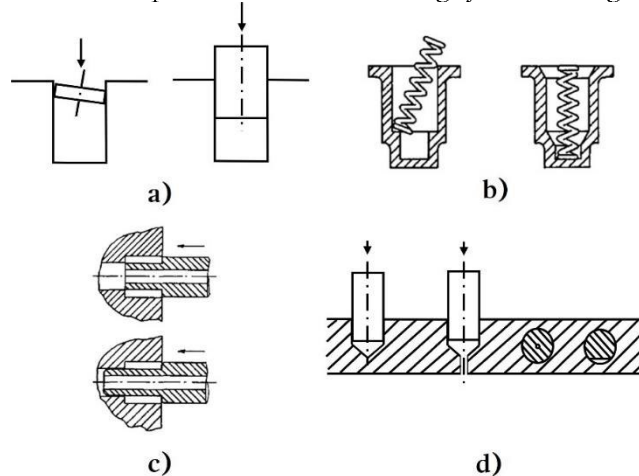


Figura 7. Generalidades de diseño que favorecen y guían la inserción: **a)** clavija bloqueada en las esquinas, **b)** chaflanes para facilitar la inserción, **c)** diseño alargado para facilitar inserción del componente, **d)** alivios de aire para facilitar inserción en agujero ciego. Modificado de [35].

- Estandarizar el diseño de los componentes a utilizar en el producto final permite emplear los mismos procesos y métodos de ensamblaje reduciendo costos, ver Figura 8.

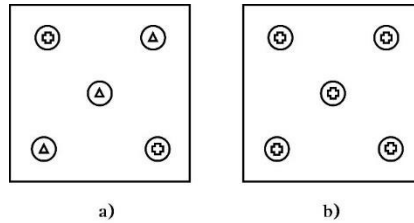


Figura 8. Componentes estandarizados: **a)** diseño con dos tipos de tornillo, **b)** nuevo diseño.

- En general, es mejor considerar ensamblaje progresivo desde arriba, evitar la necesidad de sujetar el componente cuando ya ha sido localizado o durante el ensamblaje de otro componente, evitar soltar el componente antes de ser ubicado, evitar la necesidad de reposicionar los componentes para su ensamblaje con otro componente o con el producto parcial y siempre que sea posible se debe diseñar el componente para que quede asegurado lo antes posible después de su inserción, ver Figura 9.

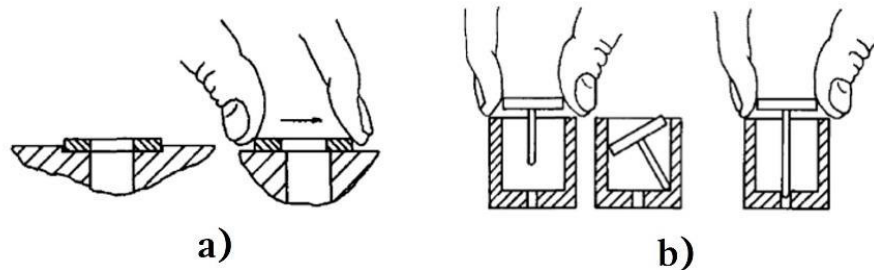


Figura 9. Consideraciones para facilitar la inserción/fijación: **a)** auto localización, **b)** componente localizado antes de soltarlo. Modificada de [35].

- Al emplear sujetadores mecánicos comunes para el ensamblaje manual de componentes se debe considerar el orden creciente del costo de los diferentes tipos de sujetadores, ver Figura 10.

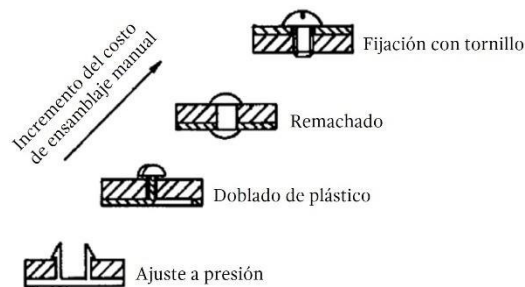


Figura 10. Sujetadores mecánicos comunes. Modificada de [35].

Las generalidades de diseño del método de DFA que favorecen el ensamblaje manual en cuanto a la manipulación e inserción/fijación se analizan cuidadosamente para identificar si es posible suponer su implementación favorable también para el autoensamblaje de componentes a escala macroscópica. Se reitera que la revisión de antecedentes de diseño adecuado para facilitar el ensamblaje manual no se realiza con la intención de implementar el método de DFA como parte de la tesis. Las generalidades presentadas únicamente constituyen un conjunto de reglas que facilitan el diseño del banco experimental para pruebas de autoensamblaje de clavija en agujero en relación a un diseño que no las considere. Por otra parte, el diseño para el autoensamblaje de clavija en agujero no incluirá obligatoriamente todas las características de diseño que favorezcan su ensamblaje, ya que

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

derivaría en el autoensamblaje más fácil de clavija en agujero. La intención es abordar la metodología de autoensamblaje con un grado de dificultad aceptable que permita obtener conclusiones generales del proceso. En las siguientes secciones, a medida que se desarrolla la problemática abordada y se plantea la implementación física del banco experimental para pruebas de autoensamblaje, estarán indicadas aquellas consideraciones de diseño que sí son aplicadas como parte integral de la solución de la hipótesis de la tesis a partir de las generalidades presentadas en la actual sección.

2.1.3. Ensamblaje de clavija en agujero

El ensamblaje de clavija en agujero representa una tarea de montaje típica con al menos dos componentes a acoplar. Por medio del ensamblaje de clavija en agujero se puede evaluar a la mayoría de los casos de ensamblaje debido a que incluye: 1) la etapa de manipulación en la cual se guía la clavija hacia el agujero o viceversa y 2) la etapa de inserción/fijación que inicia una vez que los componentes se encuentran lo suficientemente cercanos para aplicar las fuerzas y momentos necesarios para su acoplamiento [37]–[41]. Adicionalmente, el ensamblaje de clavija en agujero constituye un 33% de las tareas de acoplamiento dentro una amplia gama de productos [42] y es realizado mediante casi todos los procesos de ensamblaje disponibles (manual, automatizado de propósito general, automatizado de propósito especial o la combinación de estos). Debido a la importancia que representa el ensamblaje de clavija en agujero para la producción, a la complejidad al momento de su realización ocasionada por las incertidumbres geométricas y posicionales que se deben superar, a la amplia investigación, desarrollo e implementación de diferentes métodos con el objetivo de asegurar el proceso sin la ocurrencia de fallas, y a que aun representa un problema abierto a nivel industrial y académico, se selecciona esta tarea de ensamblaje para su estudio y uso dentro del desarrollo de una metodología de autoensamblaje como nueva alternativa de proceso con una amplia visión hacia su implementación en tareas de ensamblaje en general sin restricción para su aplicación en todas las escalas y entornos de producción.

2.1.4. Caso ideal de ensamblaje de clavija en agujero

En el caso ideal de ensamblaje de una clavija en un agujero, ambos ejes son colineales y la superficie inferior de la clavija está paralela a la superficie externa adyacente del agujero simultáneamente, ver Figura 11.

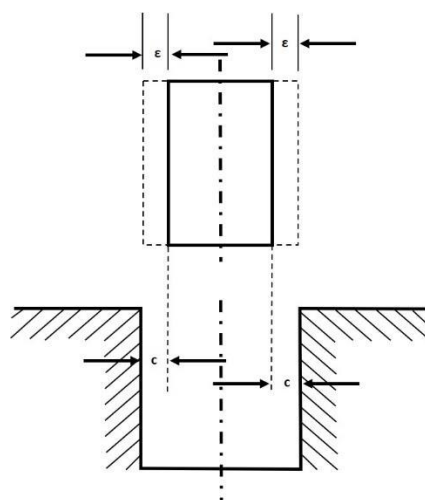


Figura 11. Caso ideal de ensamblaje de clavija en agujero.

Sin embargo, las imperfecciones geométricas derivadas de la manufactura y las variaciones dimensionales de los componentes generan una holgura entre la clavija y el agujero igual a $2c$. Siempre que las imperfecciones geométricas y las variaciones dimensionales de la clavija, representadas por 2ϵ , no excedan la holgura disponible, la inserción es posible. Dado que las imperfecciones geométricas son difíciles de controlar y las variaciones dimensionales son inevitables, se explica parte del por qué el caso ideal de ensamblaje rara vez ocurre en la práctica [43].

En el caso ideal de ensamblaje de clavija en agujero es posible realizar la inserción sin que existan puntos o superficies de contacto entre los dos componentes. Sin embargo, en el caso más general los componentes experimentan contactos a medida que se avanza en la tarea de inserción. Como el caso ideal es poco común de alcanzar, típicamente el ensamblaje de clavija en agujero se ejecuta con error posicional.

2.1.5. El triángulo de fricción

Debido a los contactos que se producen a medida que se realiza el ensamblaje de clavija en agujero es importante conocer a que hace referencia el triángulo de fricción. Para comprender este concepto se selecciona el caso de un punto de contacto de la clavija en la superficie externa adyacente del agujero. La superficie externa adyacente del agujero ejerce una fuerza de contacto sobre la clavija que se puede descomponer en sus componentes normal (F_n) y tangencial (F_t), ver Figura 12.

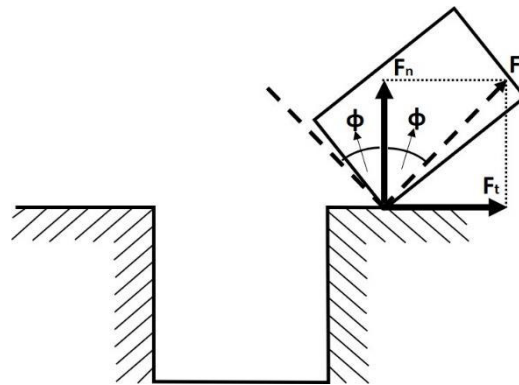


Figura 12. Representación del triángulo de fricción en 2D.

La ley de Coulomb de la fricción indica que la fuerza tangencial (conocida como fuerza de rozamiento) es proporcional a la fuerza normal, ver ecuación (1).

$$F_t = \mu F_n \quad (1)$$

El factor de proporcionalidad que es conocido como coeficiente de rozamiento (μ), depende de varios factores, entre ellos la naturaleza de los materiales en contacto, las características de sus superficies (como rugosidad, limpieza y acabado), y las condiciones de operación, como la temperatura, la velocidad de deslizamiento y la presencia de lubricantes o contaminantes.

Por eso es importante destacar que la ecuación (1) representa una versión simplificada del fenómeno y es útil para describir el comportamiento de la fricción bajo condiciones ideales, no captura todos los aspectos complejos de la fricción en situaciones reales.

A partir de la Figura 12, se obtiene la relación presentada en la ecuación (2), considerando el triángulo rectángulo formado entre la componente normal y tangencial de la fuerza de reacción, y el ángulo ϕ .

$$\tan \phi = \frac{F_t}{F_n} \quad (2)$$

Reemplazando (1) en (2) se llega a la ecuación (3).

$$\tan \phi = \frac{\mu F_n}{F_n} \quad (3)$$

Finalmente, el resultado de la ecuación (4) representa la relación entre el ángulo ϕ que forma el triángulo de fricción y el coeficiente de rozamiento.

$$\phi = \arctan(\mu) \quad (4)$$

Para desplazar la clavija hacia la dirección de inserción se necesita aplicar una fuerza externa que supere en magnitud a la componente tangencial de la fuerza de reacción que se opone al movimiento.

Para entender como iniciar el movimiento entre dos cuerpos en contacto se requiere conocer la diferencia entre dos tipos de rozamiento: el rozamiento estático que ocurre cuando no se produce movimiento entre los cuerpos aun cuando si existe aplicación de una fuerza externa y el rozamiento dinámico que ocurre cuando los cuerpos se mueven uno con respecto al otro. Dependiendo del tipo de rozamiento se tiene coeficiente de rozamiento estático (μ_s) para la fuerza de fricción antes de ocurrir el desplazamiento o coeficiente de rozamiento dinámico (μ_k) para la fuerza de fricción cuando existe desplazamiento.

En cuanto la fuerza externa aplicada sobre la clavija supera en magnitud a la fuerza de fricción estática existirá movimiento y empezará a deslizarse. Para superar la zona de adherencia se debe ejercer una fuerza externa mayor a la fuerza tangencial máxima ($F_{tm\acute{a}x}$), ver ecuación (5).

$$F_{tm\acute{a}x} = \mu_s F_n \quad (5)$$

En la Figura 13 se muestra de manera gráfica el movimiento de cuerpos en contacto en relación a la magnitud de la fuerza externa aplicada.

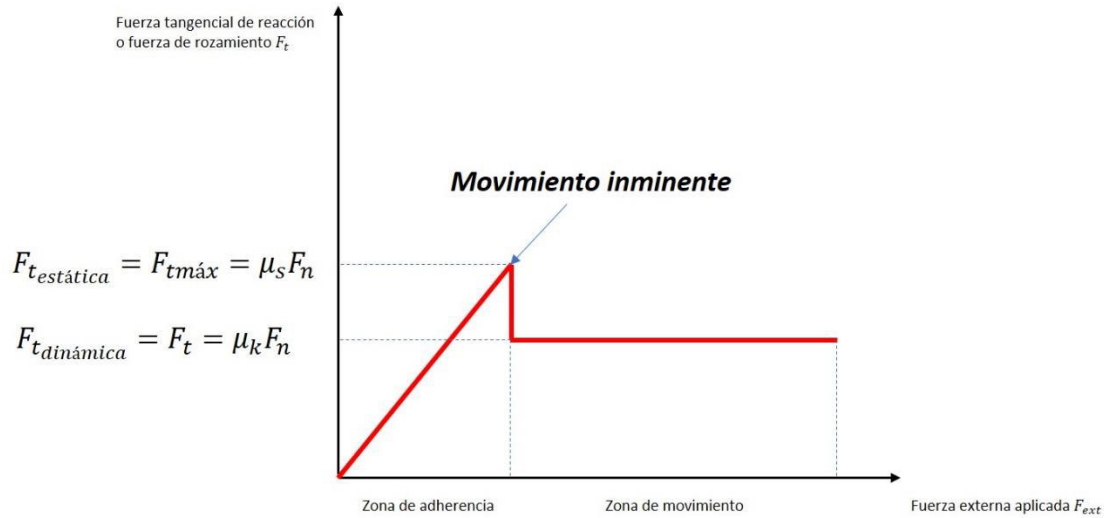


Figura 13. Fuerza externa aplicada para superar la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento de los cuerpos.

Una vez superada la zona de adherencia los cuerpos se deslizarán y la fuerza tangencial dinámica ($F_{t_{dinámica}}$) será menor a la fuerza tangencial estática, ver ecuación (6).

$$F_{t_{dinámica}} = \mu_k F_n \quad (6)$$

La dirección de la fuerza externa aplicada es también importante para lograr superar la zona de adherencia. Para lograr el movimiento de los cuerpos se necesita que la dirección de la fuerza externa aplicada garantice que dicha fuerza se encuentra fuera del triángulo de fricción. Entonces, no basta únicamente con superar la magnitud de la fuerza de fricción estática, ya que, si la fuerza externa aplicada se encuentra dentro del triángulo de fricción, su componente tangencial será cancelada por la fuerza tangencial de rozamiento y no ocurrirá movimiento, ver figura 14.

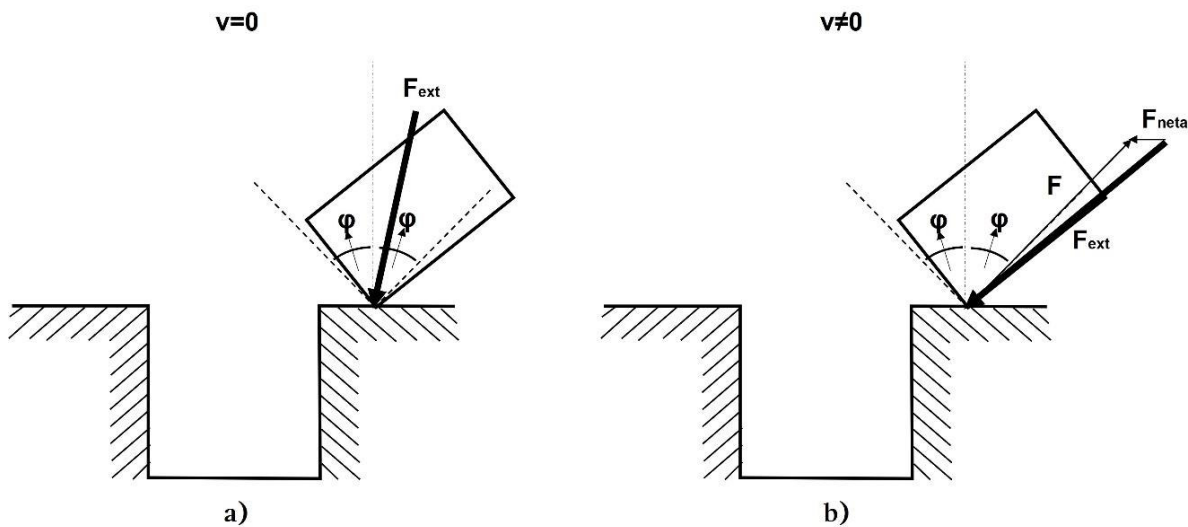


Figura 14. Dirección de la fuerza aplicada en relación al triángulo de fricción: **a)** No ocurre movimiento, **b)** Si ocurre movimiento.

2.1.6. Modos de falla durante la inserción de clavija en agujero

Los aspectos básicos del triángulo de fricción y las implicaciones en relación al desplazamiento de cuerpos en contacto fueron revisadas. Sin embargo, existen dos modos de falla durante la inserción de clavija en agujero, en donde el ensamblaje se interrumpe. Para formalizar los modos de falla conocidos como: bloqueo y acuñaamiento se puede emplear también el triángulo de fricción.

2.1.6.1. bloqueo

En la Figura 15 se muestra la inserción de la clavija con dos puntos de contacto con los lados del agujero, así como sus respectivos triángulos de fricción. Para realizar la inserción de la clavija en el agujero se aplican sobre ella una fuerza y momento externo. La aplicación de la fuerza y momento externo causan fuerzas de reacción aplicadas por el agujero a la clavija.

Dependiendo de si las fuerzas de reacción se encuentran en el interior o en los bordes de los triángulos de fricción en la Figura 15, la clavija se deslizará o no. En el caso donde las fuerzas de reacción se encuentran adentro de los triángulos de fricción se presenta el modo de falla conocido como bloqueo, en el cual la clavija no se mueve con respecto al agujero. Para superar la condición de bloqueo es necesario cambiar la fuerza o el momento externo aplicado con la intención de generar movimiento entre la clavija y el agujero. Cuando las fuerzas de reacción se encuentran en los bordes de los triángulos de fricción existe la posibilidad de deslizamiento y dependerá de si queda alguna fuerza neta paralela a la superficie de contacto. Cuando existen fuerzas paralelas a las superficies de contacto, la clavija se desliza y acelera en dirección de las fuerzas netas. Cuando no quedan fuerzas netas resultantes, entonces la clavija se encuentra en la condición de movimiento inminente, es decir, la clavija se encuentra en equilibrio estático, sin movimiento, al igual que en el modo de falla de bloqueo, pero a diferencia de la condición de bloqueo la clavija está a punto de moverse. Entonces, cualquier cambio suave de la fuerza y el momento aplicado externo permite el desequilibrio causando la aparición de fuerzas netas capaces de provocar el deslizamiento de la clavija.

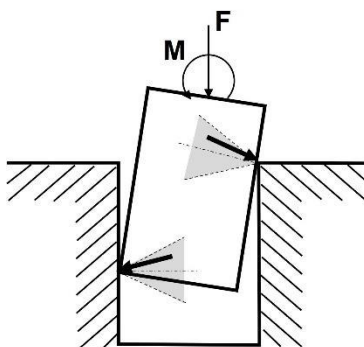


Figura 15. Condición de bloqueo en el ensamblaje de clavija en agujero.

2.1.6.2. Acuñaamiento

En la Figura 16 se considera el mismo caso de la clavija con dos puntos de contacto con las superficies del agujero. Sin embargo, la profundidad de inserción es menor, al mismo tiempo que las posición y orientación de los triángulos de fricción son suavemente diferentes con relación al caso de bloqueo revisado anteriormente.

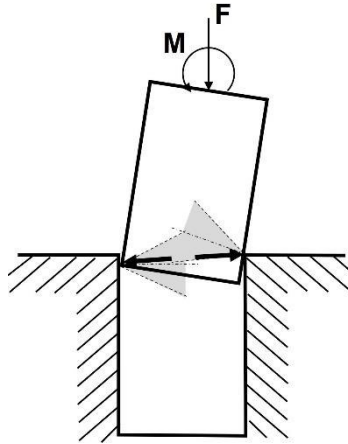


Figura 16. Condición de acuñaamiento en el ensamblaje de clavija en agujero.

A la condición mostrada en la Figura 16, en donde cada triángulo de fricción se encuentra adentro de los límites del otro triángulo de fricción, entrecruzándose uno con otro, se le conoce como acuñaamiento. Para interpretar esta condición de acuñaamiento, es necesario diferenciar dos escenarios: el primero considera tanto la clavija como el agujero como cuerpos no rígidos, es decir, ambos cuerpos tienen alguna rigidez finita (K) que permite su deformación. En este caso, si ocurre bloqueo de la clavija en el agujero, es posible encontrar un estado en el cual alguna componente de las fuerzas de reacción sobre la clavija apunte una hacia la otra, almacenando energía de deformación en la clavija debido a su rigidez finita. Estas componentes de las fuerzas de reacción que almacenan energía de deformación podrían permanecer dentro de los triángulos de fricción incluso si se cambia la fuerza y el momento externo aplicado. Además, si dichas componentes son más grandes en comparación con las fuerzas de reacción generadas por la aplicación de la fuerza o momento externo, es posible finalizar en un estado donde es imposible continuar la inserción.

En el segundo escenario, considerando a la clavija y el agujero como cuerpos perfectamente rígidos, el acuñaamiento también puede ocurrir, aunque el mecanismo es diferente. En este caso, el fenómeno se explica exclusivamente por la geometría de los cuerpos y las fuerzas de fricción en los puntos de contacto. Si las fuerzas resultantes en estos puntos caen dentro de los triángulos de fricción y la orientación relativa de los triángulos genera un estado de equilibrio estático, el movimiento relativo queda bloqueado. Este bloqueo no depende de la deformación de los cuerpos, sino de la incapacidad de las fuerzas externas para superar las fuerzas de reacción generadas por la configuración geométrica y el diseño del ensamblaje.

Por lo tanto, el acuñaamiento puede manifestarse tanto en cuerpos rígidos como en cuerpos no rígidos, aunque las causas que lo producen varían. En ambos casos, el resultado es un bloqueo que puede dificultar o impedir por completo la inserción. La mejor alternativa es plantear estrategias de inserción que garanticen evitar por completo el estado de bloqueo y, con ello, no enfrentar la condición de acuñaamiento al momento de insertar la clavija en el agujero.

2.1.7. Modelo de inserción de clavija en agujero en dos dimensiones

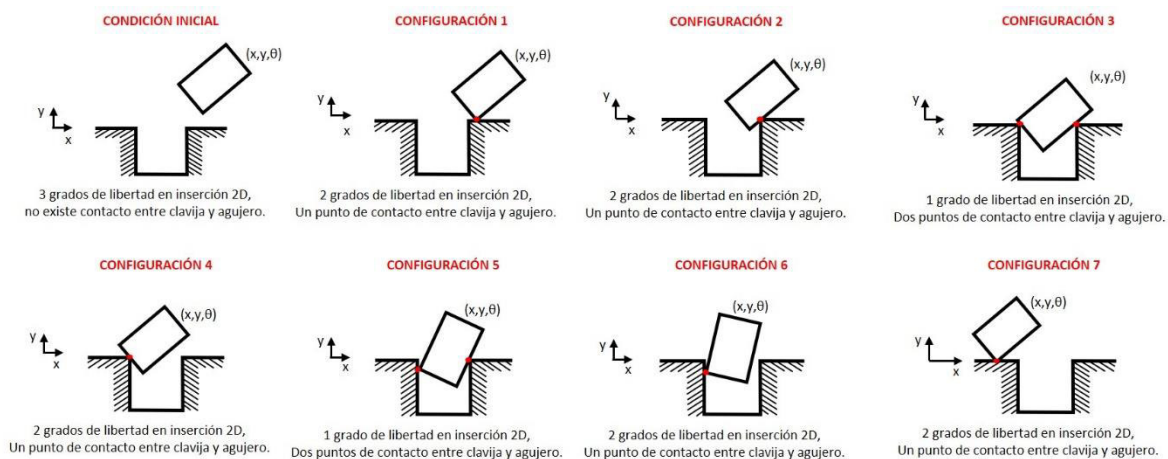
Se debe abordar en este punto el estudio del desarrollo formal del ensamblaje de clavija en agujero con el objetivo de identificar alternativas de ejecución que permiten la correcta inserción de la clavija al tiempo que se evitan las fallas mencionadas anteriormente. El estudio se abordó y revisó a partir de [43]. Al abordar el desarrollo formal se identificó un

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

enfoque en el estado de movimiento inminente, en el cual la clavija está a punto de deslizarse. Este enfoque permite considerar el ensamblaje de clavija en agujero como un sistema cuasiestático dividido en cortos instantes de tiempo, debido a esto la fuerza y momento se establecen como términos estáticos dentro del desarrollo sin restringir el movimiento de la clavija, únicamente se restringen los resultados de velocidades y aceleraciones a ser suficientemente pequeños que no afectan el equilibrio del sistema. Adicionalmente, se asume un único coeficiente de fricción (μ) igual al coeficiente de fricción estático (μ_s) que representa una estimación conservativa del ensamblaje de clavija en agujero. Los componentes se consideran cuerpos rígidos sin masa o inercia rotacional, entonces los efectos de la gravedad son considerados insignificantes. Para comenzar se identifican las posibles configuraciones durante la tarea de inserción de la clavija en agujero en dos dimensiones.

2.1.7.1. Configuraciones de contacto entre clavija y agujero en dos dimensiones

Cuando se observa con detalle la tarea de insertar una clavija en un agujero en dos dimensiones, se identifican un máximo de tres grados de libertad de los componentes (CONDICIÓN INICIAL) en un marco de referencia de dos dimensiones, a saber (x, y, θ) . Además, se identifican por lo menos siete configuraciones de contacto posibles entre los dos componentes que permiten reducir los grados de libertad de los componentes. Entre menos grados de libertad tiene un sistema menos incertidumbre posicional existe. Adicionalmente, no se pueden excluir del estudio a las configuraciones espejo de las siete configuraciones mencionadas anteriormente sin comprobación previa, debido a que no es posible afirmar a priori que representen una única configuración y solamente un cambio en la dirección de la inserción. Las configuraciones espejo se identifican con un símbolo apostrofo ($'$), por ejemplo, la configuración 1' se refiere a la configuración espejo de la configuración 1. Entonces, el ensamblaje de clavija en agujero en dos dimensiones se realiza a partir de un total de 14 configuraciones posibles de contacto entre la clavija y el agujero durante la inserción, ver Figura 17.



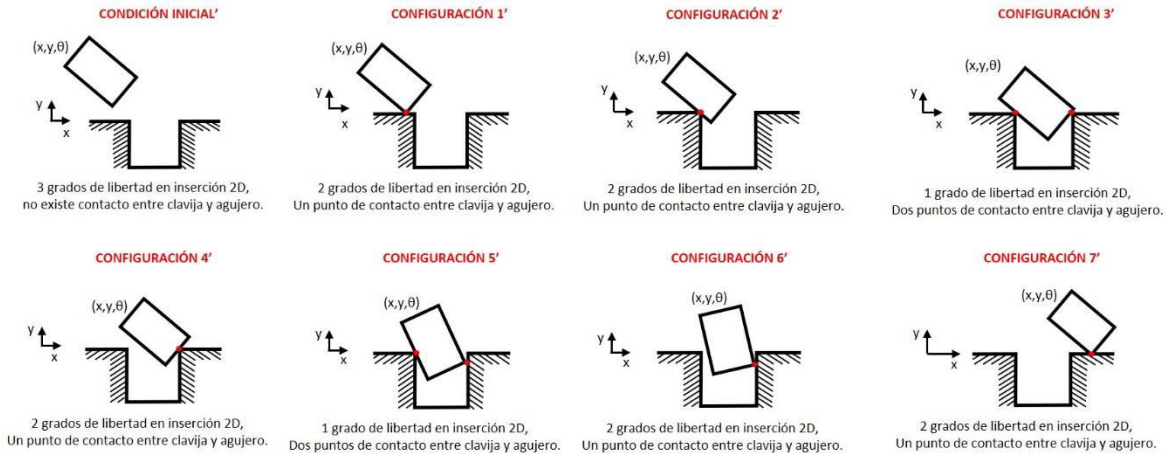


Figura 17. Configuraciones de contacto para el ensamblaje de clavija en agujero en dos dimensiones.

Existen algunas configuraciones adicionales conocidas como configuraciones de transición, teniendo en cuenta que se identifican como posibles estados intermedios entre algún par de las catorce configuraciones principales se presentan de manera separada, ver Figura 18.

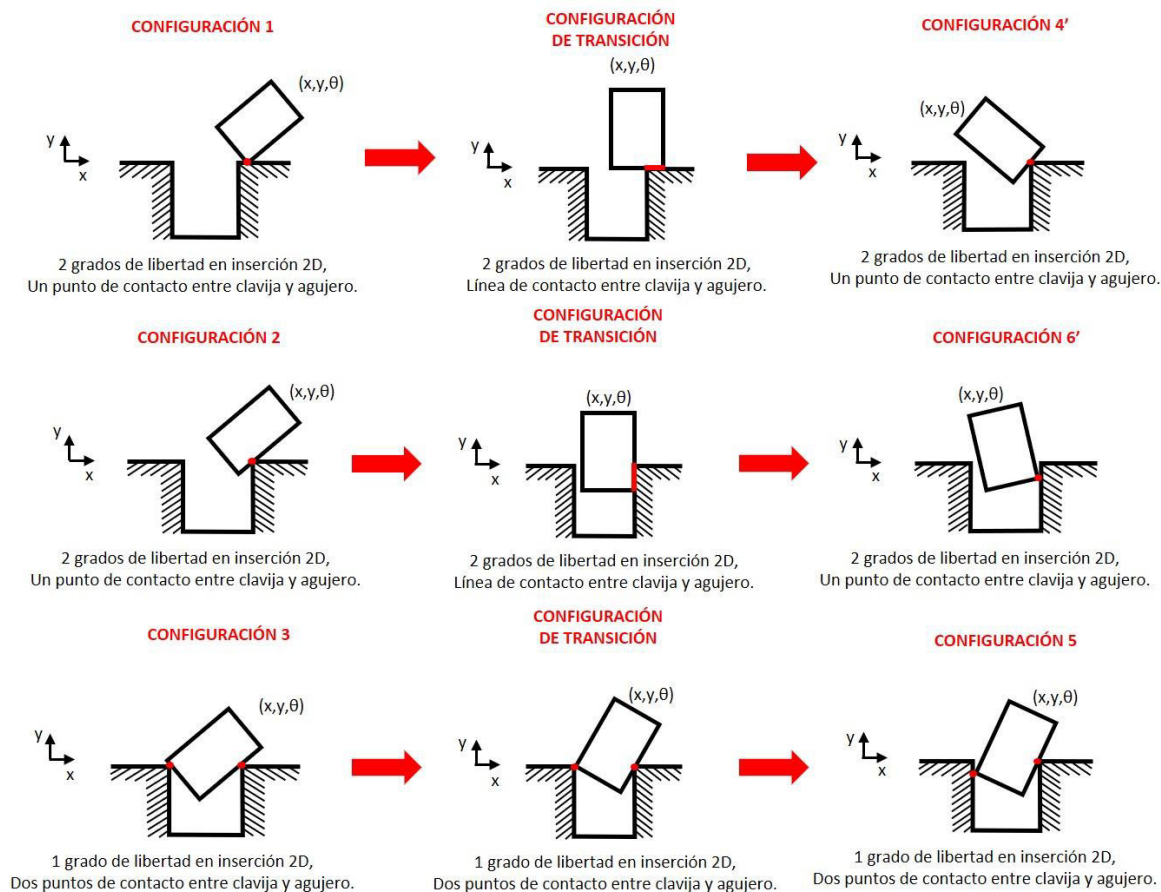


Figura 18. Configuraciones de transición para el ensamblaje de clavija en agujero en dos dimensiones.

La visualización de todas las configuraciones de contacto posibles para el ensamblaje de clavija en agujero representa una manera rápida de comprender el grado de complejidad existente para la tarea de inserción. Además, como se verá más adelante cada configuración

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

representa un problema concreto con solución específica en cuanto a la fuerza y momento necesarios para completar el ensamblaje sin la ocurrencia de fallas.

2.1.7.2. Cinemática de inserción de clavija en agujero en dos dimensiones

Para especificar la posición relativa de cualquier punto perteneciente a la clavija con respecto al agujero, se crea un sistema de coordenadas fijo en la clavija y un sistema de coordenadas fijo en el agujero, ver Figura 19. Entonces, es posible determinar las coordenadas de un punto conocido en alguno de los sistemas de coordenadas con respecto al otro mediante las transformaciones entre los sistemas de coordenadas, considerando los valores conocidos de traslación y rotación del sistema de coordenadas móvil con respecto al sistema de coordenadas fijo, para el caso en dos dimensiones (x_0, y_0, θ) . Además, ya que la clavija y el agujero se consideran cuerpos rígidos, los puntos dentro de cada componente siempre mantendrán una distancia fija con respecto a otro punto en el mismo componente.

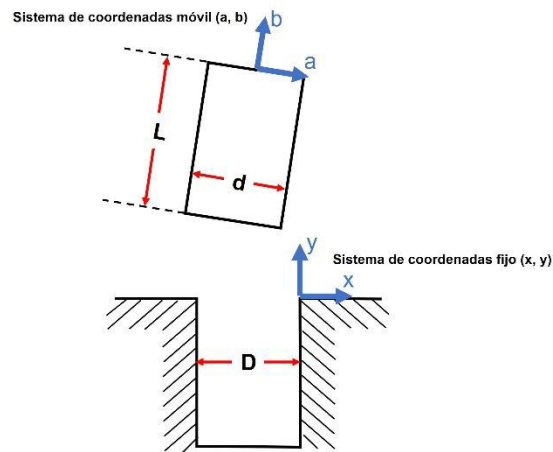


Figura 19. Sistemas de coordenadas para determinar la posición relativa de la clavija con respecto al agujero.

Desarrollando las transformaciones de traslación y rotación entre los sistemas de coordenadas mostrados en la Figura 19 se obtiene la relación entre las coordenadas (x, y) y las coordenadas (a, b) , ver ecuación (7), (8) y (9) para un punto específico localizado en el vértice superior izquierdo de la clavija con coordenadas conocidas (a_1, b_1) , ver Figura 20.

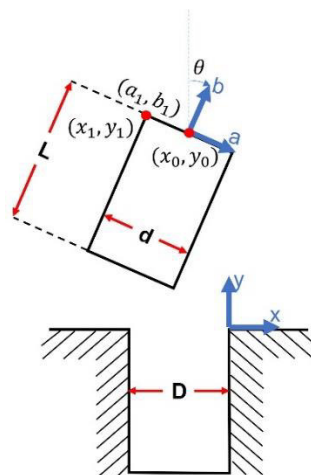


Figura 20. Punto (a_1, b_1) conocido en el sistema de coordenadas (a, b) .

$$(x_1, y_1) = (x_0, y_0) + a_1(\cos\theta, -\sin\theta) + b_1(\sin\theta, \cos\theta) \quad (7)$$

$$x_1 = x_0 + a_1\cos\theta + b_1\sin\theta \quad (8)$$

$$y_1 = y_0 - a_1\sin\theta + b_1\cos\theta \quad (9)$$

Se plantea conocer para el caso de inserción en dos dimensiones, la posición de todos los vértices de la clavija con respecto al sistema de coordenadas fijo en el agujero, ver Figura 21.

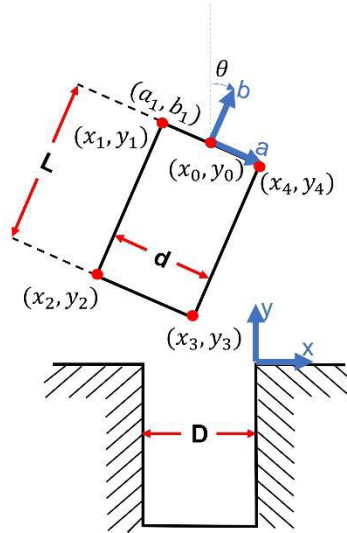


Figura 21. Puntos de interés (vértices de la clavija) para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero.

Siempre que se conozca completamente la posición del sistema de coordenadas móvil ubicado en la clavija y las coordenadas de un punto conocido dentro de la clavija en el sistema de coordenadas asociado es posible desarrollar la transformación de coordenadas entre sistemas con el objetivo de conocer la ubicación de la clavija con respecto al agujero. El procedimiento se muestra a continuación:

Para cualquier (x_0, y_0, θ) , es decir, la posición del sistema de coordenadas ubicado en la clavija con respecto al sistema de coordenadas fijo en el agujero y las coordenadas del vértice superior izquierdo conocidas en el sistema de coordenadas (a, b) , ver ecuaciones (10) y (11), se establecen las ecuaciones que permiten resolver las coordenadas de todos los vértices de la clavija con respecto al agujero, ver ecuaciones (12) hasta (19).

$$a_1 = -\frac{d}{2} \quad (10)$$

$$b_1 = 0 \quad (11)$$

$$x_1 = x_0 + a_1\cos\theta + b_1\sin\theta \quad (12)$$

$$y_1 = y_0 - a_1\sin\theta + b_1\cos\theta \quad (13)$$

$$x_2 = x_1 - L\sin\theta \quad (14)$$

$$y_2 = y_1 - L\cos\theta \quad (15)$$

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada. 23

$$x_3 = x_2 + d\cos\theta \quad (16)$$

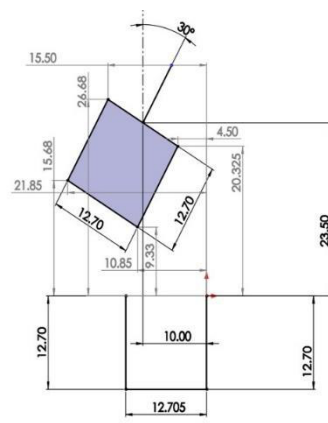
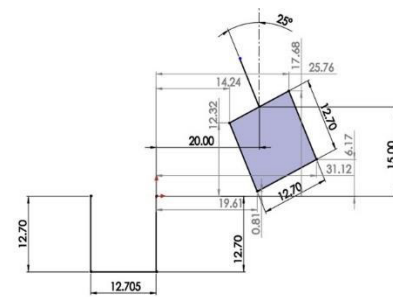
$$y_3 = y_2 - d\sin\theta \quad (17)$$

$$x_4 = x_3 + L\sin\theta \quad (18)$$

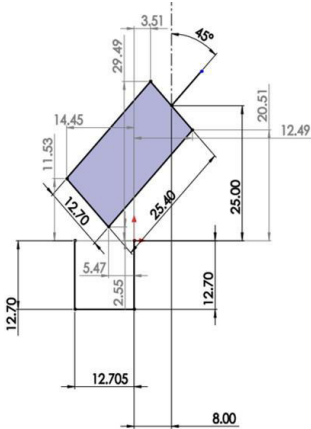
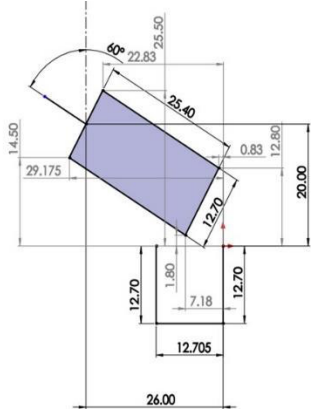
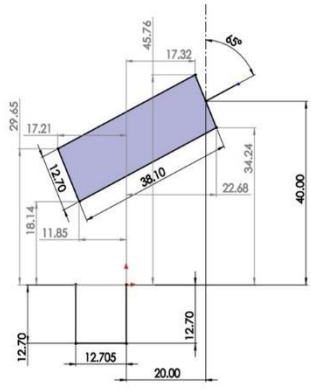
$$y_4 = y_3 + L\cos\theta \quad (19)$$

Para corroborar los resultados del desarrollo mencionado anteriormente se establece algunos casos de clavija con dimensiones geométricas de diámetro de clavija igual a 12.7 mm y diferentes longitudes de clavija que en relación al diámetro son igual, el doble y el triple de su valor. Además, se establecen diferentes posiciones relativas del sistema de coordenadas localizado en la clavija con respecto al agujero, es decir, valores diferentes de (x_0, y_0, θ) , y se considera el diámetro del agujero de 12.705 mm que asegura la existencia de holgura e inserción de la clavija. Con el uso del software Engineering Equation Solver® (EES) se resuelven las ecuaciones de manera rápida y se validan con el uso del software de ingeniería asistida por computadora SolidWorks®. En la tabla 1 se presentan los datos de entrada, el resultado de las coordenadas x y y para cada vértice de la clavija mediante la resolución del sistema de ecuación en EES® y los resultados mediante el método gráfico realizado en SolidWorks®.

Tabla 1. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero.

Datos de entrada	Resultados en EES®	Resultados en SolidWorks®
Grados de libertad $x_0 = -10 \text{ mm}$ $y_0 = 23.5 \text{ mm}$ $\theta = 30^\circ$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = -15.50 \text{ mm}$ $y_1 = 26.68 \text{ mm}$ $x_2 = -21.85 \text{ mm}$ $y_2 = 15.68 \text{ mm}$ $x_3 = -10.85 \text{ mm}$ $y_3 = 9.33 \text{ mm}$ $x_4 = -4.50 \text{ mm}$ $y_4 = 20.325 \text{ mm}$	
Grados de libertad $x_0 = 20 \text{ mm}$ $y_0 = 15 \text{ mm}$ $\theta = -25^\circ$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = 14.24 \text{ mm}$ $y_1 = 12.32 \text{ mm}$ $x_2 = 19.61 \text{ mm}$ $y_2 = 0.81 \text{ mm}$ $x_3 = 31.12 \text{ mm}$ $y_3 = 6.17 \text{ mm}$ $x_4 = 25.76 \text{ mm}$ $y_4 = 17.68 \text{ mm}$	

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Grados de libertad $x_0 = 8 \text{ mm}$ $y_0 = 25 \text{ mm}$ $\theta = 45^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = 3.51 \text{ mm}$ $y_1 = 29.49 \text{ mm}$ $x_2 = -14.45 \text{ mm}$ $y_2 = 11.53 \text{ mm}$ $x_3 = -5.47 \text{ mm}$ $y_3 = 2.55 \text{ mm}$ $x_4 = 12.49 \text{ mm}$ $y_4 = 20.51 \text{ mm}$	
Grados de libertad $x_0 = -26 \text{ mm}$ $y_0 = 20 \text{ mm}$ $\theta = -60^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = -29.175 \text{ mm}$ $y_1 = 14.50 \text{ mm}$ $x_2 = -7.18 \text{ mm}$ $y_2 = 1.80 \text{ mm}$ $x_3 = -0.83 \text{ mm}$ $y_3 = 12.80 \text{ mm}$ $x_4 = -22.83 \text{ mm}$ $y_4 = 25.50 \text{ mm}$	
Grados de libertad $x_0 = 20 \text{ mm}$ $y_0 = 40 \text{ mm}$ $\theta = 65^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = 17.32 \text{ mm}$ $y_1 = 45.76 \text{ mm}$ $x_2 = -17.21 \text{ mm}$ $y_2 = 29.65 \text{ mm}$ $x_3 = -11.85 \text{ mm}$ $y_3 = 18.14 \text{ mm}$ $x_4 = 22.68 \text{ mm}$ $y_4 = 34.24 \text{ mm}$	

Grados de libertad $x_0 = -39 \text{ mm}$ $y_0 = 12 \text{ mm}$ $\theta = -85^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$	$x_1 = -39.55 \text{ mm}$ $y_1 = 5.67 \text{ mm}$ $x_2 = -1.60 \text{ mm}$ $y_2 = 2.35 \text{ mm}$ $x_3 = -0.49 \text{ mm}$ $y_3 = 15.01 \text{ mm}$ $x_4 = -38.45 \text{ mm}$ $y_4 = 18.33 \text{ mm}$	
---	--	--

El procedimiento se puede aplicar para conocer la posición de la clavija con respecto al agujero en la condición inicial de la Figura 17, es decir, cuando existen tres grados de libertad para el caso de inserción en dos dimensiones. Sin embargo, teniendo en cuenta las configuraciones de contacto identificadas anteriormente se puede reducir la incertidumbre posicional de la clavija y como consecuencia reducir los grados de libertad, resultando en un método menos engorroso para conocer la posición de la clavija con respecto al agujero.

A continuación, se desarrolla el método alternativo para las configuraciones de contacto 3 y 5, convenientemente seleccionadas por la menor cantidad de grados de libertad. Además, que dichas configuraciones representan un camino adecuado hacia la inserción de la clavija en el agujero, situación que es objetivo prioritario de la tesis.

Partiendo de la configuración de contacto 3, se pueden definir los parámetros lineales de contacto s y l , ver Figura 22.

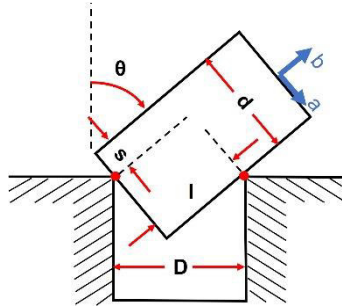


Figura 22. Parámetros lineales de contacto para la configuración 3.

Entonces mediante relaciones geométricas se establecen las ecuaciones (20) y (21):

$$(d - s)\cos\theta + l\sin\theta = D \quad (20)$$

$$(d - s)\sin\theta = l\cos\theta \quad (21)$$

Al resolver para s y l se observa que al restringir la posición de la clavija con respecto al agujero mediante la configuración de contacto 3, efectivamente se reduce a un grado de libertad y se determina la posición de la clavija únicamente en función de θ , ver ecuaciones (22) y (23).

$$s = d - D\cos\theta \quad (22)$$

$$l = D \sin \theta \quad (23)$$

Los grados de libertad en la configuración de contacto 3 se reducen ya que la ubicación de los puntos de contacto, ver Figura 23, queda totalmente definida geoméricamente, ver ecuaciones desde (24) hasta (27). Entonces, para diferentes valores de θ se obtienen los valores de los parámetros lineales s y l con respecto al agujero y es posible determinar completamente la posición de la clavija con respecto del agujero.

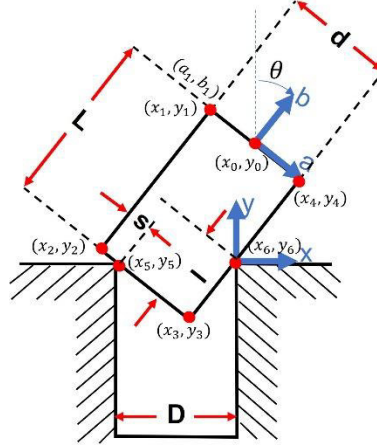


Figura 23. Puntos de contacto para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero en la configuración 3.

$$x_5 = -D \quad (24)$$

$$y_5 = 0 \quad (25)$$

$$x_6 = 0 \quad (26)$$

$$y_6 = 0 \quad (27)$$

A partir de la ubicación de los puntos de contacto conocida se obtiene la localización de todos los vértices de la clavija para la configuración de contacto 3, resolviendo inicialmente las ecuaciones (28) hasta (31), y finalmente utilizando nuevamente las ecuaciones (10) hasta (19) para valores conocidos de d , L y D .

$$x_5 = x_2 + s \cos \theta \quad (28)$$

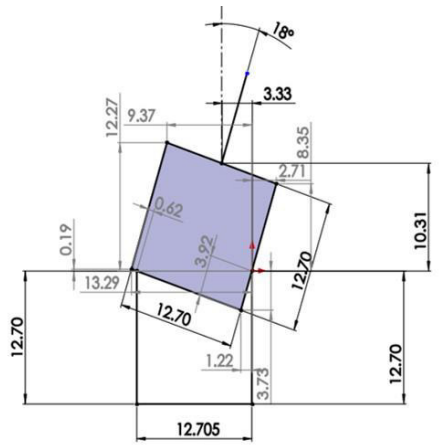
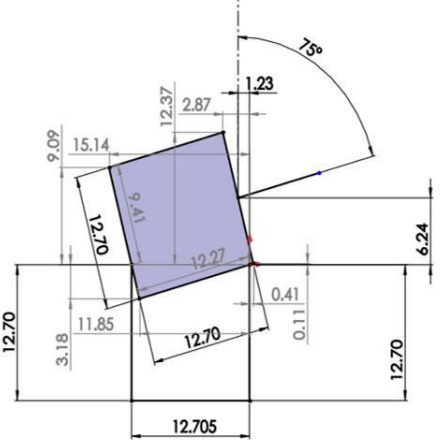
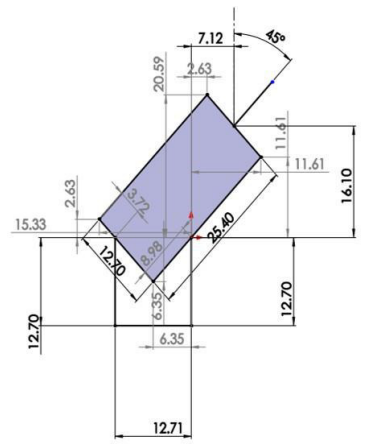
$$y_5 = y_2 - s \sin \theta \quad (29)$$

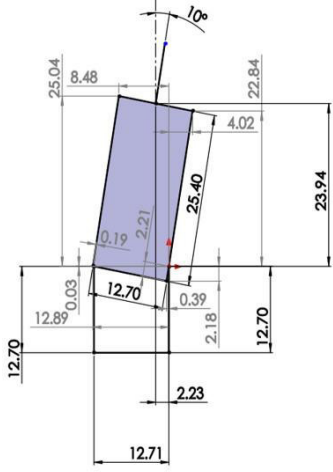
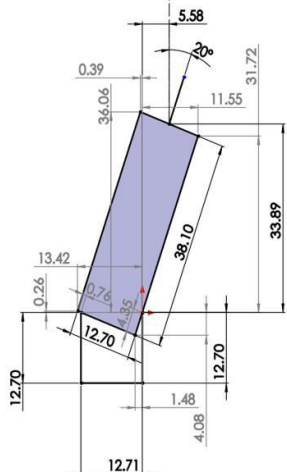
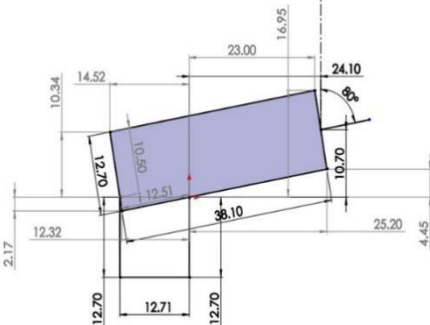
$$x_6 = x_3 + l \sin \theta \quad (30)$$

$$y_6 = y_3 + l \cos \theta \quad (31)$$

En la tabla 2 se presentan los datos de entrada, el resultado de los parámetros lineales s y l y el resultado de las coordenadas x y y para cada vértice de la clavija mediante la resolución del sistema de ecuación en EES® y los resultados mediante el método gráfico realizado en SolidWorks®.

Tabla 2. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero para la configuración de contacto 3.

Datos de entrada	Resultados en EES®	Resultados en SolidWorks®
Grados de libertad $\theta = 18^\circ$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 0.62 \text{ mm}$ $l = 3.93 \text{ mm}$ $x_0 = -3.33 \text{ mm}$ $y_0 = 10.31 \text{ mm}$ $x_1 = -9.37 \text{ mm}$ $y_1 = 12.27 \text{ mm}$ $x_2 = -13.29 \text{ mm}$ $y_2 = 0.19 \text{ mm}$ $x_3 = -1.21 \text{ mm}$ $y_3 = -3.73 \text{ mm}$ $x_4 = 2.71 \text{ mm}$ $y_4 = 8.34 \text{ mm}$	
Grados de libertad $\theta = 75^\circ$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 9.41 \text{ mm}$ $l = 12.27 \text{ mm}$ $x_0 = -1.23 \text{ mm}$ $y_0 = 6.24 \text{ mm}$ $x_1 = -2.87 \text{ mm}$ $y_1 = 12.38 \text{ mm}$ $x_2 = -15.14 \text{ mm}$ $y_2 = 9.09 \text{ mm}$ $x_3 = -11.85 \text{ mm}$ $y_3 = -3.18 \text{ mm}$ $x_4 = 0.41 \text{ mm}$ $y_4 = 0.11 \text{ mm}$	
Grados de libertad $\theta = 45^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 3.72 \text{ mm}$ $l = 8.98 \text{ mm}$ $x_0 = 7.12 \text{ mm}$ $y_0 = 16.10 \text{ mm}$ $x_1 = 2.63 \text{ mm}$ $y_1 = 20.59 \text{ mm}$ $x_2 = -15.33 \text{ mm}$ $y_2 = 2.63 \text{ mm}$ $x_3 = -6.35 \text{ mm}$ $y_3 = -6.35 \text{ mm}$ $x_4 = 11.61 \text{ mm}$ $y_4 = 11.61 \text{ mm}$	

Grados de libertad $\theta = 10^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 0.19 \text{ mm}$ $l = 2.21 \text{ mm}$ $x_0 = -2.23 \text{ mm}$ $y_0 = 23.94 \text{ mm}$ $x_1 = -8.48 \text{ mm}$ $y_1 = 25.05 \text{ mm}$ $x_2 = -12.89 \text{ mm}$ $y_2 = 0.03 \text{ mm}$ $x_3 = -0.38 \text{ mm}$ $y_3 = -2.17 \text{ mm}$ $x_4 = 4.03 \text{ mm}$ $y_4 = 22.84 \text{ mm}$	
Grados de libertad $\theta = 20^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 0.76 \text{ mm}$ $l = 4.35 \text{ mm}$ $x_0 = 5.58 \text{ mm}$ $y_0 = 33.89 \text{ mm}$ $x_1 = -0.39 \text{ mm}$ $y_1 = 36.06 \text{ mm}$ $x_2 = -13.42 \text{ mm}$ $y_2 = 0.26 \text{ mm}$ $x_3 = -1.49 \text{ mm}$ $y_3 = -4.08 \text{ mm}$ $x_4 = 11.54 \text{ mm}$ $y_4 = 31.72 \text{ mm}$	
Grados de libertad $\theta = 80^\circ$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$s = 10.49 \text{ mm}$ $l = 12.51 \text{ mm}$ $x_0 = 24.10 \text{ mm}$ $y_0 = 10.70 \text{ mm}$ $x_1 = 22.99 \text{ mm}$ $y_1 = 16.95 \text{ mm}$ $x_2 = -14.53 \text{ mm}$ $y_2 = 10.33 \text{ mm}$ $x_3 = -12.32 \text{ mm}$ $y_3 = -2.17 \text{ mm}$ $x_4 = 25.20 \text{ mm}$ $y_4 = 4.44 \text{ mm}$	

De manera general es posible graficar la cinemática de todos los vértices de la clavija en la configuración de contacto 3 para valores de θ en el rango de $1.607^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Para la clavija con $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 12.7 \text{ mm}$ y agujero con $D = 12.705 \text{ mm}$, ver Figura 24.

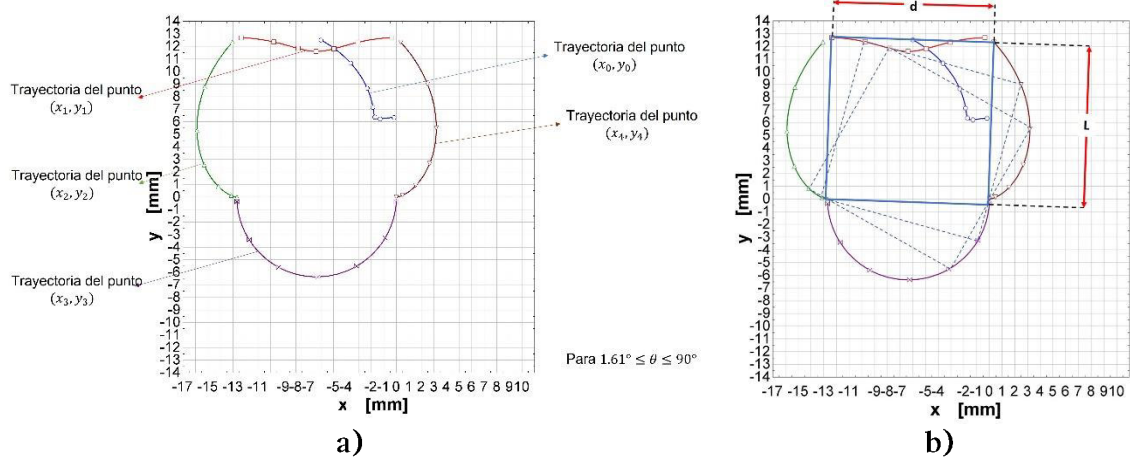


Figura 24. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 3: **a)** Trayectorias de diferentes puntos, **b)** movimiento de la clavija.

Considerando clavijas con igual diámetro $d = 12.7 \text{ mm}$, pero con diferentes longitudes $L = 12.7 \text{ mm}$, $L = 25.4 \text{ mm}$ y $L = 38.1 \text{ mm}$, ver Figura 25. Se observan diferencias cinemáticas que deben considerarse en el desarrollo de la metodología para el autoensamblaje de clavija en agujero.

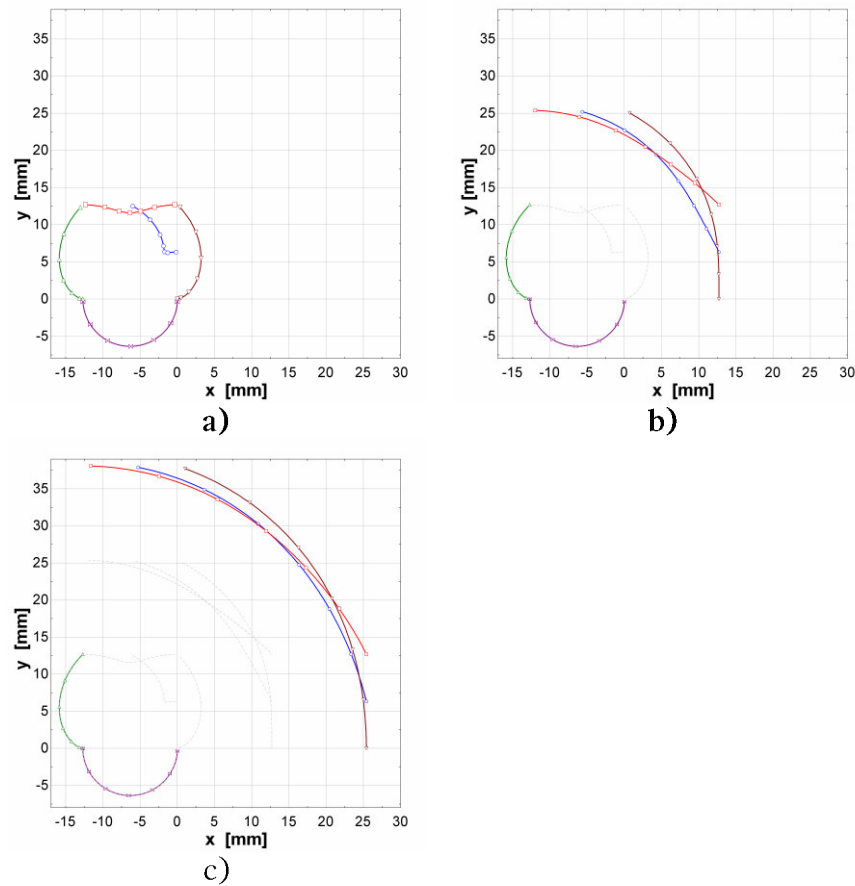


Figura 25. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 3: **a)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 12.7 \text{ mm}$, **b)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 25.4 \text{ mm}$, **c)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 38.1 \text{ mm}$.

Similarmente es posible desarrollar la cinemática de la configuración de contacto 5, definiendo el parámetro lineal de contacto l , ver Figura 26.

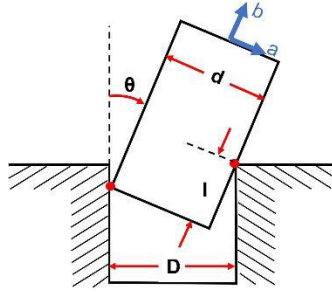


Figura 26. Parámetro lineal de contacto para la configuración 5.

Entonces se establece la ecuación (32):

$$l = \frac{D - d \cos \theta}{\sin \theta} \quad (32)$$

Los grados de libertad en la configuración de contacto 5 se reducen ya que la ubicación de los puntos de contacto, ver Figura 27, queda totalmente definida geoméricamente, ver ecuaciones desde (33) hasta (36). Entonces, para diferentes valores del parámetro L_{agujero} que representa la profundidad alcanzada por la clavija dentro del agujero, se obtiene el valor del parámetro lineal l y es posible determinar completamente la posición de la clavija con respecto del agujero.

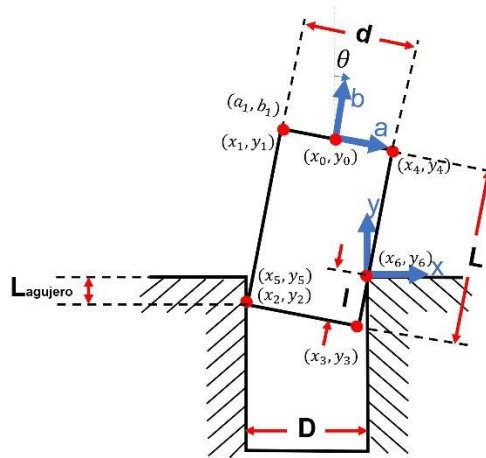


Figura 27. Puntos de contacto para determinar la posición de la clavija con respecto al agujero en la configuración 5.

$$x_5 = -D \quad (33)$$

$$y_5 = -L_{\text{agujero}} \quad (34)$$

$$x_6 = 0 \quad (35)$$

$$y_6 = 0 \quad (36)$$

A partir de la ubicación de los puntos de contacto conocida se obtiene la localización de todos los vértices de la clavija para la configuración de contacto 5, resolviendo inicialmente

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada. 31

las ecuaciones (37) hasta (40), y finalmente utilizando nuevamente las ecuaciones (10) hasta (19) para valores conocidos de d , L y D .

$$x_5 = x_2 \quad (37)$$

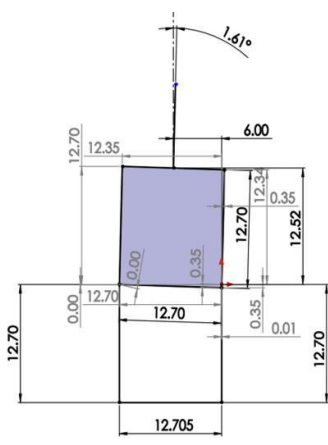
$$y_5 = y_2 \quad (38)$$

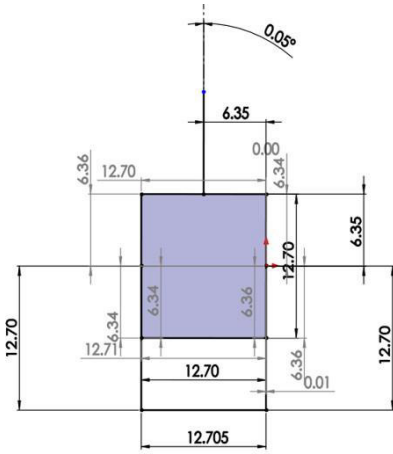
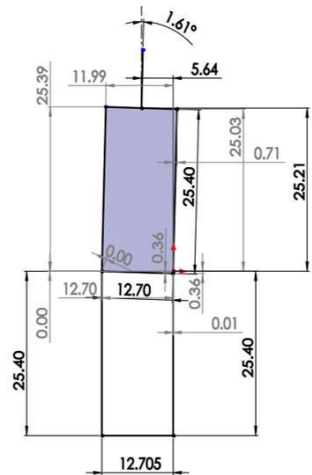
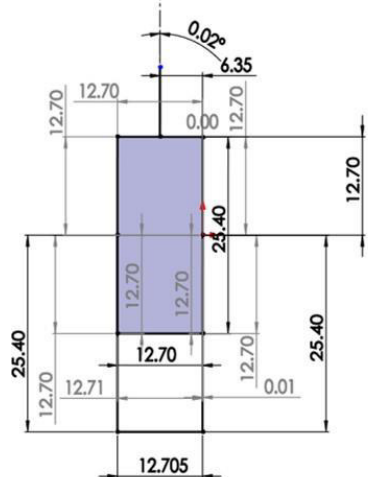
$$x_6 = x_3 + l \sin \theta \quad (39)$$

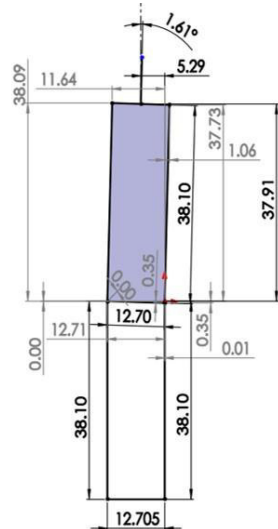
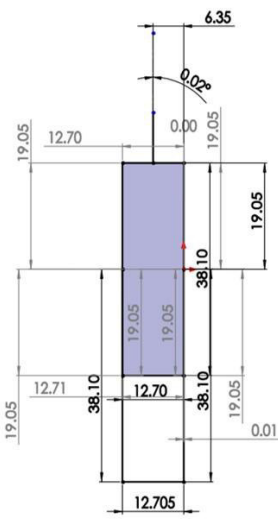
$$y_6 = y_3 + l \cos \theta \quad (40)$$

En la tabla 3 se presentan los datos de entrada, el resultado del parámetro lineal l y el resultado de las coordenadas x y y para cada vértice de la clavija mediante la resolución del sistema de ecuación en EES® y los resultados mediante el método gráfico realizado en SolidWorks®. En la configuración de contacto 5 se obtiene un resultado importante para el desarrollo de la metodología para el autoensamblaje de clavija en agujero a escala macroscópica, dicho resultado corresponde al valor del ángulo $\theta = 1.607^\circ$ correspondiente a la transición desde la configuración 3 a la configuración 5. Para valores por debajo del ángulo mencionado anteriormente la clavija se encuentra adentro del agujero y su inserción se realiza con pequeñas variaciones del ángulo.

Tabla 3. Validación de los resultados cinemáticos de la posición de la clavija con respecto al agujero para la configuración de contacto 5.

Datos de entrada	Resultados en EES®	Resultados en SolidWorks®
Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 0 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 0.36 \text{ mm}$ $x_0 = -6 \text{ mm}$ $y_0 = 12.52 \text{ mm}$ $\theta = 1.61^\circ$ $x_1 = -12.35 \text{ mm}$ $y_1 = 12.70 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = 0 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -0.36 \text{ mm}$ $x_4 = 0.35 \text{ mm}$ $y_4 = 12.34 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$	

Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 6.35 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = L = 12.7 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 6.36 \text{ mm}$ $x_0 = -6.35 \text{ mm}$ $y_0 = 6.35 \text{ mm}$ $\theta = 0.05^\circ$ $x_1 = -12.70 \text{ mm}$ $y_1 = 6.35 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = -6.35 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -6.36 \text{ mm}$ $x_4 = 0 \text{ mm}$ $y_4 = 6.34 \text{ mm}$ $y_5 = -6.35 \text{ mm}$	
Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 0 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 0.36 \text{ mm}$ $x_0 = -5.64 \text{ mm}$ $y_0 = 25.21 \text{ mm}$ $\theta = 1.61^\circ$ $x_1 = -11.99 \text{ mm}$ $y_1 = 25.39 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = 0 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -0.36 \text{ mm}$ $x_4 = 0.70 \text{ mm}$ $y_4 = 25.03 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$	
Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 12.7 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 25.4 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 12.71 \text{ mm}$ $x_0 = -6.35 \text{ mm}$ $y_0 = 12.70 \text{ mm}$ $\theta = 0.02^\circ$ $x_1 = -12.70 \text{ mm}$ $y_1 = 12.70 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = -12.70 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -12.70 \text{ mm}$ $x_4 = 0 \text{ mm}$ $y_4 = 12.69 \text{ mm}$ $y_5 = -12.7 \text{ mm}$	

Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 0 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 0.36 \text{ mm}$ $x_0 = -5.29 \text{ mm}$ $y_0 = 37.91 \text{ mm}$ $\theta = 1.61^\circ$ $x_1 = -11.64 \text{ mm}$ $y_1 = 38.09 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = 0 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -0.36 \text{ mm}$ $x_4 = 1.06 \text{ mm}$ $y_4 = 37.73 \text{ mm}$ $y_5 = 0 \text{ mm}$	
Grados de libertad $L_{\text{agujero}} = 19.05 \text{ mm}$ Datos conocidos $d = 12.7 \text{ mm}$ $L = 38.1 \text{ mm}$ $D = 12.705 \text{ mm}$ $a_1 = -6.35 \text{ mm}$ $b_1 = 0 \text{ mm}$ $x_5 = -12.705 \text{ mm}$ $x_6 = 0 \text{ mm}$ $y_6 = 0 \text{ mm}$	$l = 19.05 \text{ mm}$ $x_0 = -6.35 \text{ mm}$ $y_0 = 19.05 \text{ mm}$ $\theta = 0.02^\circ$ $x_1 = -12.70 \text{ mm}$ $y_1 = 19.05 \text{ mm}$ $x_2 = -12.71 \text{ mm}$ $y_2 = -19.05 \text{ mm}$ $x_3 = -0.01 \text{ mm}$ $y_3 = -19.05 \text{ mm}$ $x_4 = 0 \text{ mm}$ $y_4 = 19.05 \text{ mm}$ $y_5 = -19.05 \text{ mm}$	

De manera general es posible graficar la cinemática de todos los vértices de la clavija en la configuración de contacto 5 para valores de θ menores a 1.607° . Para la clavija con $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 12.7 \text{ mm}$ y agujero con $D = 12.705 \text{ mm}$, ver Figura 28.

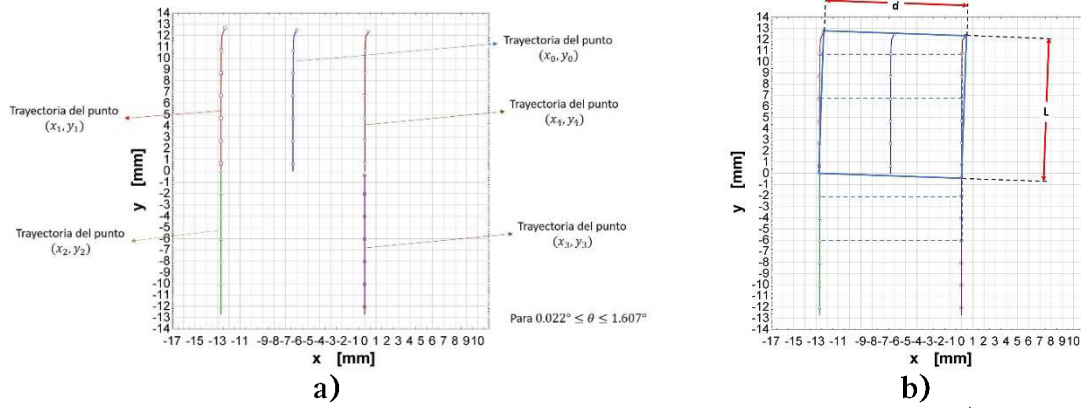


Figura 28. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 5: **a)** Trayectorias de diferentes puntos, **b)** movimiento de la clavija.

Considerando clavijas con igual diámetro $d = 12.7 \text{ mm}$, pero con diferentes longitudes $L = 12.7 \text{ mm}$, $L = 25.4 \text{ mm}$ y $L = 38.1 \text{ mm}$, ver Figura 29. Se observa que la cinemática de la clavija a partir de la transición entre las configuraciones de contacto 3 y 5 es similar para todos los casos, debido a que la clavija se encuentra restringida por el agujero una vez empieza la inserción.

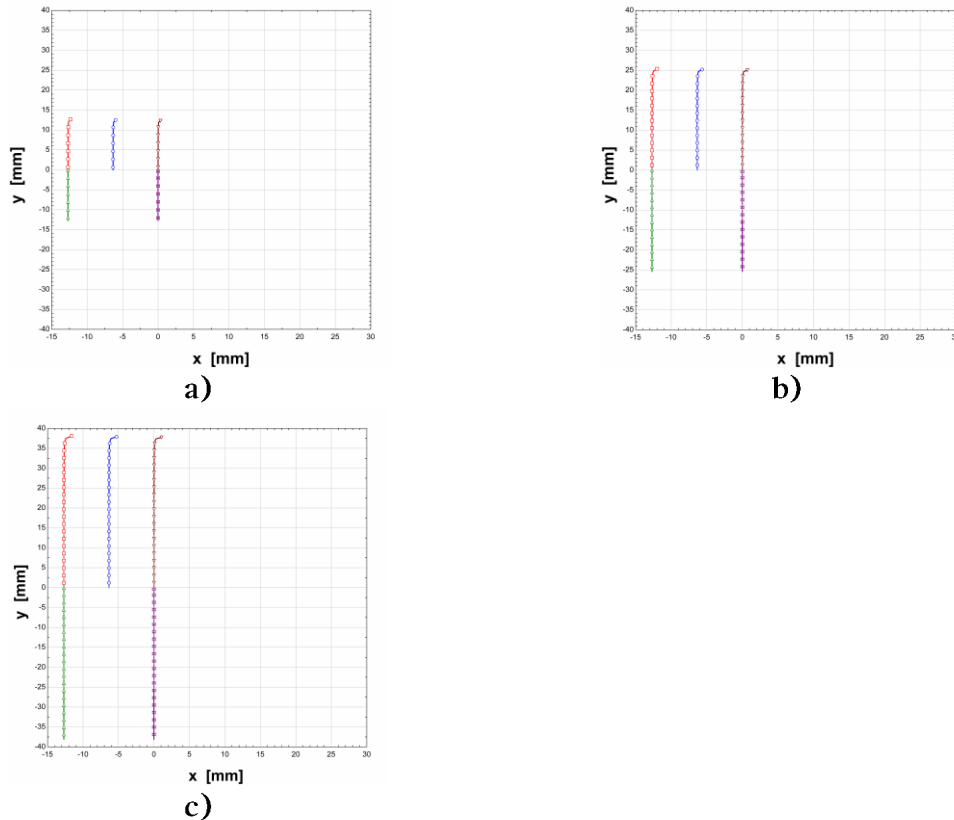


Figura 29. Cinemática de la clavija con respecto al agujero en la configuración de contacto 5: **a)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 12.7 \text{ mm}$, **b)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 25.4 \text{ mm}$, **c)** $d = 12.7 \text{ mm}$, $L = 38.1 \text{ mm}$.

Los resultados de la cinemática de la clavija considerando las configuraciones de contacto 3 y 5 permiten tener en cuenta consideraciones importante al momento de plantear la metodología de autoensamblaje de clavija en agujero. Se observa mayor dificultad en la etapa

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

de manipulación de la clavija para diferentes longitudes al contrario de la etapa de inserción/fijación desde el punto de vista cinemático del ensamblaje. Además, se obtuvo el ángulo θ de transición entre las configuraciones de contacto 3 y 5, el cual coincide con la transición entre la etapa de manipulación e inserción/fijación para el ensamblaje de clavija en agujero.

2.1.7.3. Análisis cuasiestático de fuerzas para la inserción de clavija en agujero en dos dimensiones

En la sección anterior se realizó un estudio de movimiento de la clavija con respecto al agujero con el objetivo de llevar a cabo su inserción mediante las configuraciones de contacto 3 y 5. Sin embargo, no se consideraron las fuerzas que producen las trayectorias descritas anteriormente. En la sección actual se asume estado de movimiento inminente, es decir, con las fuerzas de reacción localizadas en los límites de los triángulos de fricción con el objetivo de identificar las fuerzas necesarias para ejecutar el ensamblaje. El desplazamiento de la clavija se asume en la dirección de inserción al agujero y se plantea un análisis cuasiestático.

El diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 3 se presenta en la Figura 30. El cálculo de las fuerzas y momentos se realiza por medio de la sumatoria de fuerzas y momentos, ver ecuaciones (41), (42) y (43). Las sumatorias se igualan a cero ya que el ensamblaje de clavija en agujero se está planteando cuasiestático, es decir, como una sucesión de n estados de equilibrio.

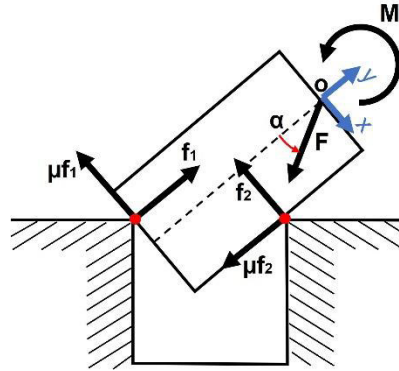


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 3.

$$\sum F_x = F \sin \alpha - \mu f_1 - f_2 = 0 \quad (41)$$

$$\sum F_y = -F \cos \alpha + f_1 - \mu f_2 = 0 \quad (42)$$

$$\sum M_o = M - \mu f_1 L - f_1 \left(\frac{d}{2} - s \right) - \mu f_2 \frac{d}{2} - f_2 (L - l) = 0 \quad (43)$$

A partir de la sumatoria de fuerzas se obtienen las ecuaciones (44) y (45) que relacionan las fuerzas de reacción f_1 y f_2 con la fuerza externa aplicada F , su ángulo de aplicación α y el coeficiente de fricción μ .

$$f_1 = F \left(\frac{\mu \sin \alpha + \cos \alpha}{\mu^2 + 1} \right) \quad (44)$$

$$f_2 = F \left(\frac{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}{\mu^2 + 1} \right) \quad (45)$$

Los resultados obtenidos para las fuerzas de reacción y los parámetros lineales s y l establecidos para la configuración de contacto 3 se reemplazan en la sumatoria de momentos alrededor del punto o para obtener la ecuación (46).

$$M = F \sin \alpha \left[L + D \left(\frac{\mu \cos \theta - \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] + F \cos \alpha \left[-\frac{d}{2} + D \left(\frac{\cos \theta + \mu \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] \quad (46)$$

El resultado representa la relación entre el momento y fuerza aplicados para mantener la inserción en estado de movimiento inminente en un ángulo de inclinación de la clavija θ establecido.

La aplicación de la configuración de contacto 3 se establece mediante el contacto en dos puntos con la parte superior del agujero. Entonces, es evidente que se debe garantizar dichos contactos, es decir, es necesario que $f_1 \geq 0$ y $f_2 \geq 0$. Resolviendo a partir de los resultados de la sumatoria de fuerzas se encuentran los límites del ángulo α de aplicación de la fuerza externa, ver ecuaciones (47) y (48).

$$\alpha \geq \arctan \left(-\frac{1}{\mu} \right) \quad (47)$$

$$\alpha \geq \arctan (\mu) \quad (48)$$

Si ahora se considera una pequeña variación δ en la fuerza de reacción tangencial $f_{tangencial}$ capaz de causar una pequeña fuerza neta como se explicó mediante el triángulo de fricción. Entonces, se alcanza el desequilibrio del estado de movimiento inminente, es decir, un estado de deslizamiento para el cual $f_{tangencial} \rightarrow f_{tangencial} + \delta$ con $0 < \delta \ll 1$. Para establecer la pequeña variación para la configuración de contacto 3 basta con reemplazar las componentes tangenciales μf_1 y μf_2 por $\mu f_1 + \delta$ y $\mu f_2 + \delta$, con lo cual se obtienen nuevas sumatoria de fuerzas y momentos, ver ecuaciones (49), (50) y (51).

$$\sum F_x = F \sin \alpha - (\mu f_1 + \delta) - f_2 = 0 \quad (49)$$

$$\sum F_y = -F \cos \alpha + f_1 - (\mu f_2 + \delta) = 0 \quad (50)$$

$$\sum M_o = M - (\mu f_1 + \delta)L - f_1 \left(\frac{d}{2} - s \right) - (\mu f_2 + \delta) \frac{d}{2} - f_2(L - l) = 0 \quad (51)$$

Partiendo de las nuevas ecuaciones para la sumatoria de fuerzas y momentos es posible determinar una nueva relación de momento y fuerza, ver ecuación (52), que considera cierta cantidad extra que balancea la pequeña variación de las componentes tangenciales.

$$M = F \sin \alpha \left[L + D \left(\frac{\mu \cos \theta - \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] + F \cos \alpha \left[-\frac{d}{2} + D \left(\frac{\cos \theta + \mu \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] + \delta \left[D \frac{\mu (\sin \theta - \cos \theta) + \sin \theta + \cos \theta}{\mu^2 + 1} \right] \quad (52)$$

Como era de esperarse si se reemplaza el valor de $\delta = 0$ en la ecuación (52) se obtiene el mismo resultado de la ecuación (46) encontrada para el estado de movimiento inminente. Entonces, para valores de $\delta > 0$, se garantiza el estado de deslizamiento en la configuración de contacto 3. Partiendo de la ecuación (53) se puede obtener adicionalmente el límite del ángulo de inclinación θ de la clavija para que ocurra el deslizamiento, ver ecuación (54).

$$\delta \left[D \frac{\mu (\sin \theta - \cos \theta) + \sin \theta + \cos \theta}{\mu^2 + 1} \right] > 0 \quad (53)$$

$$\theta > \arctan \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right) \quad (54)$$

Al realizar el análisis cuasiestático de la configuración de contacto 3 se ha encontrado el conjunto de restricciones de la aplicación de la fuerza y momento que satisfacen el deslizamiento de la clavija en la dirección de la inserción, ver ecuaciones (55), (56) y (57).

$$\alpha \geq \arctan \left(-\frac{1}{\mu} \right) \quad (55)$$

$$\alpha \geq \arctan (\mu) \quad (56)$$

$$\frac{M}{F} \geq \sin \alpha \left[L + D \left(\frac{\mu \cos \theta - \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] + \cos \alpha \left[-\frac{d}{2} + D \left(\frac{\cos \theta + \mu \sin \theta}{\mu^2 + 1} \right) \right] \quad (57)$$

De manera similar el diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 5 se presenta en la Figura 31. El cálculo de las fuerzas y momentos se realiza por medio de la sumatoria de fuerzas y momentos, ver ecuaciones (58), (59) y (60). Para el caso de la configuración de contacto resulta conveniente realizar la sumatoria de momento alrededor del punto 1.

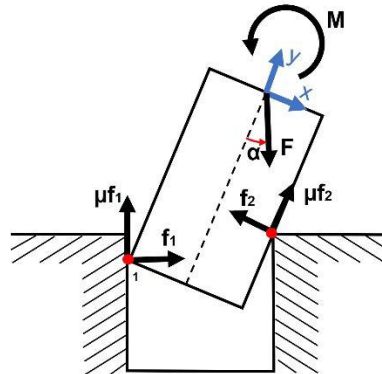


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre para la configuración de contacto 5.

$$\sum F_x = F \sin \alpha - f_2 - \mu f_1 \sin \theta + f_1 \cos \theta = 0 \quad (58)$$

$$\sum F_y = -F \cos \alpha + \mu f_2 + \mu f_1 \cos \theta + f_1 \sin \theta = 0 \quad (59)$$

$$\sum M_1 = M + \mu f_2 d + f_2 l - F \left(\frac{d}{2} \right) \cos \alpha - FL \sin \alpha = 0 \quad (60)$$

El desarrollo se realiza bajo las mismas suposiciones que en el caso de la configuración de contacto 3. Como resultado se encuentra el conjunto de restricciones de la aplicación de la fuerza y momento que satisfacen el deslizamiento de la clavija en la dirección de la inserción para la configuración de contacto 5, ver ecuaciones (61) hasta (64).

$$\theta < \arctan \left(\frac{2\mu}{\mu^2 - 1} \right) \quad (61)$$

$$\alpha \leq \arctan \left(\frac{1}{\mu} \right) \quad (62)$$

$$\alpha \geq \arctan \left(\frac{\mu \sin \theta - \cos \theta}{\mu \cos \theta + \sin \theta} \right) \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \frac{M}{F} \geq \sin \alpha \left(L - \frac{D(\mu \cos \theta + \sin \theta) + d \left(\frac{\mu^2 - 1}{2} \sin 2\theta - \mu \cos 2\theta \right)}{1 - (\mu \sin \theta - \cos \theta)^2} \right) \\ + \cos \alpha \left(\frac{d + D(\mu \sin \theta - \cos \theta)}{1 - (\mu \sin \theta - \cos \theta)^2} - \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \quad (64)$$

Los resultados del análisis cuasiestático de fuerzas de las configuraciones de contacto abordadas permiten desarrollar estrategias de ensamblaje garantizando el cumplimiento del conjunto de las restricciones encontradas. El conjunto de restricciones se muestra gráficamente, ver Figuras 32, 33 y 34 para una inclinación de la clavija $\theta = 1.607^\circ$, una clavija con diámetro $d = L = 12.7 \text{ mm}$, un agujero de diámetro $D = 12.705 \text{ mm}$ y un coeficiente de rozamiento $\mu = 0.9$. Entonces, es posible observar comprensiblemente las regiones de solución del ensamblaje de clavija en agujero para las configuraciones de contacto 3 y 5.

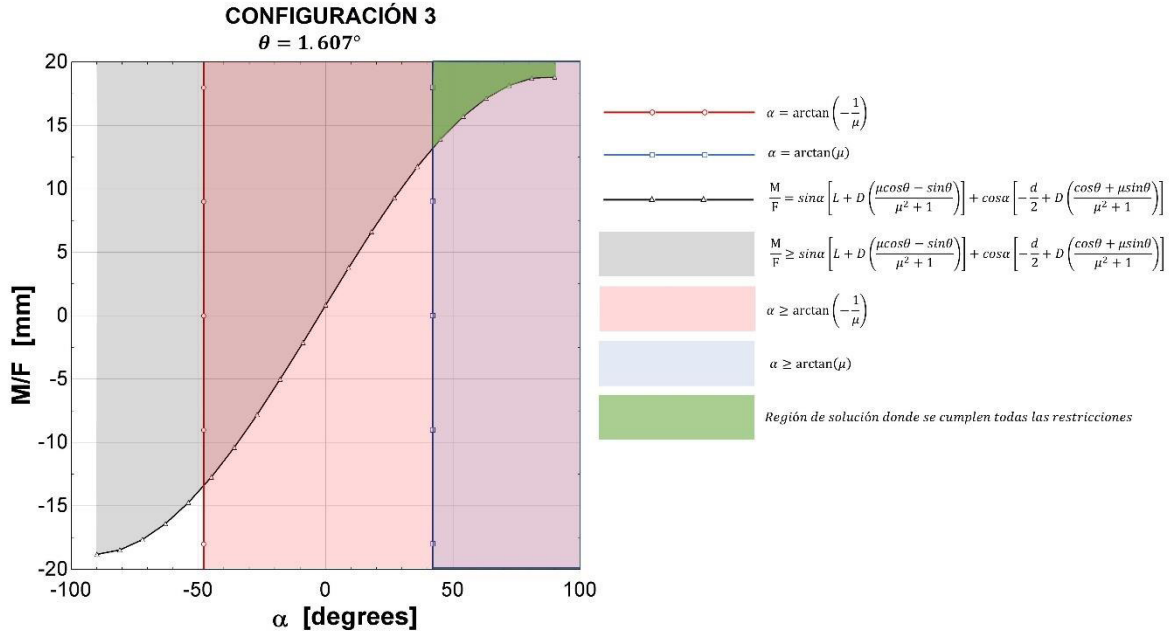


Figura 32. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de contacto 3 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .

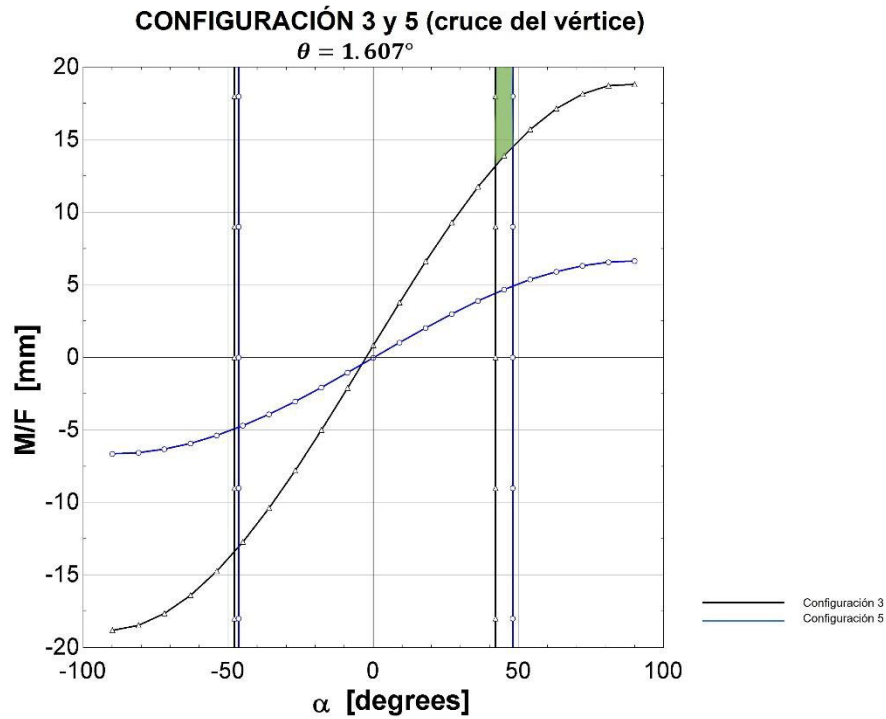


Figura 33. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de transición entre 3 y 5 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .

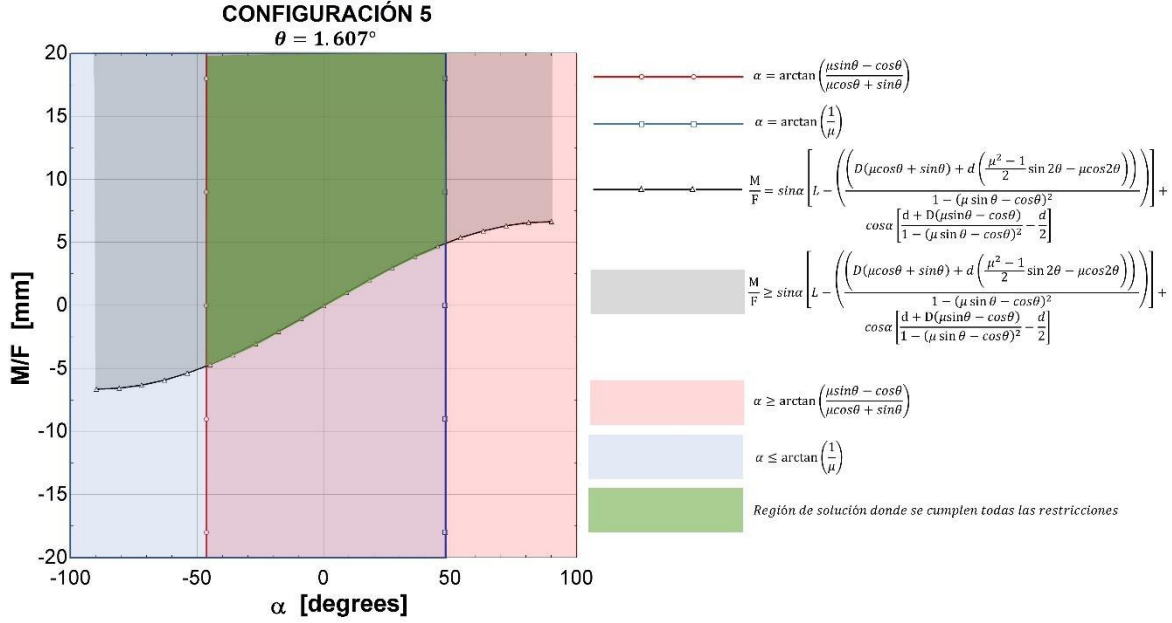


Figura 34. Región de solución para el ensamblaje de clavija en agujero en la configuración de contacto 5 con ángulo de inclinación de la clavija igual a 1.607° .

Las regiones de solución se realizan para diferentes ángulos de inclinación inicial de la clavija. Entonces, dentro del planteamiento de la metodología de ensamblaje o autoensamblaje se requiere determinar como parte de la metodología el valor inicial de la inclinación y mantenerse dentro de regiones de relación de momento y fuerza adecuadas para que la clavija permanezca deslizándose hasta completar el proceso. Para diferentes valores del ángulo de inclinación la restricción de la relación de momento y fuerza para las configuraciones de contacto puede incrementar o disminuir, ver figuras 35 y 36. Adicionalmente, se observa para el trayecto de ensamblaje planteado que el espacio de solución de la transición resulta ser el espacio más probable para que falle el ensamblaje. Por el contrario, para el espacio de solución de la configuración de contacto 5 se observa una amplia región en donde la clavija permanece deslizándose incluso para valores nulos de la relación de momento y fuerza. Variar los parámetros pertenecientes a la ecuación de restricción de la relación de momento y fuerza permite identificar la influencia de estos sobre las regiones de solución dentro del proceso de ensamblaje como se puede revisar en [43].

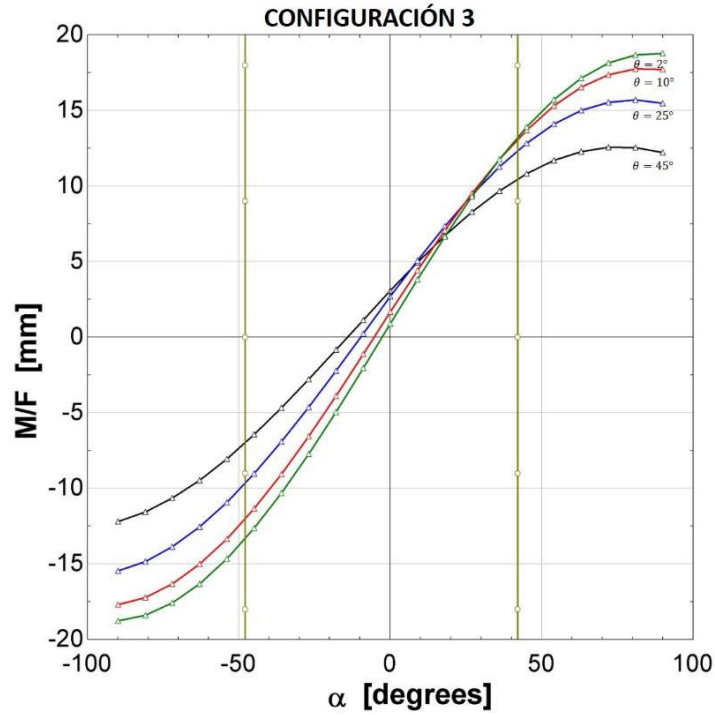


Figura 35. Variación del espacio de solución para la configuración de contacto 3 con respecto al ángulo de inclinación de la clavija.

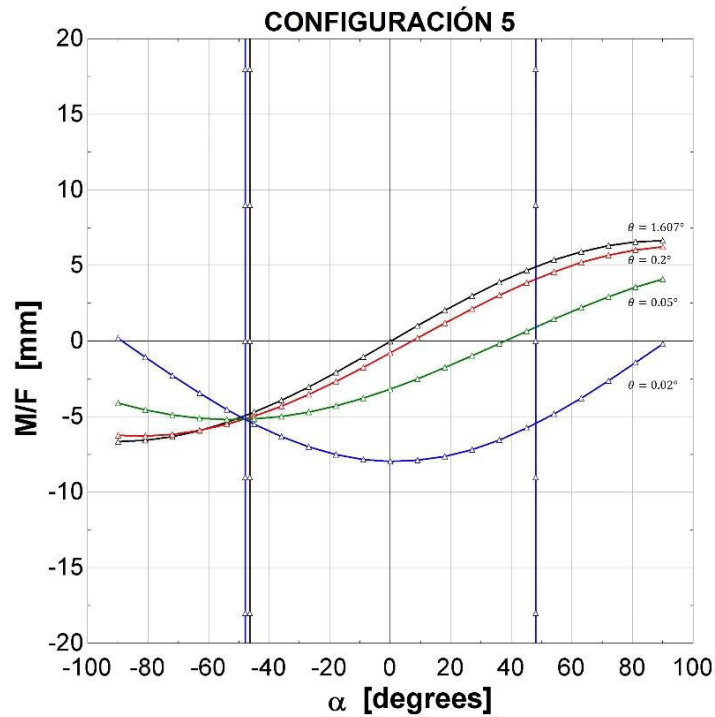


Figura 36. Variación del espacio de solución para la configuración de contacto 5 con respecto al ángulo de inclinación de la clavija.

Entender el problema del ensamblaje de manera clara permitió abordar el autoensamblaje partiendo de un amplio conocimiento de las diferentes posibilidades de inicio del sistema

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

clavija y agujero, su manipulación, su inserción y el espacio de soluciones posibles mediante aplicación de fuerza y momento. En conclusión, la mejor manera de generar una metodología o proceso de autoensamblaje es abordar primero de manera amplia el problema a resolver. Una vez se supera la primera etapa del proceso de autoensamblaje, es decir, entender el ensamblaje a realizar, se cuenta con herramientas suficientes para resolver el problema de ensamblaje con un enfoque diferente que genera una solución autónoma. Para tal fin se debe garantizar trabajar bastante cerca de las zonas de mayor probabilidad de solución del ensamblaje para aumentar la posibilidad de ocurrencia de manera espontánea mediante lo que se conoce como autoensamblaje, el cual se abordará a detalle en el siguiente capítulo.

2.2. ESTUDIO DEL AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA

2.2.1. Qué es el autoensamblaje

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 [18], [44]. 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 Figura 37.

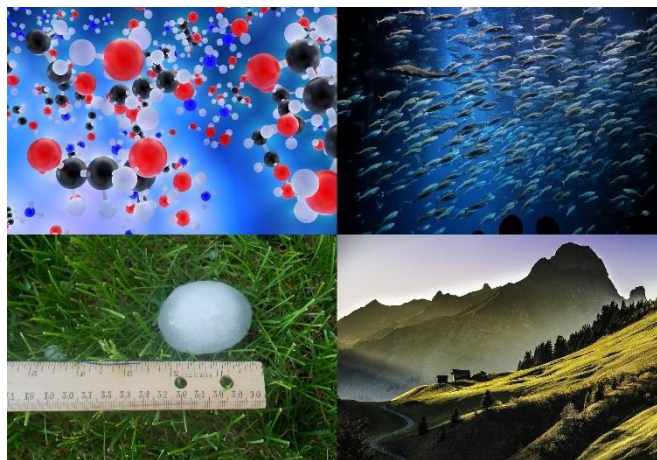


Figura 37. Procesos de auto organización existentes en la naturaleza, Adaptada de <https://pixabay.com/es/>.

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 o cardúmenes), la formación de patrones climáticos, la formación de características geológicas y planetas completos [3], [6]–[8], [11], [21], [45]. A nivel científico la auto organización con fines de construcción es mejor conocida como autoensamblaje.

El autoensamblaje se ha definido de varias maneras mediante el esfuerzo de múltiples científicos y de esto existe evidencia en [44], donde se mencionan varios intentos por definir el campo del autoensamblaje:

- K. Hosokawa et al. [46] se refiere a la naturaleza en un intento de definir autoensamblaje, “Los virus y los flagelos bacterianos se construyen automáticamente a partir de subunidades de proteínas. Este fenómeno se denomina autoensamblaje, que es una poderosa técnica aplicable a la microfabricación”.
- D. J. Campbell et al. [47] “El ensamblaje espontáneo, a menudo llamado “autoensamblaje”, se refiere a la agregación de partículas en una estructura organizada sin ayuda externa”.
- G. Aggarwal et al. [48] “El autoensamblaje es el proceso ubicuo mediante el cual los objetos se ensamblan de manera autónoma en complejos”.
- J. H. Reif et al. [49] “El autoensamblaje es un proceso en el que pequeños objetos se asocian de forma autónoma entre sí para formar complejos más grandes”.
- G. M. Whitesides and B. Grzybowski [33] realizan una pregunta interesante y notable “¿Hay algo que no sea autoensamblaje?” para posteriormente definir el término a “procesos que involucran componentes preexistentes, son reversibles y pueden controlarse mediante el diseño adecuado de los componentes”.
- M. Fialkowski et al. [50] “limita el autoensamblaje a la formación espontánea de estructuras organizadas a partir de muchos componentes discretos que interactúan entre sí directa y/o indirectamente a través de su entorno. Además, los componentes de ensamblaje también pueden estar sujetos a varios potenciales globales (de confinamiento), como campos electromagnéticos o gradientes químicos impuestos externamente”.

Entonces, [44] toma prestado libremente todo lo anterior y se refiere al autoensamblaje como la formación espontánea de estructuras organizadas a través de un proceso estocástico que involucra componentes preexistentes, es reversible y puede controlarse mediante el diseño adecuado de los componentes, el entorno y la fuerza impulsora.

Como conclusión, es posible tomar todas las definiciones mencionadas hasta la fecha como parte de un consenso existente acerca del proceso que se constituye a partir del conocimiento multidisciplinario de distintas áreas del conocimiento. A medida que se realizan nuevas investigaciones e implementaciones se complementa dicha definición y se adquiere mayor comprensión del proceso permitiendo mayor unanimidad al respecto. Actualmente vale la pena adicionar a la ya nutrida definición del autoensamblaje lo siguiente: “proceso de construcción de abajo hacia arriba (las partes tienen codificada a detalle la información que da lugar al sistema o estructura de mayor complejidad) [16], con la capacidad de organizar partes individuales de manera autónoma en patrones o estructuras con un grado de orden y funcionalidad notable en comparación con las partes que la componen”.

2.2.2. Cómo funciona el autoensamblaje

El autoensamblaje 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 la dirección de una fuerza externa aplicada de manera individual [3], [9], [15], [45], [51]. 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 [3], [12], [21], [25].

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 [1], [4], [11], [12], [16], [18], [19]. La Figura 38 muestra una representación esquemática del autoensamblaje.

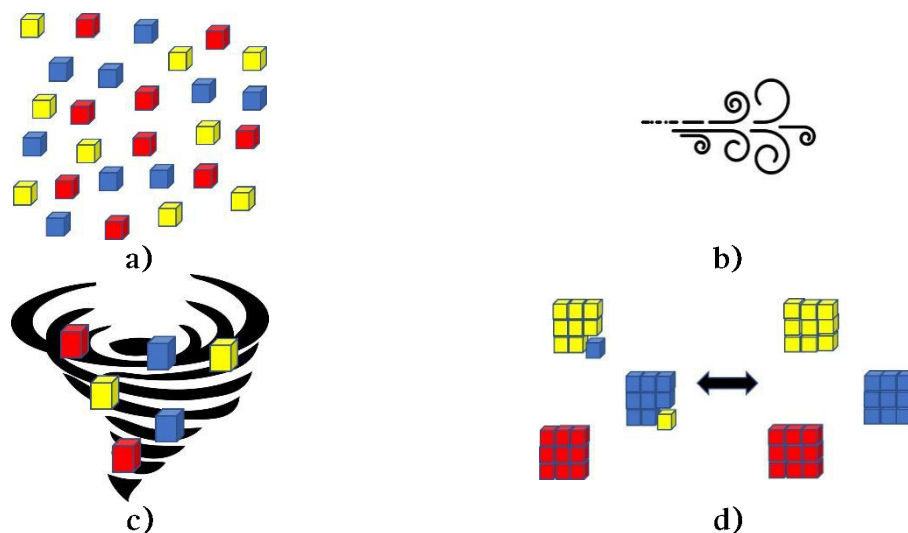


Figura 38. Representación esquemática del autoensamblaje: a) Partes diseñadas y programadas, b) Entorno, c) Energía de activación, d) Fuerza de unión y reversibilidad.

2.2.3. Tipos de 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 otras palabras, el autoensamblaje

estático produce patrones o estructuras fijas y el autoensamblaje dinámico produce patrones o estructuras en constante cambio y dependencia energética [8], [10]–[12], [19]. Ver Figura 39.

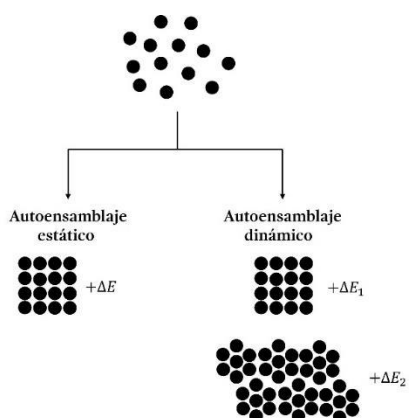


Figura 39. Tipos de autoensamblaje. Adaptada de [52].

2.2.4. Escalas del autoensamblaje

Existe evidencia de autoensamblaje en todas las escalas conocidas como se mostró en la Figura 37. Los sistemas se agrupan por escala dependiendo de las dimensiones geométricas de los componentes involucrados en el proceso y la estructura objetivo final, abarcando desde la escala atómica ($1 \times 10^{-10} \text{ m}$) hasta la escala de nivel macroscópico ($0.01 \text{ m en adelante}$) [2], [6], [12]–[14], [19], [28], [45]. En la Figura 40 se visualizan las diferentes escalas de autoensamblaje, los procesos de ensamble más utilizados en relación a los componentes involucrados y las implicaciones del proceso de autoensamblaje como alternativa en cada escala.

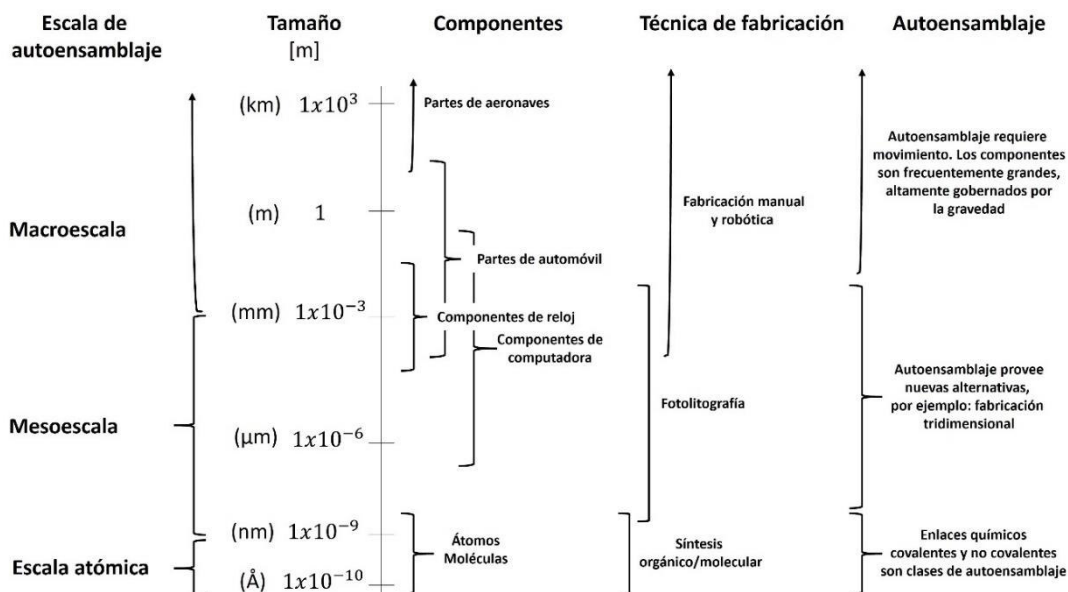


Figura 40. Escalas del autoensamblaje, Adaptada de [28].

2.2.5. Aplicaciones del autoensamblaje

El autoensamblaje es el proceso de construcción del mundo natural, tanto en sistemas inorgánicos como orgánicos, explica la formación de cristales, la polimerización, cinemática química, procesos evolutivos a nivel biológico, comportamientos sociales de diferentes especies (enjambres, cardúmenes y estructuras de formación colectiva), comportamientos dinámicos y termodinámicos de sistemas moleculares, sistemas meteorológicos e incluso la formación de planetas y universos. En este contexto el proceso de autoensamblaje ocurre espontáneamente y se puede nombrar como autoensamblaje natural con gran potencial para replicarse de manera artificial en diferentes campos de la ciencia, entre ellos, la biología, química, manufactura, ciencia de los materiales, microelectrónica, física, robótica y sociología [53].

Generar procesos de autoensamblaje artificial permite ampliar su aplicación a través de todas las escalas mediante un proceso en esencia espontáneo, pero configurado estratégicamente por el hombre para obtener una formación o estructura deseada a partir de componentes previamente diseñados. En este contexto se ha realizado con éxito autoensamblaje como alternativa tecnológica en: 1) la generación de estructuras tridimensionales a partir de técnicas de fabricación principalmente bidimensionales, 2) producción de dispositivos con funciones eléctricas y ópticas (dispositivos microelectromecánicos MEMS), 3) simulación física y computacional de la dinámica del autoensamblaje a escala macroscópica que permiten reproducir sistemas naturales de menor escala para facilitar su estudio y comprensión, 4) robótica modular o de enjambre mediante coordinación autónoma para labores de navegación todo terreno, para tareas de búsqueda/rescate y para construcción de estructuras, 5) el desarrollo de nuevos materiales inteligentes con capacidades de auto reparación o auto reconfiguración, 6) la construcción civil y arquitectónica, 7) el suministro de medicamento, 8) desarrollo de programas computacionales autónomos para la resolución de problemas o la asistencia de diseñadores, arquitectos e ingenieros en soluciones innovadoras (meta-diseño), entre otros.

2.2.6. Ingeniería inversa de sistemas de autoensamblaje implementados a escala macroscópica

2.2.6.1. Análogo mecánico de auto reproducción – Modelo Penrose.

El análogo mecánico de Penrose se considera la primera implementación física de un sistema artificial capaz de imitar la característica de auto reproducción de los organismos vivos [26]. Para el año 1957, se creía que el mecanismo capaz de auto reproducirse debía poseer un grado de complejidad elevada para lograr replicar esta característica biológica. Sin embargo, el mecanismo propuesto revolucionó esta creencia al presentar una novedosa implementación en esencia sencilla pero muy elegante que sorprendió por su característica de auto reproducción por medio de la adecuada ejecución de lo que hoy se conoce más ampliamente como autoensamblaje artificial. Este sistema ha sido el punto de partida para la construcción de más complicados modelos con propiedades básicas similares.

2.2.6.1.1. Réplica experimental del modelo Penrose.

Teniendo en cuenta que el análogo mecánico de auto reproducción demuestra adecuadamente la implementación física del autoensamblaje artificial a escala macroscópica, se elaboró la réplica experimental del sistema con el objetivo de estudiarlo a detalle.

En el diseño original se utilizan bloques de madera como componentes que se ensamblan y replican por medio de autoensamblaje. Las características geométricas de los dos tipos de componentes A y B utilizados como partes individuales y los dos posibles ensamblajes que forman las estructuras AB o BA se observan en la Figura 41.

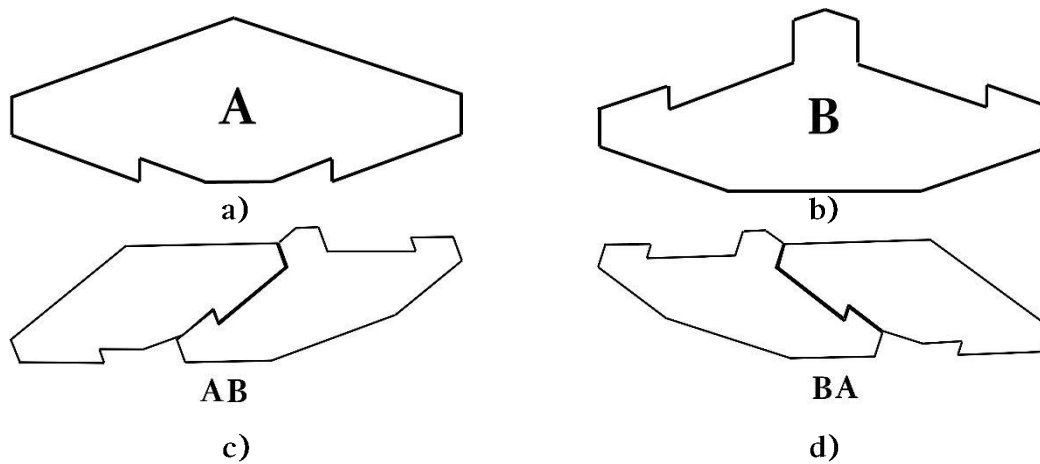


Figura 41. Análogo mecánico de auto reproducción de Penrose: **a)** componente tipo A, **b)** componente tipo B, **c)** ensamblaje AB, **d)** ensamblaje BA.

Para la réplica de cada uno de los componentes de tipo A y B se consideró el mismo diseño geométrico de los componentes originales, pero debido a la ausencia de dimensiones establecidas y reportadas, las dimensiones se establecieron libremente. Los componentes se modelaron por medio del software de diseño asistido por computadora SolidWorks®, ver Figura 42.

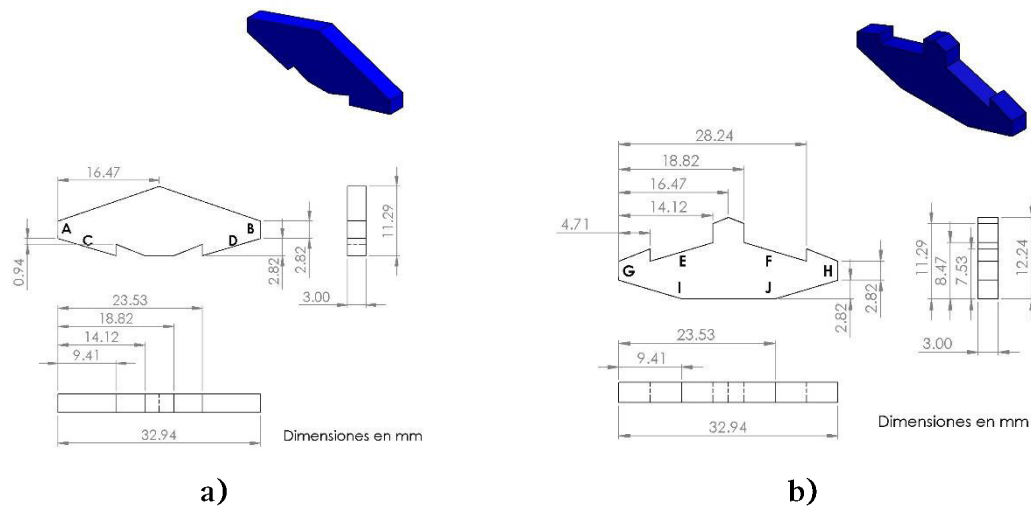


Figura 42. Dimensiones del modelo CAD realizado en SolidWorks®: **a)** componente tipo A, **b)** componente tipo B.

Los componentes se fabricaron por medio de manufactura aditiva (impresión 3D en resina), ver Figura 43. Las razones de aplicar la tecnología de impresión 3D en resina son su disponibilidad, la economía del proceso y la materia prima, una curva de aprendizaje relativamente sencilla para el prototipado rápido, buenos detalles superficiales, grado de precisión y exactitud moderada en los componentes manufacturados.

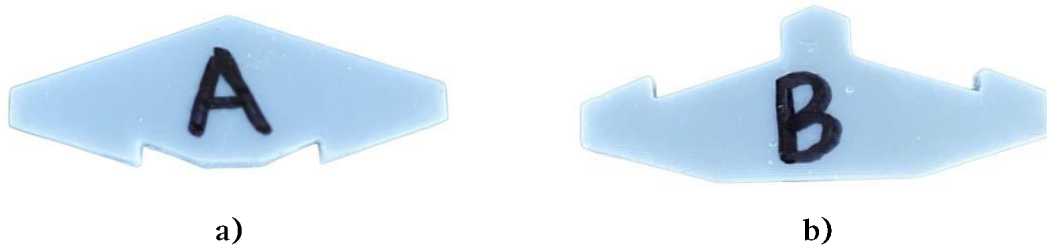


Figura 43. Componentes fabricados por impresión 3D en resina: a) Componente tipo A, b) Componente tipo B.

En total se fabricaron siete componentes de cada tipo con idénticas características geométrica y de material. Los detalles físicos programados que permiten el autoensamblaje de los componentes de tipo A y B no se profundizan en [26]. Sin embargo, se describen de buena manera en [54] como regiones con información codificada físicamente a través de la forma, ver Figura 44. Estas regiones permiten analizar con detalle el sistema de autoensamblaje y encontrar diez reglas de interacción existentes, ver Tabla 4, que promueven la creación del ensamblaje AB y BA.

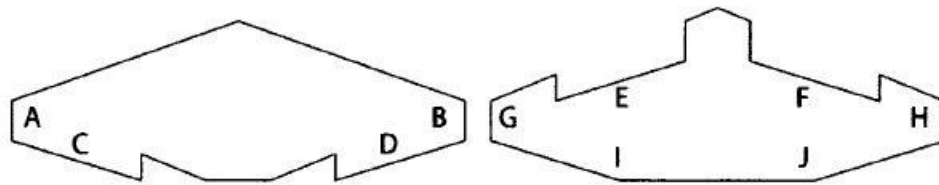
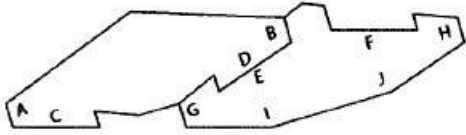
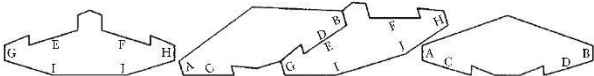
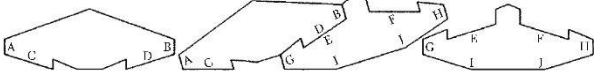
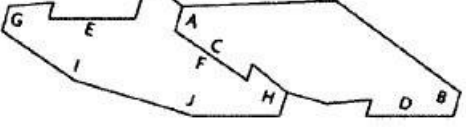
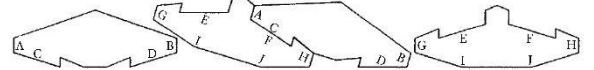
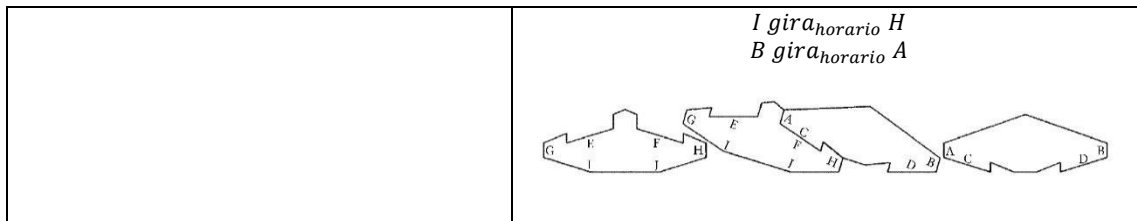


Figura 44. Regiones de información física codificada a través de la forma. Tomada de [54].

Tabla 4. Reglas de interacción existentes para la formación de los ensamblajes AB y BA. Adaptada de [54].

Reglas de unión (enganche)	Reglas de rotación
ENSAMBLAJE AB $D \text{ complementa } E \rightarrow D + E$ 	ENSAMBLAJE AB $A \text{ gira}_{\text{antihorario}} H$ $J \text{ gira}_{\text{antihorario}} A$  $A \text{ gira}_{\text{antihorario}} B$ $J \text{ gira}_{\text{antihorario}} G$ 
ENSAMBLAJE BA $C \text{ complementa } F \rightarrow C + F$ 	ENSAMBLAJE BA $I \text{ gira}_{\text{horario}} B$ $B \text{ gira}_{\text{horario}} G$ 

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.



En el diseño original se plantea el medio donde interactúan los componentes del tipo A y B como una pista ranurada en donde los componentes pueden deslizarse libremente pero no pueden cruzarse entre sí. La pista se encuentra bloqueada en ambos extremos y restringida por un techo, ver Figura 45.

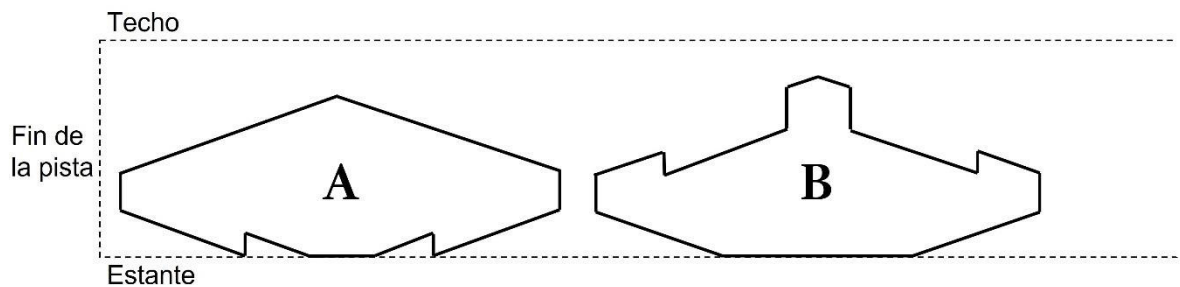


Figura 45. Medio original del autoensamblaje en el análogo mecánico de auto reproducción.

Para la réplica del medio las dimensiones de la pista tanto su largo como su alto se establecieron por medio del software de diseño asistido por computadora SolidWorks®, ver Figura 46. Se consideró para el largo una dimensión suficiente para que el sistema trabajara con catorce componentes en total y para el alto que garantizara la restricción de cruce entre los componentes.

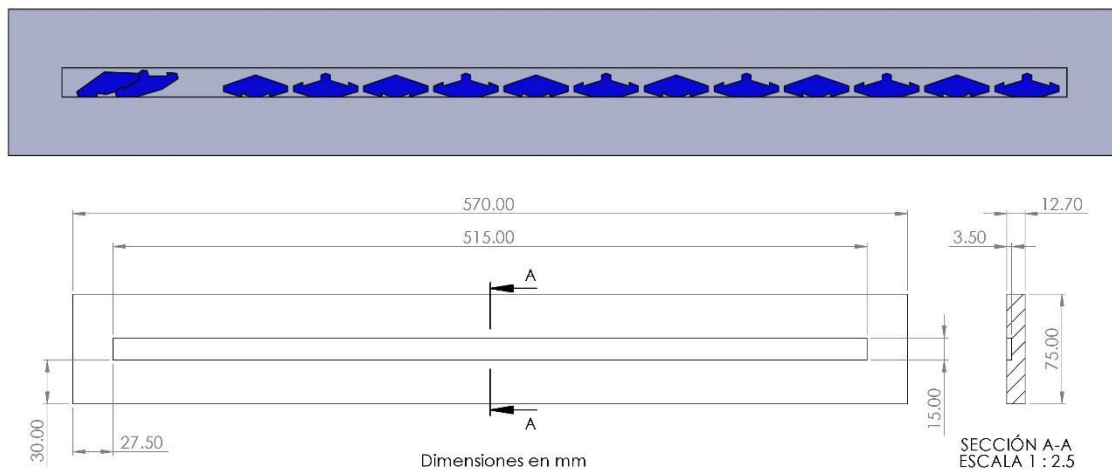


Figura 46. Dimensiones del modelo CAD de la réplica del medio de autoensamblaje realizado en SolidWorks®.

La pista se fabricó realizando un ranurado por medio de mecanizado CNC a una placa de aluminio, que corresponde a la pista en donde los componentes pueden deslizarse libremente. Por facilidad de mecanizado se realizó un ranurado de extremo a extremo y para los topes de fin de pista se fabricaron dos piezas de polímero mediante impresión 3D de filamento que se atornillan a la pista, ver Figura 47.

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

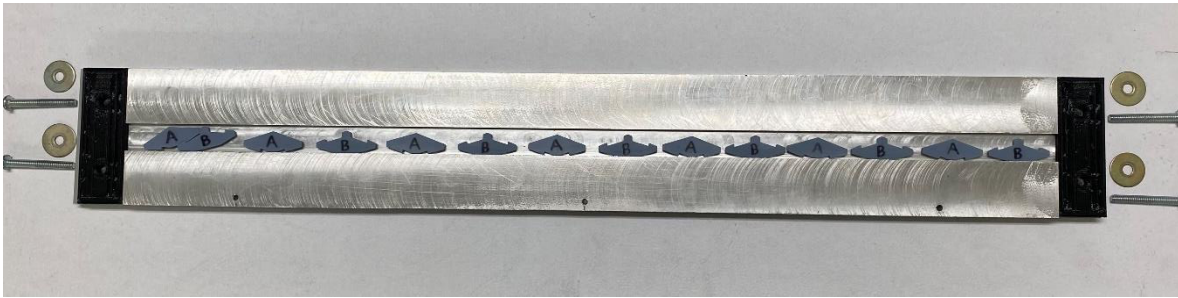


Figura 47. Réplica fabricada del medio de autoensamblaje para el análogo mecánico de auto reproducción.

El medio proporciona nuevas reglas al sistema que facilitan la interacción de manera adecuada entre los componentes para la generación del ensamblaje AB o BA. Las dos reglas debidas al medio considerando lo planteado en [54] son resultado de la altura de la pista: 1) evitar que los componentes vuelquen al girar completamente, alcanzando una posición en la que no puede ocurrir el autoensamblaje y 2) proporcionar suficiente flexibilidad de rotación de los componentes, facilitando su unión al permitir su deslizamiento y enganche, ver Figura 48.

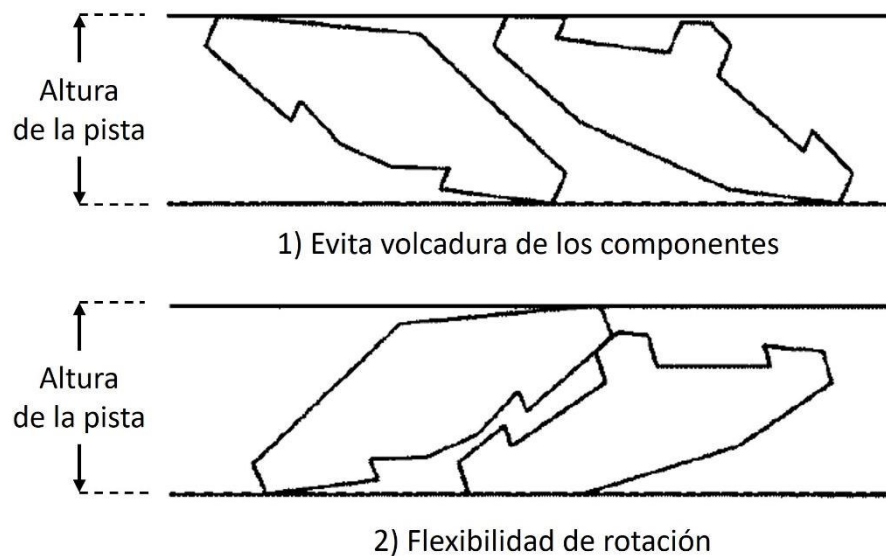


Figura 48. Reglas debido al medio para el autoensamblaje de componentes A y B.

Cuando se opera la réplica del sistema análogo de auto reproducción (autoensamblaje en escala macroscópica) fabricada aplicando una energía de activación mediante agitación horizontal, se evidencia la ausencia de detalle en dos reglas adicionales del medio que juegan un papel importante en la realización del autoensamblaje. Primero, el medio debe garantizar el equilibrio de los componentes para que puedan deslizarse de izquierda a derecha, pero restringir adicionalmente la parte frontal de la pista para evitar la rotación de los componentes en esta dirección causando que no se unan correctamente. Para solucionar la restricción necesaria adicional encontrada al fabricar y operar la réplica física del sistema, se optó por instalar una lámina de acrílico al frente de la pista atornillada en conjunto con las piezas de polímero de los extremos de la pista, ver Figura 49.



Figura 49. Lámina de acrílico que se instala en la parte frontal de la pista (medio de autoensamblaje).

La placa de acrílico restringe el giro de los componentes hacia afuera de la pista y permite el libre deslizamiento de izquierda a derecha. La segunda regla con ausencia de detalle corresponde a la forma de los extremos de la pista ya que estos pueden romper, mantener o mejorar el ensamblaje de los componentes. Debido a la fabricación de piezas de polímero desmontables en nuestra réplica para los extremos de la pista es posible explorar diferentes formas. Sin embargo, los extremos verticales son suficientes para provocar el autoensamblaje de los componentes y tener una réplica que cumple con el sistema pionero, simple pero poderoso [54]. Para transmitir la agitación horizontal de manera sencilla se adaptan ruedas en la parte inferior de la pista, completando satisfactoriamente la fabricación de una réplica del sistema análogo de auto reproducción en escala macroscópica, ver Figura 50.



Figura 50. Réplica fabricada del análogo de auto reproducción – Modelo Penrose.

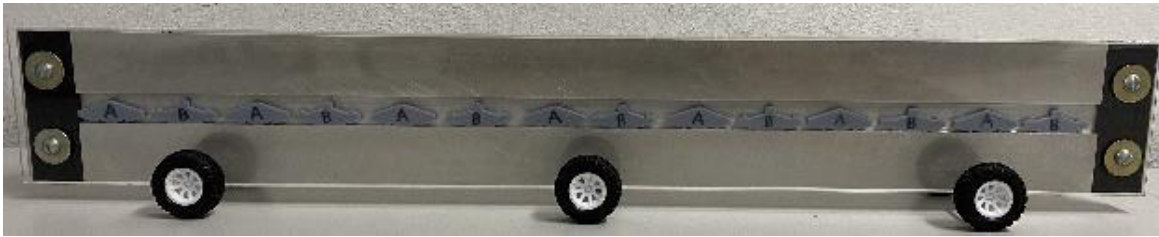
La energía de activación se realiza manualmente agitando el sistema horizontalmente (1D). Este movimiento se transfiere a cada uno de los componentes individuales y al ensamblaje semilla (AB o BA). Entonces, todas las reglas mencionadas anteriormente entran en operación junto con el ensamblaje semilla que actúa como catalizador del ensamblaje para la creación de nuevas uniones. Cabe resaltar que precisamente la última de las reglas necesarias para garantizar el autoensamblaje de los componentes es la presencia de un ensamblaje semilla, ver ecuaciones (65) y (66), ya que los componentes ubicados de manera individual en la pista no actúan como catalizadores en el sistema y como resultado no se cumplen las demás reglas de ensamblaje.

$$AB \text{ autocatalizador } A; B \rightarrow AB; AB \quad (65)$$

$$BA \text{ autocatalizador } B; A \rightarrow BA; BA \quad (66)$$

Al igual que en [54], la realización de la ingeniería inversa de este sistema permite al fabricante conocer las dificultades de construcción y tener un mayor aprecio por el sistema pionero de auto reproducción mediante autoensamblaje. Finalmente, se presentan los resultados de autoensamblaje logrados mediante la réplica del análogo mecánico de auto reproducción considerando su estado inicial (punto de partida) y su estado final, ver Figura 51.

Estado inicial sin semilla



a)

Estado final sin semilla



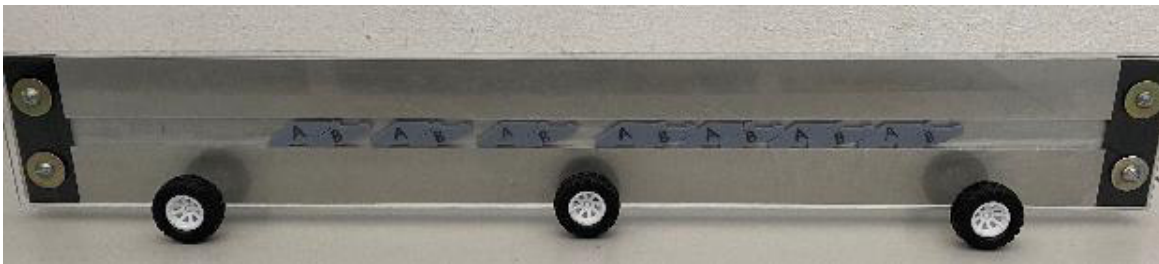
b)

Estado inicial con semilla AB



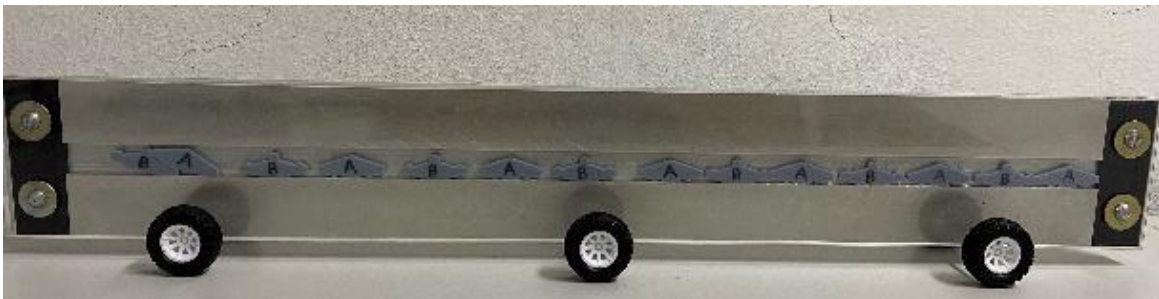
c)

Estado final con semilla AB



d)

Estado inicial con semilla BA



e)

Estado final con semilla BA



f)

Figura 51. Resultados experimentales de la réplica fabricada del análogo mecánico de auto reproducción – Modelo Penrose: **a)** Autoensamblaje sin semilla; **b)** Resultado del autoensamblaje sin semilla; **c)** Autoensamblaje con semilla AB; **d)** Resultado del autoensamblaje con semilla AB; **e)** Autoensamblaje con semilla BA; **f)** Resultado del autoensamblaje con semilla BA.

2.2.6.2. Ensamblaje espontaneo de popotes – Campbell et. al.

El proceso de autoensamblaje es bastante común en el área de la química y de la ciencia de materiales donde la agregación de partículas en una estructura organizada ocurre sin ayuda externa (ensamblaje espontáneo) [47]. En las áreas mencionadas anteriormente el autoensamblaje sucede en escala atómica o mesoescala. Sin embargo, en unidades visiblemente distinguibles (escala macroscópica) también pueden ocurrir ensamblajes espontáneos. El experimento realizado en [47] demostró que es posible generar autoensamblaje en escala macroscópica mediante fuerzas conductoras débiles (fuerzas capilares) muy similares a interacciones no covalentes siempre que se configuren inteligentemente. Las fuerzas capilares son las fuerzas más ampliamente utilizadas para el autoensamblaje de unidades en la escala macroscópica, existen tanto de atracción como de repulsión, y se prestan muy bien para experimentos relativamente fáciles de replicar bajo diferentes condiciones.

2.2.6.2.1. Réplica experimental del ensamblaje espontaneo de Campbell et. al.

Debido a que los materiales para replicar el experimento realizado en [47] son bastante comunes se realizó la réplica experimental del sistema. Su implementación permite una mayor comprensión del detalle detrás de la configuración física del autoensamblaje a escala macroscópica y complementa los beneficios de la realización de la ingeniería inversa del análogo mecánico de auto reproducción de Penrose.

El diseño original de los componentes se logra a partir de popotes recortados transversalmente para que cada componente tenga igual longitud (diámetro de la pajilla: 0.5 cm; longitud del componente: 1.5 cm), ver Figura 52.

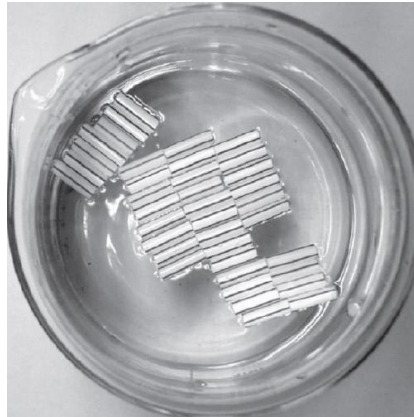


Figura 52. Ensamblaje espontáneo de popotes: componente único. Tomada de [47].

Algo interesante de resaltar en este punto considerando el análogo mecánico de auto reproducción de Penrose y el experimento de ensamblaje espontáneo de Campbell original es la diferencia existente entre los componentes que generan el autoensamblaje: El primero utiliza dos tipos de componentes A y B (componentes diferentes) para generar estructuras AB y BA deseadas e incluso altamente planeadas, mientras que, el segundo realiza el autoensamblaje de componentes idénticos (popotes con igual diámetro y longitud) generando gran variedad de estructuras, incluso algunas estructuras no esperadas a priori. Ambas implementaciones físicas realizan autoensamblaje satisfactoriamente, pero debido a la diferencia mencionada anteriormente es posible vislumbrar cierta dependencia entre el grado de diseño de los componentes y la estructura resultante en el proceso.

La réplica de los componentes del ensamblaje espontáneo de popotes es bastante simple, se recortaron transversalmente popotes de diámetro de 0.7 cm y la longitud establecida para todos los componentes fue de 3 cm, ver Figura 53.



Figura 53. Componentes recortados a partir de popotes para replicar el experimento original de Campbell.

El diseño de los componentes en el caso experimental de Campbell no parece exhibir gran cantidad de información codificada físicamente si se compara con la réplica del análogo mecánico de auto reproducción de Penrose. Incluso la fabricación de los componentes es bastante rápida y sencilla partiendo de popotes de polímero tradicionales.

Sin embargo, en el diseño bastante simple existen ciertas características que permiten la ejecución del autoensamblaje. Primero, los componentes son fabricados generalmente de materiales con densidades más bajas que la densidad de un fluido común como el agua, entonces siempre que el número de partículas que componen al objeto sea menor al número

de partículas del fluido desplazado este flotará sobre el fluido. Sin embargo, vale la pena aclarar que la causa de la flotabilidad no es la densidad del componente en sí. El componente flotará en la superficie del agua debido al equilibrio de fuerzas en la dirección vertical (peso (gravedad) y presión ejercida por los fluidos que rodean al componente (agua/fuerza de empuje-aire/presión atmosférica)). Para el experimento de Campbell el equilibrio de las fuerzas en dirección vertical es suficiente para mantener a los popotes de igual longitud flotando en una interfaz líquido-aire. Segundo, la superficie de los componentes generalmente posee una naturaleza hidrofílica o hidrofóbica lo cual genera cierta curvatura (menisco) en el fluido que está en contacto con el componente, lo cual es fundamental en el experimento de Campbell para obtener el resultado de autoensamblaje bidimensional de los componentes (esencialmente cristalización bidimensional) mediante fuerzas capilares de atracción o repulsión que se generan en la dirección horizontal de la interfaz líquido-aire, ver Figura 54.

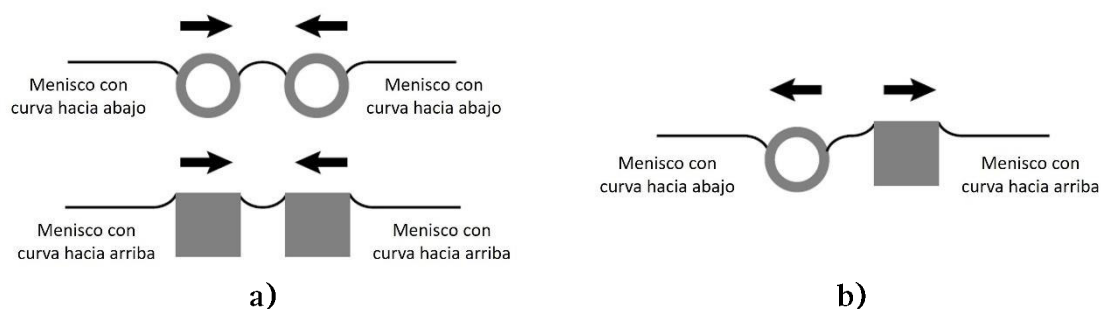


Figura 54. Tipos de meniscos: a) Meniscos que curvan el fluido en la misma dirección; b) Meniscos que curvan el fluido en direcciones opuestas. Modificada de [47].

Como puede observarse en la Figura 54 las interacciones entre los componentes y los meniscos depende de la naturaleza hidrofílica o hidrofóbica del componente junto a una característica de diseño particulares, generalmente dichas interacciones se conocen como fuerzas de interacción capilar. Si el líquido inferior es atraído hacia la superficie de un componente flotante, entonces el menisco se curvará hacia arriba en la superficie del componente. Si el líquido inferior es repelido por la superficie de un componente flotante, entonces el menisco se curvará hacia abajo en la superficie del componente. Los componentes interactuarán de tal manera que se minimiza la curvatura del menisco [47]. Los meniscos entre dos componentes que se curvan en la misma dirección (ambos hacia arriba o hacia abajo) producirán una fuerza de atracción entre los componentes, ver Figura 54a. Los meniscos entre dos componentes que se curvan en direcciones opuestas (uno hacia arriba y otro hacia abajo) producirán una fuerza repulsiva entre los componentes, ver Figura 54b.

En cuanto al diseño de los componentes se debe mencionar que el experimento de ensamblaje espontáneo de popotes original plantea el diseño de componentes más simple posible que permite de manera adecuada visualizar el autoensamblaje en escala macroscópica. Sin embargo, no es limitante en ningún sentido a la oportunidad de explorar alternativas de diseño más sofisticadas mediante la variación del dimensionamiento de los popotes, variación del corte en los extremos con cierto ángulo o incluso componentes formados con la unión de varios popotes en formaciones unitarias idénticas, pero generando morfologías más elaboradas para identificar posibles similitudes o diferencias durante el proceso. Algunas variaciones bastante interesantes en cuanto al diseño se plantean en el material complementario de [47], observando que para los nuevos diseños se obtienen nuevos tipos de uniones y con esto la formación de estructuras con morfologías más variadas, ver Figura 55.

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

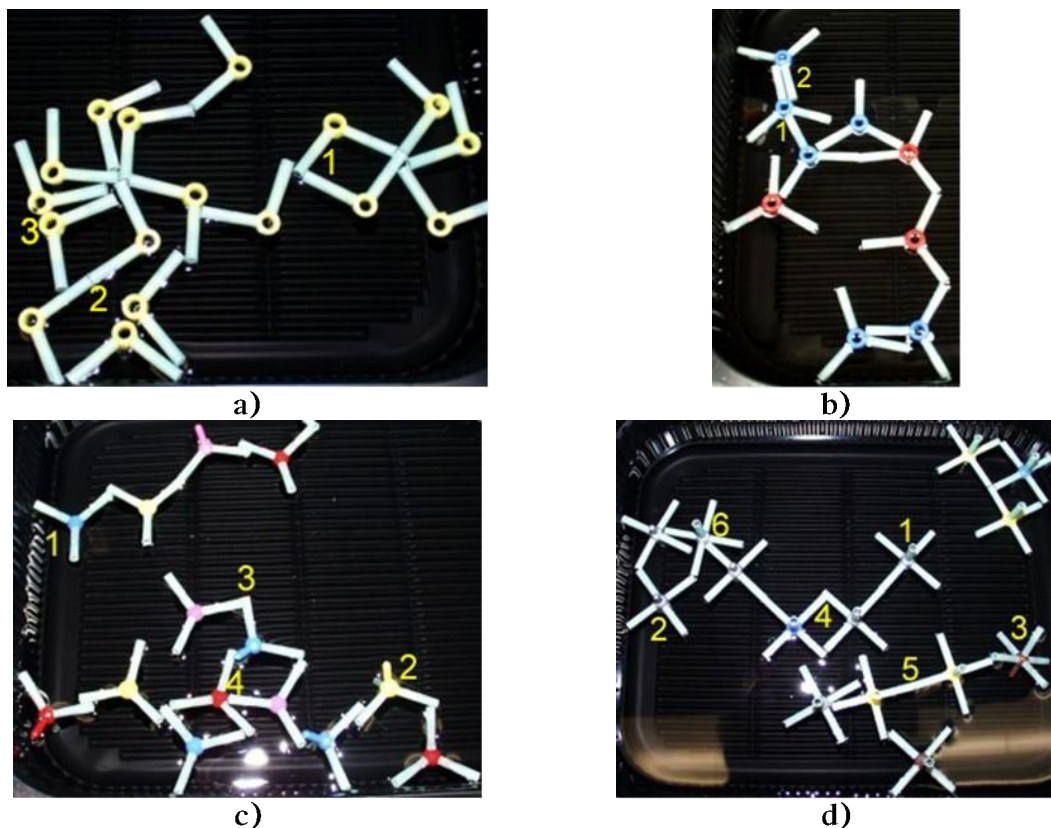


Figura 55. Variaciones del diseño básico de popotes para el experimento de ensamblaje espontaneo de Campbell. Creada a partir del material complementario de [47].

Otra sugerencia en cuanto al diseño que se plantea en el experimento original de [47] es el control de las interacciones de los componentes con el menisco controlando la naturaleza hidrofílica e hidrofóbica tanto del líquido como de las superficies del componente. Considerando esta alternativa desde el punto de vista del componente se podrían realizar diseños combinando la naturaleza hidrofílica e hidrofóbica en las diferentes superficies, lo cual alteraría la forma en que interactúan y conforman estructuras deseadas mediante el autoensamblaje.

Para la réplica realizada se plantearon tres tipos sencillos de componentes, el primero corresponde al diseño original con dimensiones mencionadas anteriormente, el segundo tipo de componente se realizó mediante un corte en cada extremo de la pajilla en un ángulo aproximado de 45° y finalmente un componente generado mediante un corte longitudinal, ver Figura 56.

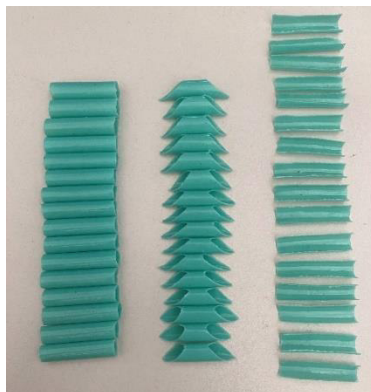


Figura 56. Tipos de componentes para la réplica del experimento de ensamblaje espontáneo de popotes.

El medio en el cual se lleva a cabo el ensamblaje espontáneo de popotes puede ser cualquier contenedor que pueda ser llenado con un fluido, típicamente agua (en algunas ocasiones con sal agregada para aumentar su densidad), con dimensiones suficientes para contener la cantidad de componentes flotantes que se deseen autoensamblar. Originalmente, se puede observar en la Figura 52 un vaso de precipitado de 800 ml de contorno circular (10 cm de diámetro) lleno de agua hasta una profundidad aproximada de 2 cm como medio de autoensamblaje y en la Figura 55 una bandeja de 30 cm x 28 cm x 8 cm, que se llenó con suficiente agua para evitar que los componentes tocaran el fondo de la bandeja y se lograra generar el autoensamblaje.

Para el caso de la réplica del experimento se utilizó como medio de autoensamblaje un cristallizador de laboratorio de contorno circular (20 cm de diámetro) lleno de agua hasta una profundidad aproximada de 3 cm y un soporte universal de laboratorio para ubicar una cámara que realizó el seguimiento del proceso durante el autoensamblaje de los popotes, ver Figura 57.



a)



b)

Figura 57. Medio para replicar el experimento de ensamblaje espontáneo de Campbell.

El medio juega un papel importante en el proceso de autoensamblaje y a pesar de mencionar anteriormente que para el actual experimento puede ser cualquier contenedor que pueda llenarse con algún fluido y poseer dimensiones adecuadas para contener la cantidad de componentes involucrados en el proceso es necesario analizar también sus implicaciones a partir de las observaciones logradas durante la ejecución del experimento. A continuación se plantean varios aspectos del medio que se consideran relevantes y no son profundizados en [47]:

- La forma del contenedor genera variación en el flujo del fluido cuando se genera la agitación o perturbación del mismo, afectando de manera directa la interacción de los componentes.
- El tamaño del contenedor afecta la cantidad de interacciones probables entre los componentes. Para tamaños de contenedor pequeño en relación a la concentración de componentes dentro del medio, las interacciones ocurren bastante más rápido que para tamaños de contenedor grande en donde la concentración de componentes sea baja, haciendo que el autoensamblaje requiera mayor exploración y energía de activación para propiciar la interacción y posterior ensamblaje.
- En las paredes del contenedor y el fluido también se genera curvatura (menisco) y a su vez fuerzas de atracción o repulsión con los componentes (puede variar por forma o por el material del contenedor). Esto se hace evidente cuando se revisa el proceso a través del tiempo y se observan los componentes en ubicaciones cercanas o alejadas de las paredes de manera preferente.
- Las propiedades del fluido juegan igualmente un rol importante durante el autoensamblaje, de manera general se considera agua, pero se han considerado modificaciones al agregar por ejemplo sal que aumenta su densidad, jabón que disminuye su tensión superficial, disolvente hidrófobo como la perfluorodecalina que modifica el ángulo de contacto componente-líquido o incluso utilizar diferentes fluidos.
- La cantidad de fluido afecta la profundidad. Para profundidades pequeñas los componentes pueden llegar a estar en contacto con el fondo del contenedor afectando su movimiento y sus interacciones. Para profundidades suficientes los componentes pueden moverse con mayor libertad con niveles de energía de activación o perturbación bajos.

La energía de activación o perturbación del experimento original de ensamblaje espontáneo de popotes consistió en colocar el vaso de precipitados en un agitador orbital (Fisher Scientific, modelo 361) ajustado a una frecuencia elegida durante un tiempo fijo inicialmente en 30 minutos, posteriormente se redujo a 15 minutos al no evidenciar cambios significativos en el grado de organización de los componentes. Por otra parte, en el experimento que utilizó como medio una bandeja, la energía de activación fue implementada mediante agitación manual. Las dos formas de perturbación del fluido generan interacciones entre los componentes y finalmente la existencia de algunos tipos de uniones más frecuentes, incluso en general resultados con formaciones más estables que otras y su dependencia directa con el nivel de energía de activación suministrada hace parte de la constante investigación del autoensamblaje.

En [47] la energía de activación es descrita mediante la ecuación (67), utilizada para describir muchos procesos de cristalización y disolución.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (67)$$

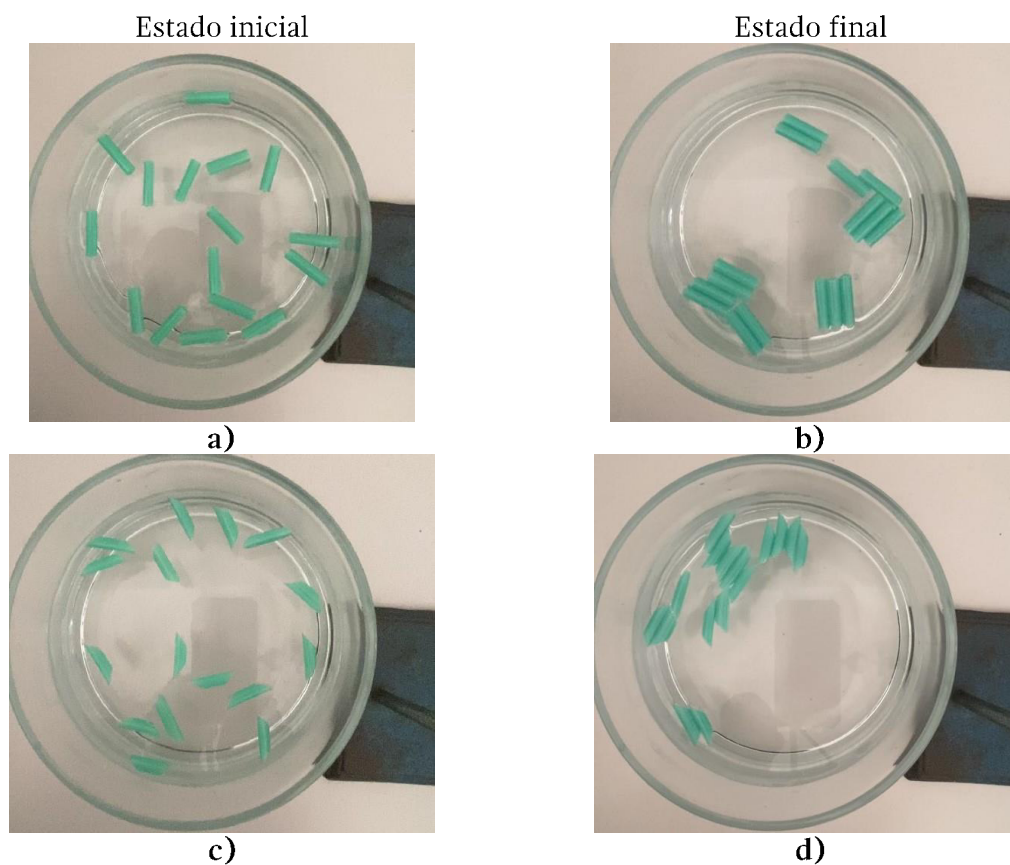
En donde, (ΔG) es el cambio de energía libre de Gibbs, (ΔH) es el cambio de la entalpia y (ΔS) es el cambio de entropía. En el caso específico del experimento macroscópico, T no es estrictamente la temperatura, sino más bien una medida relativa de la intensidad de la perturbación del sistema.

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

La intención del experimento no es determinar la precisión del proceso mediante el ajuste con la ecuación presentada anteriormente, simplemente se visualizan ciertas similitudes existentes entre procesos bastante estudiados en química con respecto a métodos de autoensamblaje en escala macroscópica.

El autoensamblaje en escala macroscópica puede emplearse como herramienta de enseñanza de procesos en diferentes escalas, percibiendo ventajas tales como la observación directa de la formación de cristales componente por componente para sistemas altamente reversibles.

La réplica realizada para visualizar directamente la formación de cristales macroscópicos utilizó energía de activación mediante agitación manual transmitida durante menos de 5 minutos. A continuación, se presentan en la Figura 58 los resultados observados en cuanto a formaciones para los tres tipos de componentes planteados en la Figura 56, mostrando el estado inicial del sistema y el estado final alcanzado.



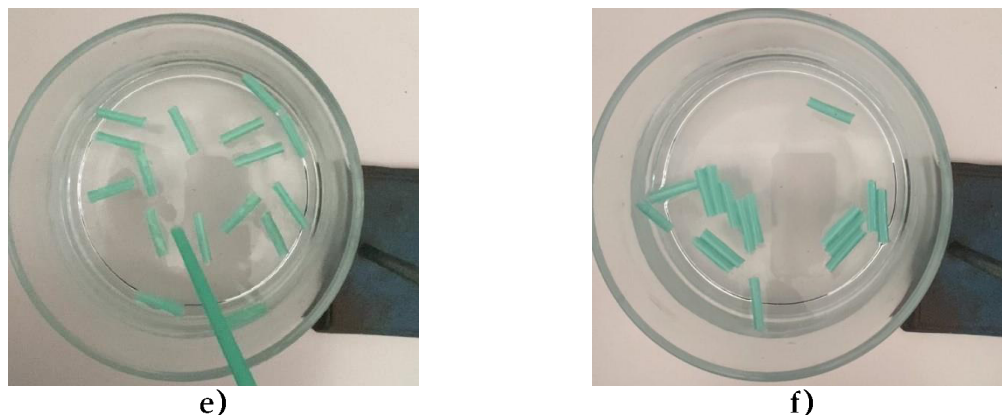


Figura 58. Resultados experimentales de la réplica del ensamblaje espontáneo de popotes: a) Autoensamblaje de popotes con corte transversal; b) Resultado del autoensamblaje de popotes con corte transversal; c) Autoensamblaje de popotes con corte en ángulo; d) Resultado del autoensamblaje de popotes con corte en ángulo; e) Autoensamblaje de popotes con corte longitudinal; f) Resultado del autoensamblaje de popotes con corte longitudinal.

Al variar el diseño de los componentes se observa variación en las estructuras alcanzadas en los estados finales de las corridas experimentales, de igual manera se evidencia variación en el nivel de energía de activación necesaria para lograr el autoensamblaje. Además, se observan diferencias en la cantidad de tipos de uniones posibles y en el rango de fuerzas que mantienen unidas las estructuras. Para todos los casos es evidente la existencia de fuerzas de atracción entre las paredes del medio y los componentes, al igual que la influencia de la forma del contenedor para mantener girando todos los componentes evitando típicamente la formación de estructuras en el centro del medio.

Los dos experimentos de autoensamblaje en escala macroscópica que fueron replicados mediante ingeniería inversa permitieron un amplio conocimiento de las implicaciones de diseñar e implementar físicamente el proceso de formación espontánea. Dentro del desarrollo de la tesis complementó adecuadamente el conocimiento teórico adquirido en el estado del arte y permitió constatar el funcionamiento del autoensamblaje con el objetivo de realizar su implementación como alternativa de construcción de estructuras deseadas dentro del campo de la ingeniería.

2.2.7. Sistemas de autoensamblaje implementados a escala macroscópica a través del tiempo

En la sección anterior se presentaron con suficiente detalle dos implementaciones físicas del autoensamblaje en escala macroscópica y al utilizar ingeniería inversa fue posible construir su réplica experimental. Se tiene conocimiento de un considerable número de implementaciones físicas de autoensamblaje gracias a la revisión del estado del arte, dichas implementaciones fueron satisfactoriamente logradas e igualmente valdrían la pena detallar y replicar con la intención de constituir el más amplio conocimiento posible acerca del proceso. Sin embargo, la labor sería demasiado engorrosa e implicaría gran inversión de tiempo y dinero. Como alternativa, en la Tabla 5 se agrupan 55 implementaciones físicas del autoensamblaje presentando sus factores constitutivos junto a detalles importantes de su diseño, complementando el conocimiento del proceso, pero mediante una descripción más general.

Tabla 5. Implementaciones físicas del autoensamblaje a través del tiempo.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
1957	A self-reproducing analogue [26]	componentes con forma A y B, material de fabricación: madera contrachapada. Semilla AB o BA insertada dentro del medio	pista de deslizamiento horizontal libre, bloqueada en ambos extremos y con restricción de techo para movimiento vertical de gran magnitud	sacudida manual horizontal	unión mecánica debido al diseño de los componentes	No aplica	macroescala	1D	Estático	componentes pasivos
1958	Mechanics of self-reproduction [55]	Múltiples unidades diseñadas con sistemas de activación y enganche mecánico	pistas de deslizamiento	sacudida manual horizontal	unión mecánica debido al diseño de los componentes	Aplica	macroescala	1D	Estático	componentes pasivos
1994	Self-assembling machine [56]	Unidades homogéneas y reconfigurables, llamadas fractum. El tamaño del fractum es 125 mm de diámetro y 160 mm de altura, su peso es de 1.2 kg, sus bobinas consumen 6 W cada una.	Superficie horizontal suave	alimentación de corriente para cambiar la polaridad de los electroimanes, promoviendo movimiento o mediante atracción o repulsión.	Imanes con polaridades permanentes y electroimanes con polaridades alternantes.	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes activos
1994	Dynamics of self-assembling systems: analogy with chemical kinetics [57]	cuerpos triangulares hechos de poliuretano (densidad: 1.07) con imanes permanentes de neodimio (d5x3) incrustados con una densidad de flujo magnético superficial de 0.28 T.	contenedor que restringe el movimiento a un plano	motor eléctrico que rota el contenedor a una razón de 4 rpm y agita las unidades en el interior	imanes permanentes de neodimio ubicados en dos caras laterales de las unidades	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2001	Self-Organization of Template-Replicating Polymers and the Spontaneous Rise of Genetic Information [58]	componentes plásticos A y B, manufacturados de espuma PVC con imanes incrustados de maneras específicas para lograr dos tipos de uniones posibles.	Contenedor rectangular lleno de líquido	Fluctuación es térmicas (ciclos) que provocan dinámicas diferentes en el medio fluido y fuerzas de unión magnéticas variables.	Imanes permanentes de neodimio e imanes temporales con temperatura Curie cercanas a la temperatura ambiente	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2001	molecule-mimetic chemistry and mesoscale self-assembly [59]	objetos 2D fabricados con polidimetilsiloxano (PDMS), con forma de placas hexagonales, algunas caras se trataban para hacerlas hidrofóbicas. Objetos 3D, polidrícos, algunas caras recubiertas con líquido hidrofóbico o soldadura líquida de bajo punto de fusión.	Interfaz perfluorodecalin (PDF)/agua para los ensambles 2D, interfaz isodensa para los ensambles 3D	agitación mediante agitador orbital	fuerzas capilares	Aplica	mesoescala	2D y 3D	Estático	componentes pasivos
2002	Spontaneous assembly of soda straws [47]	tubos plásticos (0.5 cm diámetro, 1.5 cm longitud)	interfaz agua-aire	agitación manual suave	fuerzas capilares	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2002	Autonomous movement and self-assembly [60]	placas hemisilíndricas pequeñas (<1 cm) con una pequeña área de platino en una superficie, las placas son fabricadas de polidimetilsiloxano (PDMS) y además son tratadas con patrones hidrofóbicos e hidrofílicos.	Interfaz líquido/aire, con 1-3% de solución acuosa de peróxido de hidrógeno a temperatura ambiente.	Las placas se movieron bajo el impulso de las burbujas generadas por la descomposición del peróxido de hidrógeno catalizada por platino.	Fuerzas capilares	Aplica	mesoscala	2D	Estático	componentes activos
2007	Mapping Virtual Self-assembly Rules to Physical systems [61]	componentes bidimensionales con forma base cuadrada fabricados de material no magnético, que permitan incluir la forma de una llave (polígono convexo) y una cerradura (polígono cóncavo) diseñadas de manera que encajen entre sí, incluyendo también sitios neutrales donde los componentes no pueden ensamblarse, el autoensamblaje de los componentes se lleva a cabo mediante codificación magnética de 3 bits	superficie de bandeja	agitación paralela a la superficie para transmitir energía a los componentes en forma de vibración.	Discos magnéticos permanentes agregados en los bordes de los componentes.	Aplica	macroscala	2D	Estático	componentes pasivos
2007	Multistate Part for Mesoscale Self-Assembly [62]	componente con forma de cilindro octaédrico diámetro=15 mm, longitud=38 mm, con característica de multiestado "puertas XOR". Los componentes son hechos de ABS. Valores lógicos "0/1" son representados por imanes permanentes incrustados y valores de entrada/salida con complementariedad de formas.	Contenedor rectangular (310 x 240 x 70 mm) que solo permite rotación de las partes en su propio eje.	Agitación manual	imanes permanentes de neodimio y complementariedad de formas.	No aplica	macroscala	2D con componentes 3D	Estático y plantilla	componentes pasivos
2008	Self-Assembly of Millimeter-Scale Components Using Integrated Micromagnets [63]	Bloques de silicio con área superficial de 1 mm ² y un espesor de 500 µm, los cuales son fabricados por un método de microfabricación de wafer. Los bloques se fabrican incrustando polvo imantado de Sm-Co en áreas de 25% o 75% aproximadamente del área total para generar atracción magnética entre los componentes y una placa con sitios receptores en un arreglo de 4 x 4.	Pequeño contenedor de vidrio	agitador electromecánico, que causa un pequeño desplazamiento del contenedor (1.8 mm) causando que los componentes reboten de arriba abajo y se ensamblen con la placa sustrato.	Polvo magnético de Sm-Co incrustado en parte del área superficial de los bloques. Dependiendo del área recubierta las fuerzas de unión magnética son aproximadamente mayores a 100-200 µN, superando al peso de cada componente que es de aproximadamente 12 µN.	No aplica	mesoscala	3D	Estático y plantilla	componentes pasivos

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2008	How Morphology Affects Self-Assembly in a Stochastic Modular Robot [64]	Tribolon: unidades modulares macroscópicas capaz de moverse. Cada módulo consistía en una forma de cuña que abarcaba un ángulo de 60 grados de plástico duradero (acrilonitrilo butadieno estireno ABS), los módulos son pequeños y livianos con un peso aproximado de 2,8 gr que cubren una área de 12,25 cm ² .	Superficie de agua, (83,3 g/l de sal y electrolitos) se agregaron al agua para hacerla conductiva.	Un pequeño motor vibrador en la parte superior. Se utiliza un sistema pantográfico o para alimentar el motor con energía. Cuando un potencial eléctrico se aplica a la placa del techo (hecho de aluminio), corriente pasa a través del pantógrafo al motor y regresa a tierra mediante electrodos sumergidos en el agua.	Un imán permanente unido a la superficie inferior del módulo y orientado ortogonalmente a el eje principal del módulo. El imán fue hecho de neodimio y tenía una densidad de flujo magnético superficial de 1,3 T.	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes activos
2009	The influence of shape on parallel self-assembly [65]	mosaicos flotantes de diferentes formas (circular, cuadrado con esquinas redondeadas y cuadrado), idéntico peso (0,2 g), superficie (484 mm ²) y espesor (2 mm). Colores para distinguir entre mosaicos que se atraen y repelen y para facilitar la inspección visual	contenedor circular lleno de agua	tanque de agua con dos vibradores (4 Hz, 6,5 V, 0,5 A) que inducían turbulencias en la superficie del agua y, por lo tanto, proporcionó aleatoriedad	imanes en el centro del área orientados verticalmente. En el agua, un mosaico flotante cuyo imán apuntaba hacia arriba atraía a otra cuyo imán apuntaba hacia abajo, mientras que las tejas con el mismo tipo de imanes se repelían entre sí.	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2010	Evolving Physical self-assembling systems in two-dimensions [66]	componentes fabricados usando una máquina de creación rápida de prototipos Eden 333 Polyjet, usando resina Vero Gray. Se utilizó pintura azul/roja (norte/sur) para marcar patrones magnéticos. Los componentes físicos se definen por su espacio de diseño, el conjunto de diseños físicamente factibles. El espacio de diseño es una combinación de un espacio de forma y un espacio de protocolo de montaje. Un concepto neutral de cerradura y llave define el espacio de forma. Un esquema de codificación de 3 bits magnéticos define el espacio del protocolo de ensamblaje. Los imanes no están al ras con la superficie creando un espacio de aire, para ser ajustables y permitir una unión selectiva.	Bandeja circular. La bandeja se fabricó utilizando una máquina de creación rápida de prototipos Dimensions Elite, utilizando plástico ABS (se utilizó la opción de relleno escaso para crear una textura de superficie rugosa). El radio exterior de la bandeja es de 135 mm y el radio interior es de 125 mm, mientras que la altura de la pared exterior es de 9 mm y la altura de la pared interior es de 6 mm. Se cortó la tapa de una bandeja usando una máquina de corte por láser Trotec Speedy 300 Laser Engraver, usando una lámina acrílica transparente de 2 mm. La tapa de la bandeja se fijó a la bandeja mediante tornillos de policarbonato y tuercas de mariposa.	La bandeja se montó en un mezclador Vortex Maxi Mix II (usando un soporte de montaje de bandeja, también fabricado usando la impresora Dimensions).	Imanes de disco de neodimio (NdFeB) (1/16" × 1/32", diámetro × radio; grado N50) en los componentes	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2010, 2011	Fluidic Manipulation for Scalable Stochastic 3D Assembly of Modular Robots [67], Programmable 3D stochastic fluidic assembly of cm-scale modules [68]	módulos cúbicos de 15 mm. Los módulos se imprimieron en una impresora 3D Objet EDEN260V a partir de su material fotopolímero de base acrílica transparente FullCure720.	Tanque de ensamblaje de 1.3 L lleno de agua.	Una bomba proporciona a un flujo de alta presión a un conjunto de válvulas de control que se pueden abrir para que los puertos activos sirvan como fuentes de fluido. Se puede abrir un segundo conjunto complementario de válvulas solenoides para conectar los puertos al extremo de baja presión del circuito fluido, haciendo que sirvan como sumideros. Un camino alternativo permite que el fluido fluya a través de la parte superior del tanque cuando todas las válvulas están cerradas.	Los módulos tienen un patrón rotacionalmente simétrico cuádruple de protuberancias y depresiones en cada lado para alinear los lados de los módulos cualesquiera cuando se acercan con cualquier orientación a la configuración de celosía regular más cercana. Además, cuatro pestillos en cada cara se acoplan con cuatro formas complementarias en una cara adyacente para mantener juntos los cubos ensamblados. Fuerza de cierre promedio de 1,8 N y una fuerza máxima de 3,4 N	Aplica	macroescala	2D	Estático y plantilla	componentes pasivos
2011	How reverse reactions influence the yield of self-assembly robots [69]	módulos llamados Tribolon, mosaicos con forma de sector circular que abarcan un ángulo $\alpha = 60^\circ$. La característica de esta forma es que mantiene similitud geométrica independientemente del cambio de ángulo. Ligeros (2,8 g cada uno).	Contenedor lleno de agua conductora (solución salina), en lugar de utilizar baterías para cada módulo, se opta por suministrar electricidad a través de un pantógrafo que extrae corriente de un techo metálico. Cuando se aplica un potencial eléctrico a la placa del techo, la corriente fluye a través del pantógrafo hasta el motor de vibración y regresa a tierra a través de electrodos de platino sumergidos en el agua.	Motor de vibración plano sin núcleo (motor CC FM34F, 12 000 ~ 14 000 rpm (2,5–3,5 V) en la parte superior de la placa base para permitir la autopropulsión	imán permanente (densidad de flujo $1,3 \text{ T}$, $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$) en la parte inferior para interacciones atractivas/repulsivas	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes activos
2011	Using Magnetic Levitation for Three Dimensional Self-Assembly [70]	objetos diamagnéticos, programados por forma y distribución de densidad generalmente fabricados de PMMA y PVC	contenedor cerrado con medio fluido paramagnético (solución acuosa de MnCl_2)	levitación magnética (MagLev), campo magnético generado por imanes de NdFeB, y drenado del medio paramagnético	los componentes carecen de interacciones atractivas notables	No aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2011	Templated self-assembly in three dimensions using magnetic levitation [71]	esferas poliméricas diamagnéticas de polimetilmetacrilato (PMMA)	fluido paramagnético (solución acuosa de MnCl ₂)	levitación magnética (MagLev), campo magnético no uniforme, consta de dos imanes permanentes de NdFeB orientados con polos iguales enfrentados (configuración anti-Helmholtz), plantillas mecánicas duras, agitación mecánica mediante micromotor no balanceado (del tipo que produce vibraciones en un teléfono celular)	adhesivo fotoendurecible, seguida de iluminación ultravioleta	Aplica	mesoscala	3D	Estático y plantilla	componentes pasivos
2011	Staging the Self-Assembly Process Using Morphological Information [72]	El espacio de diseño es una combinación de una forma y un espacio de protocolo de montaje. Tanto para componentes 2D como 3D, un concepto de cerradura-llave-espacio neutral define el espacio de forma. Un esquema de codificación lineal de 3 bits magnéticos y plano de 5 bits magnéticos definen el espacio del protocolo de ensamblaje para componentes 2D y 3D, respectivamente. Se utilizó una máquina de creación rápida de prototipos Eden 333 Polyjet para fabricar los componentes con resina Vero Grey. Pintura azul/roja (norte/sur) marcaba los imanes.	Los componentes 2D se colocan en la superficie de una bandeja y se utiliza una tapa para restringir los componentes en el plano. El tamaño del entorno se asignó de acuerdo con el tamaño del componente base, para especificar las dimensiones del entorno de la bandeja circular. La bandeja se fabricó utilizando una máquina de creación rápida de prototipos Dimensions Elite, utilizando plástico ABS (se utilizó la opción de relleno escaso para crear una textura de superficie rugosa). El radio exterior de la bandeja es de 135 mm y el radio interior es de 125 mm, mientras que la altura de la pared exterior es de 9 mm y la altura de la pared interior es de 6 mm. Se cortó la tapa de una bandeja usando una máquina de corte por láser Trotec Speedy 300 Laser Engraver, usando una lámina acrílica transparente de 2 mm. La tapa de la bandeja se fijó a la bandeja mediante tornillos de policarbonato y tuercas de mariposa. Los componentes 3D se colocan en un frasco de aceite mineral para permitir que se muevan libremente en el espacio 3D y evitar que la oxidación afecte a los imanes. Frascos de vidrio transparente de 500 ml de boca ancha con tapas revestidas de goma para contener los componentes (91 mm x 95 mm; diámetro x altura). Se utilizó una grabadora láser Trotec Speedy 300 para construir las piezas, utilizando una lámina acrílica de 3 mm, para el estante de los frascos. El bastidor se ensambló con adhesivo, tornillos y tuercas hexagonales. Se midieron 325 ml de aceite mineral ligero Rogier Pharma utilizando una probeta graduada y se vertieron en los frascos.	Agitadores orbitales en los entornos para componentes 2D y 3D, mezclador Vortex Maxi Mix II (usando un soporte de montaje de bandeja, también fabricado usando la impresora Dimensions). La rejilla para frascos se colocó en un agitador de plataforma New Brunswick Scientific Excella E1.	Imanes colocados dentro de los bordes o caras de los componentes 2D y 3D respectivamente que no están al ras con la superficie del componente. El resultado de un espacio de aire permite interacciones de componentes ajustables y uniones selectivas. Imanes de disco de neodimio (NdFeB) (1/16" 1/32", radio de diámetro; grado N50) en los componentes. Las interacciones entre cerraduras nunca pueden ocurrir debido a su forma. Se garantiza un vínculo fuerte para las interacciones de llave a cerradura y un vínculo débil entre las interacciones de llave a llave.	No aplica	macroscala	2D y 3D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2011	Self-assembly of magnetically interacting cubes by a turbulent fluid flow [73]	cubos magnéticos de polidimetilsiloxano (PDMS)	flujo de fluido turbulento con 0.3 M CsCl (para igualar la densidad de los cubos) y 10 mM Triton-X 100 (para minimizar la formación de burbujas con la agitación)	agitación mediante disco giratorio	imanes en forma de disco (1/8" de diámetro y 1/32" en espesor, hecho de NdFeB) incrustado en el centro de una cara del cubo, con el polo norte hacia afuera, y en la cara opuesta un prisma cuadrado de NiCu ferromagnético o blando de 1/4" x 1/4" x 1/8"	Aplica	mesoscala	3D	Estático	componentes pasivos
2011	Programming and evolving physical self-assembling systems in three dimensions [74]	cubos de tamaño unitario de resina vero grey, cada cara del cubo sirve como una ubicación de información, si no hay información asociada con una ubicación, se define como neutra, un patrón de 5 bits magnéticos por cara, adicionalmente se utiliza un par de formas complementarias de llave y cerradura para crear uniones estables	frasco con líquido y aceite mineral utilizado para evitar la corrosión de los imanes permanentes y para proporcionar la viscosidad adecuada que permite el movimiento de los componentes libremente en tres dimensiones	agitación mediante agitador orbital New Brunswick Scientific Excella E1	discos magnéticos permanentes de NdFeB grado N50 agregados en las caras de los componentes	Aplica	macroscala	3D	Estático	componentes pasivos
2012	The self-assembly line [27]	componentes para formar una estructura dodecaédrica como objetivo, una unidad impresa en 3D, para generar un molde de caucho negativo y una unidad de aluminio hueco para formar el interior, para posteriormente verter espuma flexible líquida.	Contenedor grande de aproximadamente 10' x 10' x 15', que gira alrededor de un solo eje, elaborado de tiras de HDPE.	Rotación manual del contenedor	cada componente tiene cinco caras, cada una con dos imanes, uno positivo y otro negativo.	Aplica	macroscala	3D	Estático	componentes pasivos
2012	Morphology-Induced Collective Behaviors: Dynamic Pattern Formation in Water-Floating Elements [8]	elementos flotantes de diferente forma (círculo, cuadrado y triángulo), cuyas áreas y espesores se fijaron igualmente en 12,25 cm ² y 6,2 mm, respectivamente. Cada tipo de elemento tiene dos rasgos diferentes, a saber, elementos activos y elementos pasivos.	Contenedor circular lleno de agua conductora (solución de NaCl, 83,3 g/l), sistema de pantógrafo y electrodos de platino que pueden derivar electricidad a través del pantógrafo desde el techo. Cuando se aplica un voltaje a la placa del techo (7 V), la corriente pasa a través del pantógrafo hasta el motor de vibración, regresando al suelo a través del electrodo sumergido en el agua.	Todos los elementos activos están equipados con motores de vibración FM34F, 12000–14000 rpm (2,5–3,5 V) que agitan los elementos. Los elementos pasivos se mueven sólo cuando experimentan fuerzas externas.	Los componentes carecen de interacciones atractivas notables	Aplica	macroscala	2D	Dinámico	componentes activos y pasivos
2012	A simple two-dimensional model system to study electrostatic self-assembly [75]	objetos poliméricos (esferas, cubos y cilindros), fabricados de materiales como Nylon, Delrin, poliestireno, teflón, tórlon, aluminio, polimetacrilato de metilo, polipropileno, polietileno de alta densidad, la variedad de los materiales fue parte del estudio y se seleccionaron debido a su ubicación en diferentes puntos dentro de la serie triboeléctrica	superficie plana lisa (generalmente hecha de aluminio), otros materiales utilizados fueron nylon, Delrin, teflón y polimetacrilato de metilo	agitación mecánica orbital, lineal o una combinación de ambos tipos	carga electrostática (electrificación por contacto)	Aplica	mesoscala	2D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2013	A macroscopic device described by a Boltzmann-like distribution [76]	objetos de tamaño milimétrico, esferas de polímero y una cadena con eslabones flexibles (cilindros conectados por una cuerda)	superficie horizontal plana de 1m ² de área delimitada por paredes verticales de aluminio con forma circular con diámetro de 0.48 m para la zona de mezcla. Toda la zona superficial de mezcla se cubre con papel para generar un coeficiente de fricción aproximadamente constante. Para evitar cualquier posible carga eléctrica mediante electrificación de contacto dentro de la configuración experimental, se mantiene una humedad relativa de más del 60% RH usando un humidificador conectado al espacio cerrado sobre la placa	agitación pseudoaleatoria, que es una combinación de agitación orbital con "patadas" cronometradas aleatoriamente mediante un actuador lineal	los componentes carecen de interacciones atractivas notables	Aplica	macroescala	2D	Dinámico	componentes pasivos
2013	Morphological computation on two dimensional self-assembly system [51]	componentes cúbicos con patrones cóncavos y convexos en sus caras	contenedor acrílico que restringe el movimiento de los componentes a dos dimensiones	agitación manual y mediante robot agitador	imanes con polaridades opuestas en el centro de las caras necesarios para crear la complementariedad entre los componentes	No aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2014	Fire ants actively control spacing and orientation within self-assemblages [77]	hormigas de fuego o coloradas	entornos con obstáculos y hostiles	cambios en el entorno	conexión de las hormigas a través de sus patas y mandíbulas	Aplica	macroescala	2D y 3D	Biológico	componentes activos
2014	Self-assembly of a swarm of autonomous boats into floating structures [23]	módulos flotantes o barcos	piscina	propulsores en cada esquina de los módulos	mecanismo de conexión macho a hembra para conectar módulos entre sí	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes activos
2014	Customizing mesoscale self-assembly with three-dimensional printing [24]	componentes en forma de cruz impresos en 3D con curvaturas diferentes, y longitudes de ramas diferentes, el material utilizado para las impresiones es acrilonitrilo butadieno estireno	interfaz líquido-aire	curvatura de los objetos, no existe una fuerza perturbadora adicional que facilite el autoensamblaje.	Fuerzas capilares (multipolares capilares que inducen fuerzas de atracción o repulsión)	Aplica	mesoescala	2D	Estático	componentes pasivos
2014	A Geometrical Approach to the Incompatible Substructure Problem in Parallel Self-Assembly [9]	componentes hechos de resina de fotopolímero FullCure 720 de sector angular de una circunferencia objetivo impresos en 3D	superficie en forma circular, la base hecha de ABS-M30, y las tapas hechas de acrílico transparente	agitación mediante agitador orbital Excella E5 ajustado a 300 rpm	magnetismo para generar atracción o repulsión de los componentes, se insertan imanes permanentes de NdFeB (N48, diameter x height: 2 mm x 1 mm), y micro tornillos ferromagnéticos M1.4 (stainless steel, countersunk, 4 mm length)	Aplica	mesoescala	2D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2015	Exploiting non-equilibrium phase separation for self-assembly [22]	Sólidos poliméricos macroscópicos a partir de láminas de PMMA (Polimetilmetacrilato), una gran cantidad de esferas, seis prismas triangulares y un objeto en forma de estrella	Recipiente circular poco profundo, con superficie cubierta de papel (Padeless brand, purchased from Pacon Corp), para lograr una rugosidad que permitiera que las esferas rueden fácilmente, pero los prismas triangulares y la estrella, no se muevan a menos que sean golpeadas por otros sólidos.	Agitación mediante agitador orbital y actuador lineal	los componentes carecen de interacciones atractivas notables, pero se estudia la separación de fases o fasces coloidales para llevar a cabo el autoensamblaje	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2015	Using magnetic levitation for 2D and 3D self-assembly of cubic silicon macroparticles [78]	Cubos de silicio	fluido paramagnético (solución 2M de GdCl ₃ , Sigma Aldrich G7532, gadolinium (III)chloride hexahydrate 99%), en agua desmineralizada	campo magnético proporcionado por dos imanes de NdFeB, intensidad del campo de 1.25 T, que generaba levitación magnética y un piezoactuador (FPA-0150E-S-0518-150-SS-1M3 FlexFrame PiezoActuator, Dynamic Structures & Materials, LLC), que introducía vibraciones en el sistema	los componentes carecen de interacciones atractivas notables, pero se estudia el cambio en la hidrofilia de los cubos	Aplica	mesoescala	2D y 3D	Estático y plantilla	componentes pasivos
2015	Self-assembly gets physical [79]	Unidades de ensamblaje idénticas en forma de pentágono para construir la cápside esférica completa del poliovirus	recipiente de plástico cerrado	agitación manual	imanes, complementariedad polar de las interacciones magnéticas en los bordes	Aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2015	Self-assembly of magnetic spheres in two dimensions: The relevance of onion-like structures [80]	imanes esféricos (commonly called Buckyballs or Neodyme spheres)	superficie 2D	interacciones dipolares	imanes de NdFeB	Aplica	mesoescala	2D	Estático	componentes pasivos
2015	Meshing complex macro-scale objects into self-assembling bricks [14]	bloques tetraédricos impresos en 3D con señales topográficas en las caras (impresora 3D Stratasys / Object Eden 250 utilizando VeroWhite o DurusWhite como materiales de impresión)	contenedor	agitación mediante agitador orbital Multitron con control de velocidad de hasta 400 rpm.	Imanes de disco permanentes de neodimio-hierro (N45, 2,8 mm×0,8 mm) se pegaron a los bloques utilizando pegamento de cianoacrilato comercial. Incrustados en el centro de las señales topográficas	No aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2016	Characterization and validation of a novel robotic system for fluid-mediated programmable stochastic self-assembly [81]	robots Lily	Tanque circular lleno de agua. El tanque tiene aproximadamente 1,2 m de diámetro y 0,3 m de profundidad, y tiene siete entradas perpendiculares a la pared que están dotadas de una pequeña pieza insertada para desviar el flujo unos 15 grados, creando un campo de flujo con componentes tanto radiales como circulares.	Agua, campo de flujo producido por bombas periféricas. El caudal de cada bomba se puede controlar continuamente hasta 9 l/min.	Electroimanes permanentes	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes activos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2016	Fluid-Mediated Stochastic Self-Assembly at Centimetric and Sub-Millimetric Scales: Design, Modeling, and Control [19]	módulo Lily pasivo, es un bloque de polímero impreso en 3D de 3 cm de tamaño con una forma robusta centro-simétrica diseñada para mejorar la alineación de los módulos que interactúan y un bloque de aluminio en el centro de la carcasa que mejora la flotación	interfaz liquido-aire	son agitados por el flujo creado por 4 bomba de diafragma conectadas a través de seis entradas (cuatro ortogonales y dos tangenciales, controladas de manera individual para variar patrones de flujo.	Imanes permanentes SmCo de 2 mm de diámetro y 1 mm de altura	Aplica	macroscala	2D	Estático	componentes pasivos
2017	Yield prediction in parallel homogeneous assembly [21]	Sectores circulares con un radio de 25 mm, con 4 ángulos de sector diferentes: 45, 60, 72 y 90 grados, sectores cuadrados con longitud lateral de 22 mm, y sectores triangulares isósceles idénticos, los lados iguales y el lado de la base miden 38 mm y 67 mm respectivamente, todos los componentes impresos en 3D planeadas para lograr estructuras objetivo: círculo, cuadrado y triángulo.	Contenedor cilíndrico	Agitación mediante agitador orbital (New Brunswick Innova 2300)	imanes de NdFeB (N48, supermagnete Webcraft GmbH), incrustados en el centro de dos caras adyacentes de los componentes con orientaciones opuestas	No aplica	macroscala	2D	Estático	componentes pasivos
2017	Self-assembly of smart mesoscopic objects [25]	componentes en forma de cruz activos o inteligentes mediante molde de polímero. Vinilpolisiloxano líquido. El módulo de Young de este polímero es bajo ($Y=1$ Mpa) para generar deformaciones elásticas relevantes.	Interfaz liquido-aire	Campo magnético vertical generado por bobina de Helmholtz a través del sistema en conjunto con imanes de neodimio (1mm de espesor) incrustados en las cuatro ramas del componente.	Cargas capilares positivas o negativas inducidas por la perturbación, cabe resaltar que la interacción entre dipolos provenientes de componentes vecinos es débil pero no nula.	Aplica	mesoscala	2D	Estático	componentes activos
2017	from self-assembly to evolutionary structures [11]	globos meteorológicos de 90cm, rodeados por un marco de varillas de fibra de vidrio, en forma de octaedros truncados.	Aire	impulso por ventiladores en el suelo	nodos que contenían velcro macho/hembra	Aplica	macroscala	3D	Estático	componentes pasivos
2018	Selective Bonding Method for Self-Assembly of Heterogeneous Components Using Patterned Surfaces [15]	bloques cuadrados de igual tamaño, fabricados de PDMS (polidimetilsiloxano), con superficies hidrófobas parcialmente hidrófilas con patrones diseñados.	Agua	Agitación mediante agitador de hélice controlado por computadora	Tensión interfacial generada entre el agua y una fase oleosa con patrones adhesivos diferentes (aceite de parafina líquida)	Aplica	mesoscala	3D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2018	Self-assembly of magnetic spheres: a new experimental method and related theory [82]	bolas magnéticas de neodimio en la placa de vidrio en una distribución uniforme pero aleatoria. 200 piezas de bolas magnéticas grandes de 5 mm a una distancia de 3 a 4 cm inicialmente.	Delgada placa de vidrio de 50 x 70 cm con un marco de madera. El vidrio se pegó al marco. Cuatro patas de aluminio sostenían la placa de cristal enmarcada a 30 cm de altura. Debajo de la placa de vidrio se colocó una placa de hierro muy ajustada. La placa de hierro estaba fijada a una rejilla de madera y dos brazos de sujeción.	Separación entre la placa de vidrio y la placa de hierro lo cual modificaba la interacción magnética entre las bolas y la placa de hierro, convirtiendo en dominante la interacción entre bolas una vez se separaban cierta distancia de la placa de hierro, lo cual generaba el autoensamblaje	fuerzas magnéticas	No aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2018	Macroscopic equivalence for microscopic motion in a turbulence driven three dimensional self-assembly reactor [3]	esferas poliméricas (ABS) impresas en 3D con diámetros de 1.67 cm a 2.02 cm y una densidad correspondiente de 1.33 a 1.25 g/cm ³	Agua	flujo turbulento ascendente (proporciona energía cinética estocástica), equipo de bombeo	imanes cilíndricos de NdFeB magnetizados axialmente (Supermagnet e, grade N42, Webcraft GmbH)	Aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2018	Kinetics of orbitally shaken particles constrained to two dimensions [83]	Sectores geométricamente iguales de un círculo, con un radio de 25 mm y espesor de 7 mm, los sectores comprendían un ángulo de 45 grados, los sectores se imprimieron en 3D utilizando poliamida (PA 12)	Contenedor cilíndrico, con superficie interior ligeramente rugosa	Agitación mediante agitador orbital	los componentes carecen de interacciones atractivas notables	No aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2019	Magnetic handshake materials as a scale-invariant platform for programmed self-assembly [84]	Discos acrílicos o de mylar-película de políéster BoPET (terefalato de polietileno biaxialmente orientado) con 4 orificios para inserción de imanes.	Contenedor cilíndrico	Vibrador controlado por un amplificador y un generador de funciones	imanes cilíndricos de neodimio (grado N48) con dipolos magnéticos incrustados con patrones específicos en los componentes	Aplica	mesoescala	2D y 3D	Estático	componentes pasivos
2020	Three-dimensional self-assembly using dipolar interaction [7]	Carcasas de polímero de diferentes formas (esferas, cilindros y cubos), fabricadas mediante impresión 3D	Agua	flujo turbulento ascendente (proporciona energía cinética estocástica), equipo de bombeo	imanes permanentes de tamaño milimétrico (NdFeB magnetizado axialmente), incrustados en los componentes	Aplica	macroescala	2D y 3D	Estático	componentes pasivos
2020	Selective self-assembly of three-component system based on hydrophilic/hydrophobic patterning [17]	Discos de igual tamaño, fabricados de PDMS (polidimetilsiloxano), con superficies hidrófobas parcialmente hidrófilas con patrones diseñados	Agua	Agitación mediante agitador de hélice controlado por computadora	Tensión interfacial generada entre el agua y una fase oleosa con patrones adhesivos diferentes (aceite de parafina líquida)	Aplica	mesoescala	3D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2020	A Thermodynamic Description of Turbulence as a Source of Stochastic Kinetic Energy for 3D Self-Assembly [4]	Esferas de polímero de 2 cm de diámetro	Agua	Flujo turbulento ascendente que genera la función de levitación contrarrestando la gravedad, y agitación mediante introducción intencional de flujo turbulento mediante entradas de fluido asimétrica, equipo de bombeo	imanes permanentes incrustados en los componentes	Aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2020	Statistical reprogramming of macroscopic self-assembly with dynamic boundaries [85]	Partículas en forma de disco que se repelen magnéticamente con un diámetro $\rho = 5$ mm	Mecanismo de confinamiento dinámico inspirado en la apertura de la cámara que consistía en hojas estrechamente dispuestas y deslizantes reversiblemente, el rango de R estaba dictado por la geometría del mecanismo de confinamiento y podía cambiarse de $R_{MAX} = 47,5$ mm a $R_{MIN} = 20,5$ mm. El movimiento se limita dentro de la arena a 2D con una tapa transparente. Se controla dinámicamente el radio de la arena y su tasa lineal de cambio a lo largo del tiempo (es decir, tasa de confinamiento) a través de un mecanismo de confinamiento engranado y así se regula el espacio libre disponible para las partículas.	Agitador orbital programable. El agitador transfiere energía cinética a las partículas mediante fricción deslizante y colisiones inelásticas con las paredes de la arena.	Imán permanente cilíndrico y concéntrico	Aplica	macroescala	2D	Dinámico	componentes pasivos
2020	Switchable self-assembled capillary structures [13]	Objetos con forma de rombo con ángulos internos de 60° y 120° fabricados de polímeros con memoria de formas. La longitud del lado es de 1 cm y el espesor del rombo es de 0.5 mm.	interfaz liquido/aire	Cambio de la temperatura del líquido mediante resistencias eléctricas en el fondo del contenedor que generan el cambio de forma (curvatura) de los objetos. Adicionalmente se genera dos efectos adicionales débiles: modificación de la tensión superficial y agitación por fluctuaciones convectivas debajo de la interfaz.	Interacciones capilares multipolares que pueden modificarse/activarse mediante cambios de forma	Aplica	macroescala	2D	Dinámico	componentes activos

AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	COMPONENTES	MEDIO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	FUERZA DE UNIÓN	REVERSIBILIDAD	ESCALA	DIMENSIÓN	TIPO DE AUTOENSAMBLAJE	TIPO DE COMPONENTES
2020	Centimeter-scaled Self-assembly: A Preliminary Study [2]	mosaicos de 3 cm de lado, altura de 1,5 cm. El peso es de 6,28 g. Los mosaicos se imprimieron a partir de plásticos PLA en una impresora Prusa MK3S con una extrusora de 0,4 mm	reactor circular de cartón (con un diámetro de 30 cm), plano 2D, que está montado en un manipulador robótico de 6 DoF (UR5) para proporcionar energía de excitación. El reactor también está equipado con una cámara, que observa el proceso desde la parte superior	agitación mecánica mediante manipular robótico de 6DoF	Cada lado del mosaico lleva un código ensamblado a partir de imanes permanentes, imanes Nd-FeB (N50) con un tamaño 3×3×1 mm. Los imanes están dispuestos en barras de tamaño 18×5×1,6 mm. Cada una de estas barras puede soportar 3 imanes. Los imanes se ensamblan con varias orientaciones de los polos sur y norte	Aplica	macroescala	2D	Estático	componentes pasivos
2021	Towards a Passive Self-Assembling Macroscale Multi-Robot System [5]	mosaicos fabricados con la impresora 3D Elegoo Mars con una resina fotosensible similar a Prusa ABS. Cada mosaico pesa 16 g, su ancho es de 27 mm y su altura de 26 mm.	Una plataforma que sostiene los mosaicos y restringe su movimiento en un plano 2D, delimitado por una barrera circular con un diámetro de 30 cm, montada en un manipulador UR5	movimiento elíptico periódico con una velocidad lineal constante, mediante manipular robótico de 6 DoF	bloques magneto-mecánicos (cerradura y llave)	Aplica	macroescala	2D	Estático y plantilla	componentes pasivos
2021	Self-assembly of millimeter-scale magnetic particles in suspension [86]	Partículas de plástico de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) de diferentes formas: varillas, tripodes, cuadrantes circulares y codos.	Mezcla de glicerol y agua (26% en volumen de glicerol, densidad $\rho_f = 1,04 \text{ g ml}^{-1}$, viscosidad = 2 cP) dentro de un reactor de columna de burbujas (largo = ancho = 190 mm, alto = 395 mm)	Aire comprimido ingresa al fondo del reactor a través de nueve agujas espaciadas uniformemente (diámetro interno de la aguja = 0,66 mm, longitud = 14 mm). Un caudalímetro de alta resolución (Brooks Instruments 1250-55) monitorea continuamente el caudal de aire.	Pequeños imanes de neodimio chapados en Ni-Cu en forma de disco (diámetro = 1,6 mm, espesor = 0,8 mm) en ambos extremos de cada partícula con un polo magnético expuesto preasignado, ya sea Norte N o Sur S.	Aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2022	Self-assembly at a macroscale using aerodynamics [16]	pelotas de tenis de mesa que representan el núcleo atómico natural (ligero en peso y redondo en forma). Pelotas con diámetro de 40 mm y peso de 3 g	jaula de ensamblaje con generador de flujo de aire controlado numéricamente desde la parte inferior. La jaula es cerrada en forma de embudo rodeado por redes para evitar obstaculizar el paso del flujo de aire	flujo de aire ascendente	imanes ubicados en la superficie de las pelotas	Aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos
2022	Selective self-assembly using re-programmable magnetic pixels [87]	módulos cúbicos huecos de 25 mm de PLA con matrices magnéticas de 8 x 8 capas de codificar 264 caras de módulos con permutaciones únicas. El material magnético blando (imanes de nevera de bajo costo) son adheridos a los lados del cubo	recipiente de vidrio (cúbico, de 200 mm de longitud de lado) lleno con agua	bomba hidráulica (Hygger WaveMaker 1600 gph) provocando movimiento browniano (movimiento estocástico)	programación magnética de las caras de módulos con codificaciones que se acoplan de manera única basadas en matrices de Hadamard (píxeles magnéticos)	No aplica	macroescala	3D	Estático	componentes pasivos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

2.3. AUTOENSAMBLAJE A ESCALA MACROSCÓPICA DE CLAVIJA EN AGUJERO EN TRES DIMENSIONES

2.3.1. Observaciones iniciales mediante prototipo básico del banco experimental de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones

El principal problema del autoensamblaje consiste en determinar las estructuras deseadas, partiendo de las características locales del sistema previamente establecidas, o viceversa, determinar las características locales que produzcan el resultado de una estructura esperada. La tesis plantea insertar una clavija en un agujero mediante la implementación de un prototipo físico de autoensamblaje, es decir, requerimos a partir del conocimiento previo resolver características locales de un sistema capaz de realizar la tarea de ensamblaje previamente establecida enfocándonos principalmente en el cómo.

Con el conocimiento base del estado del arte que aborda ensamblaje y autoensamblaje nos enfocamos en una tarea específica dentro de innumerables ensamblajes de la ingeniería mecánica (inserción de clavija en agujero), si bien se establece como un ensamblaje que permite evaluar generalidades de cualquier ensamblaje al estar constituido por una etapa de manipulación y otra posterior de inserción, es evidente que no generamos de momento una estructura que agrupe multitud de piezas como se acostumbra hasta ahora en las implementaciones físicas mencionadas anteriormente. Sin embargo, si nos permite acercarnos a la implementación física del autoensamblaje dentro de problemas de la ingeniería mecánica y sentar bases para futuros estudios de autoensamblaje que se enfoquen, por ejemplo, en juntas atornilladas ampliamente utilizado de manera industrial y cuyo caso base precisamente es la inserción de una clavija en agujero.

Entonces, como punto de partida se consideran las características de los componentes (clavija y agujero) como sigue para el prototipo básico de autoensamblaje (se planteó para observar el fenómeno físicamente), ver Figura 59: 1) clavija cilíndrica ya que cuenta con simetría tanto de extremo a extremo como rotacional, entonces se considera una pieza con alta simetría únicamente por debajo de una forma esférica y esto facilitará su orientación, aunado a presentar un acercamiento básico a la forma de un tornillo, 2) clavija cilíndrica sin chaflán y agujero sin chaflán, ya que al resolver un prototipo capaz de autoensamblar estos componentes sin esta característica que favorece el ensamblaje entonces nuestro sistema sería más robusto, 3) mínimo una relación entre el diámetro de la clavija y su altura de uno, ya que cuando el diámetro de la clavija es mayor o igual a su altura tiende a no considerarse como pieza cilíndrica y presentan mayor dificultad de agarre e inserción, 4) clavija ligera teniendo presente que a mayor peso de las partes en la macroescala generalmente se incrementa la dificultad de agarre y manipulación, 5) Existencia de holgura entre la clavija y el agujero, debido a conocimiento previo de ensamblaje no se desea partir de un ensamblaje con interferencia puesto que requeriría mayores consideraciones, 6) Agujero pasante que facilita la inserción frente a un agujero ciego, 7) diámetro nominal de la clavija de $\frac{1}{4} \text{ in} = 6.35 \text{ mm}$ para iniciar en el límite entre la mesoescala y la macroescala, esta consideración permite generar un prototipo básico de menores dimensiones, sencillez y con menor material, aunado a que nos permite visualizar la escalabilidad del diseño.



a)



b)

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

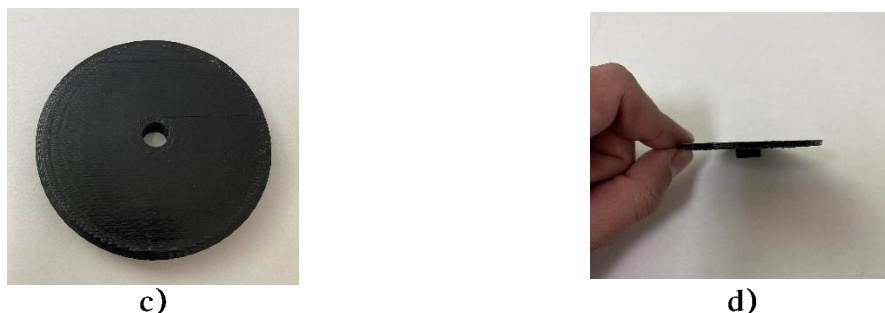


Figura 59. Componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero: **a)** vista superior de las clavijas de diámetro de 6.35 mm; **b)** vista frontal de las clavijas con alturas diferentes ($h=d$, $h=2d$, $h=3d$); **c)** Vista superior de la superficie de contacto de las clavijas con un agujero central pasante de diámetro 6.35 mm (área superficial=2792.2 mm²); **d)** vista frontal de la superficie de contacto de las clavijas con el agujero que permite observa la altura del agujero igual al diámetro de las clavijas.

Los componentes son fabricados mediante impresión 3D de filamento y resina. Las impresoras 3D utilizadas para la fabricación de los componentes son la Makerbot Replicator (impresora 3D de filamento) y la Elegoo Mars (impresora de resina), ver Figura 60.

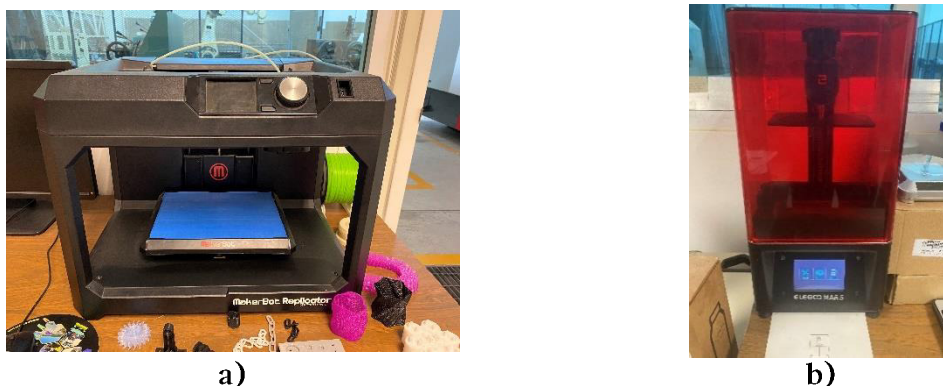


Figura 60. Impresoras 3D utilizadas para fabricar los componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero: **a)** Makerbot Replicator; **b)** Elegoo Mars.

Los materiales utilizados fueron filamento PLA makerbot de 1.75 mm (carrete pequeño, 0,5 lb, color negro) para la superficie de contacto de las clavijas con agujero central y resina de fotopolímero ABS Elegoo (Frasco de 500 g, longitud de onda UV 405 nm, color gris). El filamento PLA makerbot es un biopolímero derivado del maíz con resoluciones de capa de 100 y 200 micrómetros para precisión dimensional de la pieza terminada de ± 0.2 mm y temperatura de fusión de 190-230 °C. La resina de fotopolímero ABS Elegoo es un tipo de polímero líquido que cambia sus propiedades físicas (se endurece) cuando se expone a una fuente de luz ultravioleta (UV), está especialmente diseñada para reducir la contracción del volumen durante el proceso de fotocurado, lo que garantiza alta precisión del modelo de impresión con un acabado suave.

Las clavijas se enumeraron de manera ascendente del 1 al 60. De la clavija 1 a la 20 corresponden a clavijas con $h=d$, de la 21 a la 40 a clavijas con $h=2d$, y de la 41 a la 60 a clavijas con $h=3d$. Se utilizaron un micrómetro marca Mitutoyo Digimatic IP65, pulgadas/métrico, con una resolución de 0.001 mm, para medir las dimensiones geométricas de las clavijas. Para cada una, se realizaron cinco mediciones tanto del diámetro como de la altura. La desviación estándar máxima calculada entre las mediciones fue de 0.05 mm para el diámetro y de 0.01 mm para la altura.

Estos valores de desviación estándar reflejan la variabilidad estadística en las mediciones, considerando que se comparan los valores individuales con el promedio de las cinco repeticiones. La precisión del micrómetro permitió capturar esta variabilidad de manera adecuada, dado que los valores calculados son superiores a la resolución del instrumento (0.001 mm). Esto confirma que el micrómetro fue capaz de medir con precisión las pequeñas diferencias entre las mediciones, permitiendo concluir que las dimensiones de las clavijas eran homogéneas y cercanas a lo esperado en términos geométricos.

El agujero se midió con un calibrador marca Mitutoyo Digimatic Absolute, con una resolución de 0.01 mm. Se realizaron cinco mediciones para cada una de las dimensiones (diámetro y altura). La desviación estándar máxima obtenida fue de 0.05 mm para el diámetro y de 0.01 mm para la altura.

Estos valores de desviación estándar, nuevamente calculados mediante la formulación estadística, son mayores a la resolución del calibrador. Esto implica que, aunque la resolución del instrumento era suficiente para registrar las mediciones, las dimensiones del agujero presentaron ligeras variaciones entre las repeticiones. Estas diferencias permiten identificar que las características geométricas del agujero no eran completamente uniformes.

Para determinar la masa de las clavijas, se utilizó una balanza de precisión BEL Engineering, con una resolución de 0.001 g. Se realizaron tres mediciones para cada clavija, y se calculó una desviación estándar máxima de 0.0006 g.

Aunque este valor es estadísticamente correcto al representar la dispersión de los datos respecto al promedio, es inferior a la resolución del instrumento (0.001 g). Esto se debe a que la balanza, por sus limitaciones de resolución, no fue capaz de medir con precisión las pequeñas diferencias reales entre las mediciones. Sin embargo, dado que la resolución del instrumento es el límite práctico de medición, este valor se considera como la desviación máxima posible. Es importante destacar que, para este caso, no era de interés alcanzar un nivel de precisión mayor, ya que el objetivo principal era evaluar la uniformidad en las masas de las clavijas, y los resultados obtenidos son suficientes para concluir que las características de masa eran homogéneas y adecuadas para el problema estudiado, ver Figura 61.

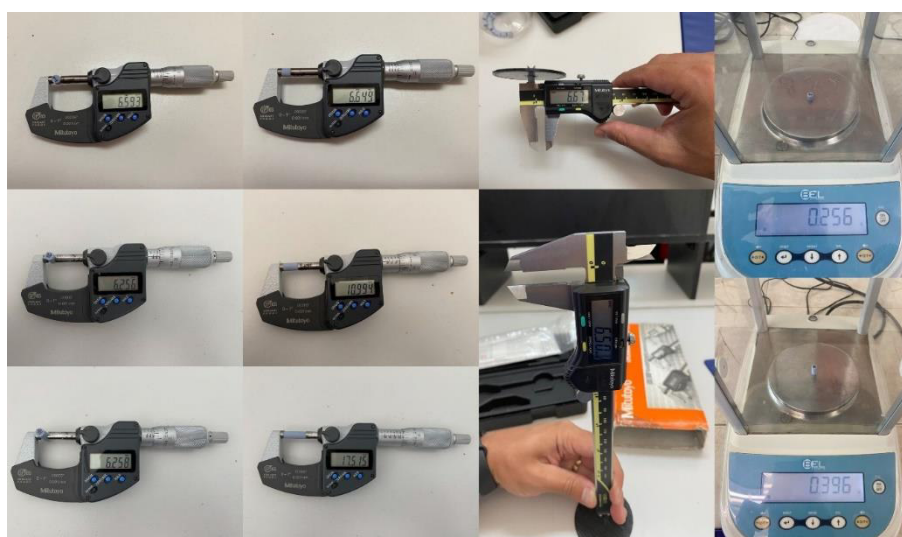


Figura 61. Proceso de medición de los componentes del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero.

El medio de autoensamblaje seleccionado para las observaciones iniciales de autoensamblaje de clavija en agujero fue un frasco de plástico de volumen 635104.371 mm^3 con forma cilíndrica para permitir a las clavijas moverse libremente en un espacio tridimensional restringido por sus paredes. El frasco se cerró con una tapa en la cual se ubicó la superficie de contacto de las clavijas con el agujero central, permitiendo su apriete y fijación. De esta manera la única posibilidad de que una clavija saliera del frasco era mediante su correcta inserción en el agujero, ver Figura 62.

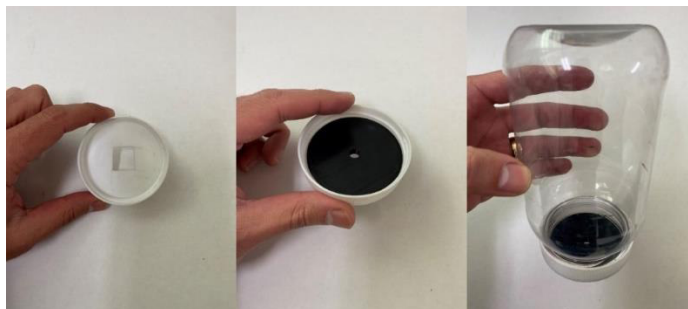


Figura 62. Medio del prototipo básico para el autoensamblaje de clavija en agujero.

La experimentación del proceso comenzó agitando manualmente de forma aleatoria el frasco ubicando una de las 60 clavijas disponibles por vez en su interior y se observó el comportamiento mediante diferentes tipos de agitación. La intención del experimento era encontrar un tipo de agitación que permitiera la inserción de las clavijas en el agujero con ayuda de la gravedad como fuerza de unión de manera repetible o incluso era posible encontrar como resultado la imposibilidad de inserción mediante las restricciones planteadas. Sin importar el resultado positivo o negativo en cuanto a la inserción de la clavija en agujero todas las observaciones permitirían abstraer conocimiento suficiente para plantear el banco experimental de pruebas de autoensamblaje con las modificaciones que fuera necesario hacer, mejorando componentes, energía de activación, fuerza de unión y medio.

El prototipo de pruebas básicas confirmaba la parte teórica presentada en el capítulo 2. Era bastante improbable que la clavija se insertará sin la existencia de contacto con la superficie o el agujero (caso ideal de ensamblaje), por tal motivo nuestro sistema debería promover el contacto con la superficie mediante una agitación aleatoria de niveles que no permitieran que la clavija empezara a rebotar y que dichos contactos se mantuvieran a lo largo del tiempo a pesar de modificarse constantemente corrigiendo los posibles modos de fallas durante la inserción. De esta manera se logró identificar un tipo de agitación manual mediante golpeteo lineal en la parte inferior del frasco que permitió que las primeras clavijas con $h=d$ se insertaran mediante autoensamblaje y salieran del frasco, ver Figura 63.

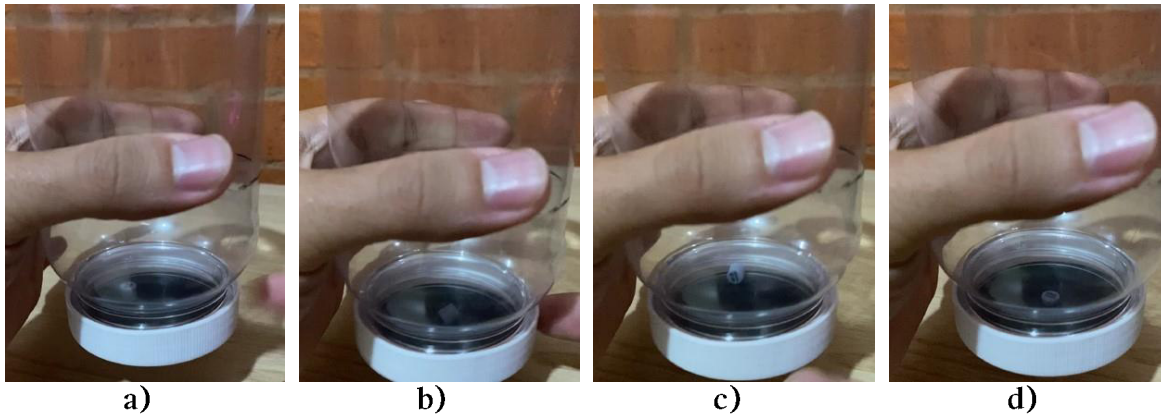


Figura 63. Proceso de autoensamblaje básico de la clavija 12: **a)** Estado inicial de la clavija $t=0$ s; **b)** clavija posicionada en el agujero $t=26$ s; **c)** clavija explorando la superficie cercana al agujero (rodando) $t=99$ s; **d)** Estado final de la clavija (inserción) $t=111$ s.

Este tipo de agitación se mantuvo para la realización del experimento con todas las clavijas. Igualmente se confirmó la parte teórica de inserción de clavija en agujero mediante una relación de M/F variable a través de dicho proceso para garantizar la inserción al tiempo que se evitan los modos de falla, ya que la aplicación del golpeteo como energía de activación generaba balanceo del frasco y esto transmitía variación de momentos sobre la clavija y junto a la fuerza de gravedad era suficiente para que en algún momento la clavija alcanzara la inserción. Sin embargo, esto último causaba que las clavijas se acostaran y constantemente exploraran la superficie de contacto mediante rodadura, ver Figura 63c. Entonces, las únicas clavijas que lograban ubicarse de manera adecuada a la inserción eran las clavijas con $h=d$ en el momento que se localizaban justo en el agujero.

Para el caso de las clavijas con $h=2d$ y $h=3d$ no se logró una inserción exitosa mediante la misma agitación debido a que siempre rodaron por encima del agujero y nunca se localizaron adecuadamente, ver Figura 64. Este resultado fue bastante positivo para nuestro interés ya que a pesar de alejarnos de una inserción adecuada para cualquier tipo de clavija lo que realmente nos mostraba era la falta de algún tipo de restricción adicional de nuestro sistema para evitar la caída de las clavijas y promover una inserción adecuada independiente de la altura de la clavija.

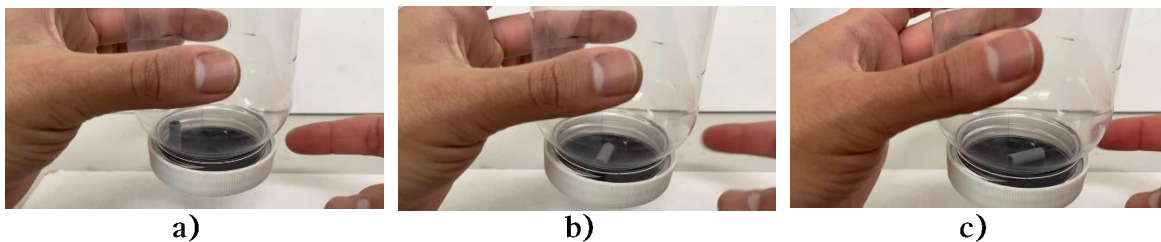


Figura 64. Proceso de autoensamblaje básico de la clavija 50: **a)** Estado inicial de la clavija $t=0$ s; **b)** clavija explorando la superficie sin posicionamiento exitoso en el agujero (rodando) $t=60$ s; **c)** clavija explorando la superficie sin posicionamiento exitoso en el agujero (rodando) $t=300$ s.

Igualmente, en la parte teórica del capítulo 2 la importancia del ángulo θ de inclinación de la clavija con respecto al eje de inserción era conocida, dicho ángulo hace parte de los requerimientos iniciales del proceso de ensamblaje de clavija en agujero y a menor valor de dicho ángulo la relación M/F necesaria para la inserción disminuye.

Es bastante evidente que las observaciones iniciales fueron realizadas mediante un prototipo de autoensamblaje bastante básico sin controlar rigurosamente los factores del experimento ya que únicamente se consideró como un ejercicio de aproximación al proceso físico. Sin embargo, es claro también que se valida la parte teórica del proceso mediante los comportamientos revisados a detalle, sirviendo como punto de partida para la construcción de un prototipo que sea rigurosamente planteado mediante una configuración que se asemeje en los detalles que favorecieron al ensamblaje y aplique nuevas restricciones basados en las falencias observadas.

A continuación, se describen los resultados de tiempo de inserción para las pruebas de clavija con $h=d$ mediante un histograma con el objetivo de identificar alguna tendencia temporal del proceso, ver Figura 65. De igual manera se presentan gráficas de caja y bigotes que describen de manera amplia los resultados considerando el número de clavija, la holgura existente entre agujero y clavija, y el peso de las clavijas en relación a los tiempos de inserción encontrados, ver Figuras 66-68, con la intención de identificar detalles que puedan considerarse para el prototipo final.

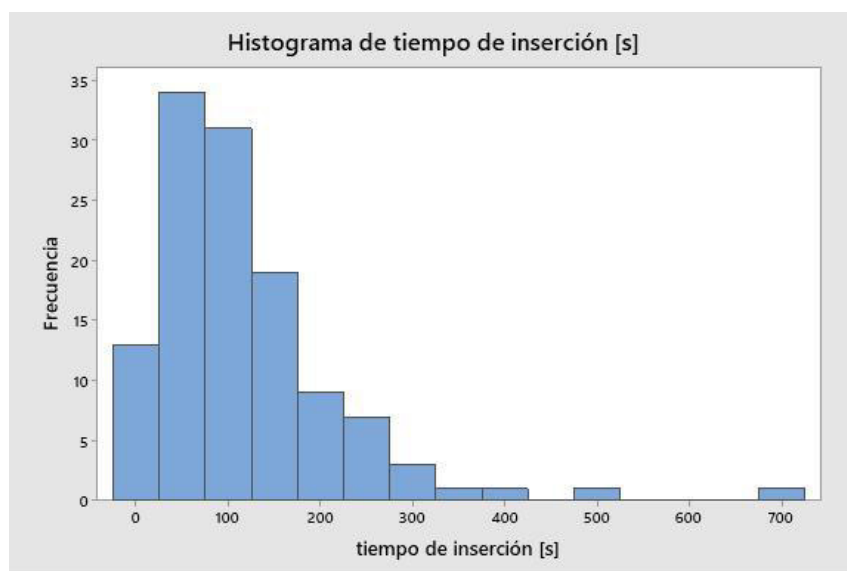


Figura 65. Histograma de tiempo de inserción para clavijas con $h=d$.

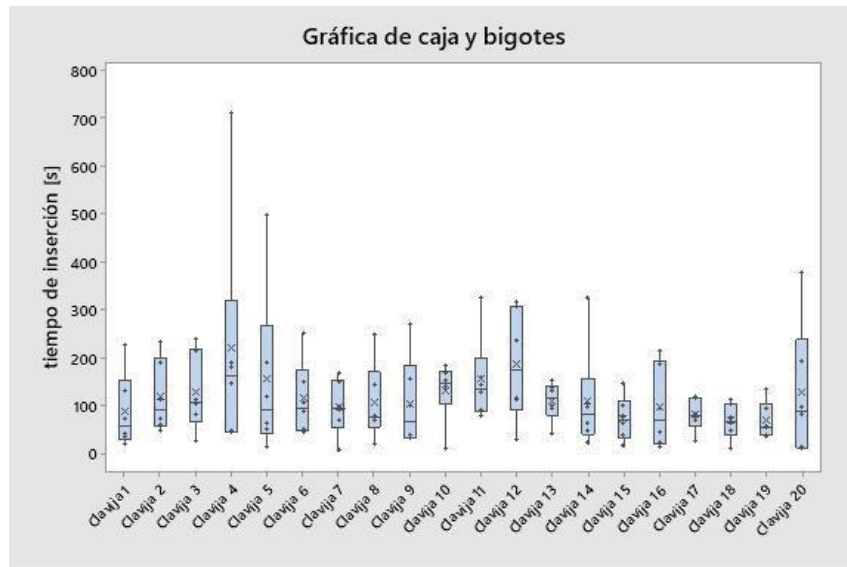


Figura. 66. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para cada clavija con $h=d$.

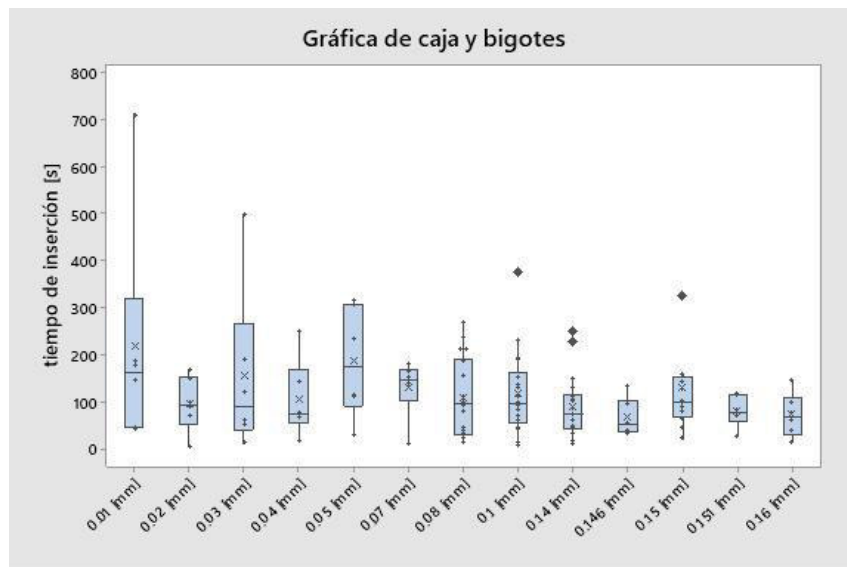


Figura 67. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para las diferentes holguras entre agujero y clavija.

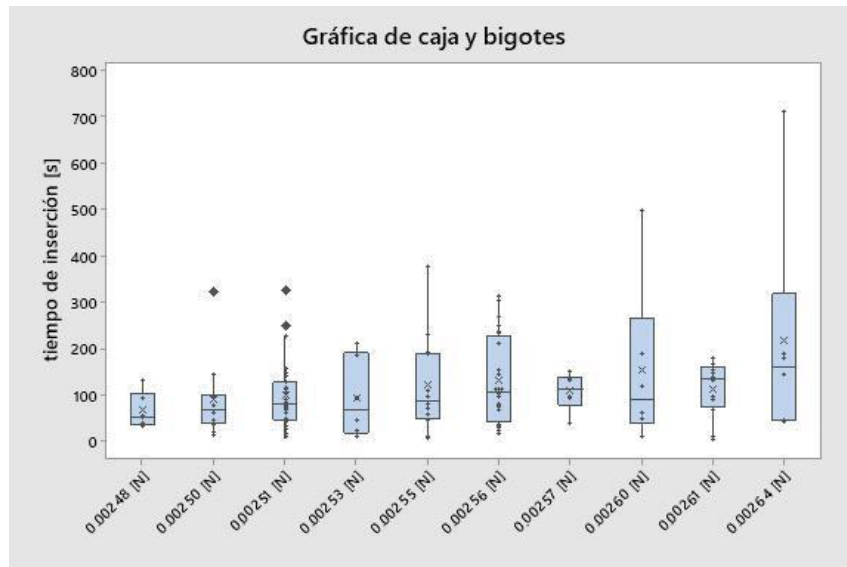


Figura 68. Gráfica de caja y bigotes del tiempo de inserción para los diferentes pesos de las clavijas.

Finalmente, se realiza una prueba de normalidad a todos los datos de tiempo de inserción con el objetivo de evidenciar que al no controlar rigurosamente los factores del experimento el comportamiento del proceso solo puede considerarse como una aproximación física del problema más no un experimento valido para analizar a profundidad, ya que estará dominado por el azar, ver Figura 69.

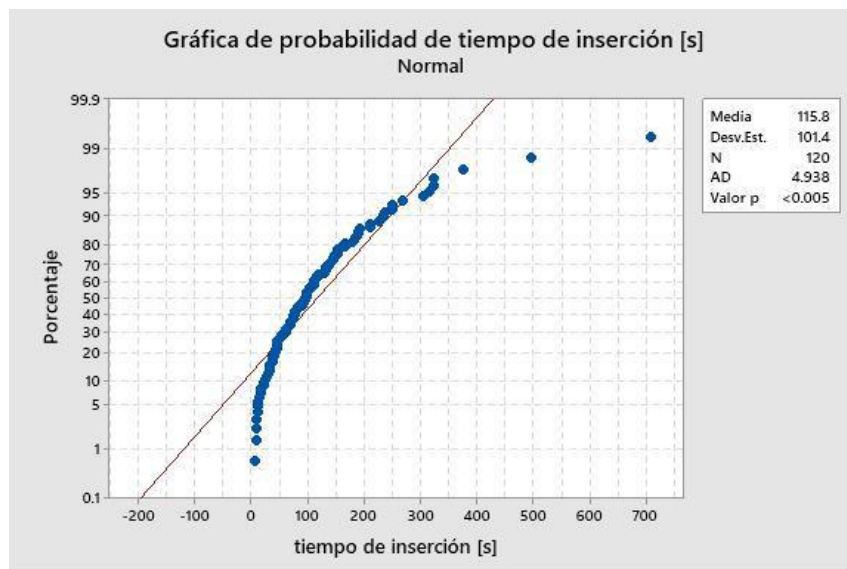


Figura 69. Prueba de normalidad de los tiempos de inserción para clavijas con $h=d$.

2.3.2. Banco experimental para pruebas de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones

2.3.2.1. Diseño y manufactura de componentes

Para el diseño de los componentes del banco experimental se consideraron oportunidades de mejoras basado en la parte teórica y las observaciones iniciales del prototipo básico. Las clavijas utilizadas en el prototipo básico tienen un diámetro que se encuentra entre el límite

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

de la mesoescala y la macroescala como se mencionó anteriormente. Sin embargo, el enfoque de la tesis requiere que los componentes pertenezcan a la escala macroscópica para lograr conducir al proceso del autoensamblaje a terrenos de ensamblaje de la ingeniería mecánica tradicional. Entonces, el diámetro de las clavijas, que hacen parte de los componentes de inserción del banco experimental, se establece en $\frac{1}{2} in = 12.7 mm$ y la altura $h=d$, $h=2d$ y $h=3d$, lo cual nos ubica en la escala macroscópica del autoensamblaje sin llegar a comprometer un desafío de ensamblaje demasiado complejo para una primera implementación física que aborda un problema no trivial de la ingeniería mecánica (inserción de clavija en agujero), ver Figura 70.

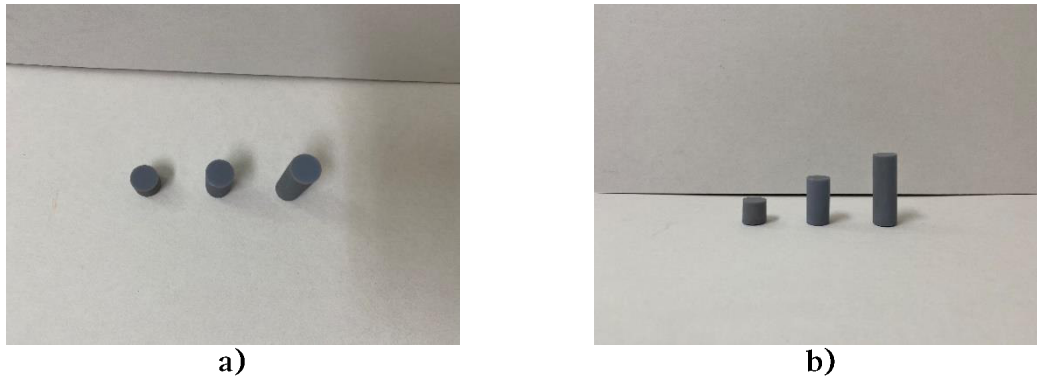


Figura 70. Clavijas del banco experimental de autoensamblaje en escala macroscópica: **a)** Vista superior de las clavijas $d=12.7 mm$; **b)** Vista lateral de las clavijas $h=d$, $h=2d$ y $h=3d$.

En el prototipo básico se logró la inserción de clavija en agujero para una $h=d$ bajo las consideraciones mencionadas anteriormente (forma, simetría, ausencia de chaflanes) por tal motivo se decidió mantener dichas características de los componentes en el banco experimental. Sin embargo, era claro que el banco experimental requería mayor desarrollo y rigurosidad para considerar el ensamblaje de una clavija en un agujero objetivo, para ello se decidió que la clavija debía cumplir la inserción en una placa con agujeros donde se necesitara dicho proceso como parte de un ensamblaje mayor y no solo pasar a través de un agujero ciego como se realizó en el prototipo básico. Entonces, un componente adicional con respecto al prototipo básico es una placa con cinco agujeros distribuidos de manera simétrica, ver Figura 71, y el ensamblaje objetivo primordial es llegar a ocupar algún agujero con la clavija satisfactoriamente (evitando los modos de falla que generan inserciones incompletas).

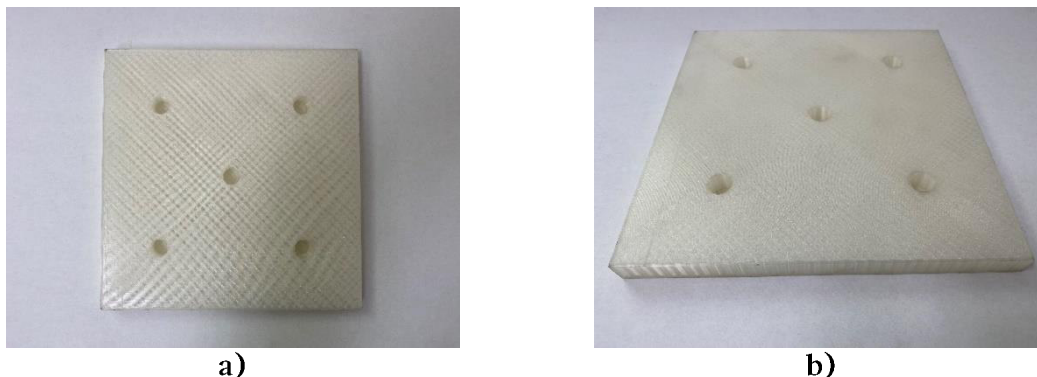


Figura 71. Placa con cinco agujeros como componente donde se debe insertar la clavija para considerar autoensamblaje satisfactorio: **a)** Vista superior; **b)** Vista isométrica.

Otro detalle importante resultado del planteamiento del prototipo básico fue la imposibilidad de lograr la inserción de clavijas con $h=2d$ y $h=3d$, esto claramente debía ser abordado y resuelto para el banco experimental de autoensamblaje. Varias alternativas a esta problemática fueron analizadas, por ejemplo, 1) aumentar la concentración de componentes clavijas de tal forma que ocuparan un porcentaje alto del espacio de exploración para el posicionamiento de las mismas en el agujero, de tal forma que las propias clavijas evitaran la caída de sus vecinas próximas, 2) Incluir componentes neutrales adicionales sin la posibilidad de ocupar el espacio del agujero y mucho menos llegar a insertarse, con el objetivo de interactuar con las clavijas evitando su caída al tiempo que guía su inserción, 3) Diseñar un dispositivo que cumpla la función de restringir la caída de las clavijas al tiempo que ayuda con el posicionamiento sobre el agujero para su posterior inserción. Todas las alternativas se probaron de forma básica para observar los beneficios y complicaciones de su aplicación, ver Figura 72.



a)



b)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

c)

Figura 72. Alternativas para restringir la caída de las clavijas en el autoensamblaje: a) Concentración de clavijas alta; b) Clavijas y componentes neutrales; c) (_____).

Todas las alternativas probaron disminuir la tendencia a caer de las clavijas con altura mayor a su diámetro. Sin embargo, las alternativas 1 y 2 requieren restringir prácticamente la totalidad del espacio de exploración para cumplir satisfactoriamente con el posicionamiento de alguna clavija y su posterior inserción. En algunas ocasiones dicha restricción ocasiona escasa posibilidad de movilidad de las clavijas dispuestas para la inserción y bloqueos del agujero ocasionando que el autoensamblaje no se logre. La alternativa 3 garantiza la restricción del ángulo de inclinación de la clavija manteniéndola en una posición casi ideal durante todo el recorrido de exploración hasta alcanzar el posicionamiento adecuado con el agujero sin importar la altura de la clavija. Además, permite que el espacio de exploración este completamente libre durante el proceso de autoensamblaje y añade una característica importante de complementariedad con una parte del medio de autoensamblaje ((_____)) que se describirá más adelante garantizando un posicionamiento evidente con el agujero. Entonces, clavija y dispositivo generan satisfactoriamente el autoensamblaje independiente de la altura de la clavija mediante dos estados posibles (estado 1: exploración/movimiento, estado 2: posicionamiento/cuasiestático).

El (_____) está inspirado en el robot de cerdas (Bristlebot), ver Figura 73, cuyo funcionamiento se logra mediante un motor de vibraciones posicionado sobre un cepillo, generando su movimiento por sí solo de manera aleatoria sobre alguna superficie.

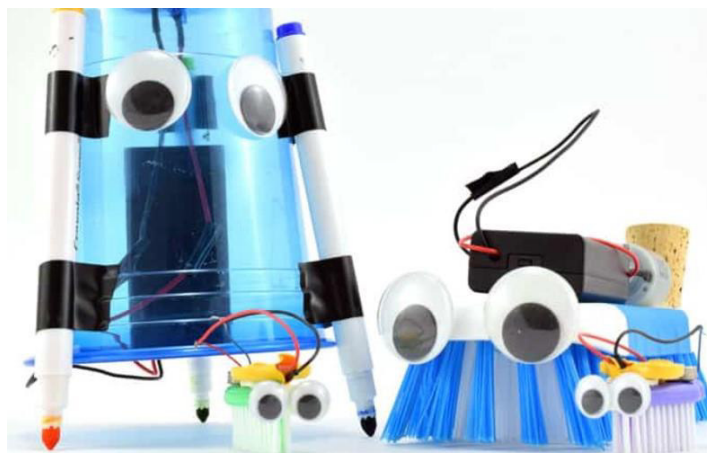


Figura 73. Robot de cerdas (Bristlebot). Tomada de <https://saposyprincesas.elmundo.es/ocio-en-casa/experimentos/como-hacer-un-robot-casero/>

El () inicial se rediseño para generar alternativas de configuraciones diferentes. El dispositivo final cuenta () que pueden ensamblarse en diferentes direcciones con la intención de generar diferentes comportamientos de exploración. En cuanto al posicionamiento todas las () se complementan de forma idéntica con respecto a la (). Adicionalmente, la parte central del dispositivo trabaja como un () que permite variar el espacio que restringe a la clavija (diámetro y altura), ver Figura 74.

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

a)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

b)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

c)

Figura 74. (): a) (); b) (); c) ().

A partir del diseño final del () podemos obtener múltiples configuraciones con la intención de modificar el comportamiento del conjunto dispositivo/clavija, entonces es posible seguir diferentes caminos autónomos y aleatorios hasta alcanzar el posicionamiento correcto con respecto al agujero para su posterior inserción. La forma del dispositivo una vez ensamblado se presenta a continuación y se incluye la manera de identificar la configuración del dispositivo con respecto a la codificación interna disponible en el dispositivo diseñado, ver Figura 75.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 75. (_____).

Las clavijas y los componentes que conforman al (_____) son fabricados mediante impresión 3D de resina. El componente correspondiente a la placa con los cinco agujeros se fabricó por medio de impresión 3D de filamento. La impresora 3D de resina utilizada es la misma que se empleó para fabricar los componentes del prototipo básico. La impresora 3D de filamento empleada para la fabricación de la placa con los agujeros es la Ultimaker 2, ver Figura 76.



Figura 76. Impresora 3D Ultimaker 2.

Los materiales utilizados fueron filamento Ultimaker PLA transparente de 2.85 mm (carrete de 750 g, color natural transparente) para la impresión de la placa con agujeros y se empleó la misma resina empleada para los componentes del prototipo básico como material de las clavijas y el (_____).

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

La razón principal de utilizar diferentes técnicas de impresión de 3D (resina y filamento) es las características de los componentes fabricados. Para el caso de componentes pequeños como las clavijas y aquellos que conforman al () es preferible utilizar la impresión 3D con resina para obtener detalles finos, mayor precisión dimensional y mejor acabado. Para componentes de mayor tamaño es preferible utilizar impresión con filamento por el tipo de dimensiones de la superficie de impresión (mayores con respecto a las impresoras de resina) y es posible obtener un acabado aceptable mediante operaciones de planchado disponible en las impresoras 3D de filamento más avanzadas. En cuanto a los tiempos de impresión para cada tipo de técnica dependerá principalmente de los componentes a imprimir y su cantidad, en cuanto a la impresión 3D con filamento la boquilla de la máquina requiere desplazarse a cada una de las localizaciones correspondientes al modelo en creación, lo cual implica un tiempo considerable en componentes grandes. En el caso de la impresión 3D con resina los componentes se generan por capa lo cual favorece la creación de varios componentes a la vez sin implicar un aumento de tiempo considerable. Sin embargo, para la impresión 3D con resina la altura o número de capas totales de los componentes si impacta negativamente el tiempo de impresión. Una diferencia importante al considerar las técnicas mencionadas anteriormente son los pasos para obtener los componentes terminados, para el proceso de impresión 3D con filamento generalmente la parte se diseña, se convierte a formato STL (el modelo se convierte a capas), se carga en la impresora y una vez terminado el tiempo de impresión no se requiere ningún tipo de postproceso adicional. Por otra parte, la impresión 3D con resina requiere mayor cuidado para la creación de componentes, igualmente se diseña y se convierte a formato STL el modelo a imprimir, pero se debe tener precaución con la materia prima (resina), debido a que suelen contener productos químicos tóxicos o irritantes y por ello se recomienda su manipulación con guantes, lentes, tapabocas y un área de impresión adecuadamente ventilada para realizar el primer paso de impresión que es verter la resina en la superficie de impresión. Además, es importante realizar un debido proceso de limpieza y curado posterior a la impresión para obtener los componentes terminados, ver Figura 77.

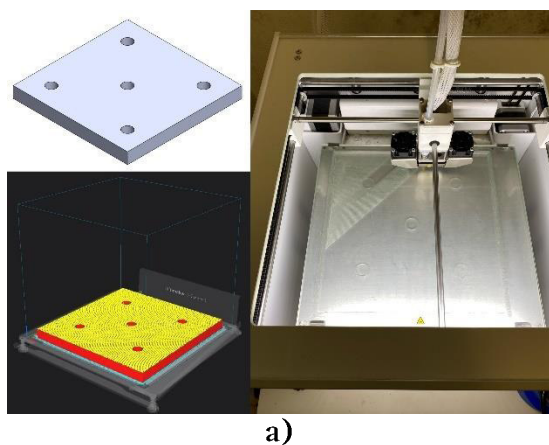


Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

a) **b)**
Figura 77. Técnicas de impresión 3D: **a)** impresión con filamento, duración de la impresión: 1 día 21 h 34 min; **b)** ().

2.3.2.2 Diseño y manufactura del entorno de autoensamblaje

Para el medio de autoensamblaje se diseñó y fabricó una estructura de acero inoxidable T-304 que permite localizar la placa con los agujeros en un nivel inferior, una () en un nivel intermedio y finalmente el () junto con la clavija en el nivel superior, ver Figura 78.

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 78. (_____).

El () que contiene la clavija se encuentra siempre en contacto con la () moviéndose aleatoriamente (estado 1) y por complementariedad se posiciona alineando a la clavija con el agujero de la placa objetivo que se encuentra debajo (estado 2). Finalmente, la energía de activación continúa operando permitiendo a la clavija liberarse del () (mientras este último permanece ubicado cuasiestático con respecto a la ()) para iniciar la inserción en el agujero objetivo mediante la fuerza de unión.

(_____

_____).

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 79. (_____).

2.3.2.3 Selección e implementación de la energía de activación

El medio de autoensamblaje completamente ensamblado (estructura-(____)-placa con agujeros) se diseñó para acoplarse mediante un tornillo central M12 a una máquina de alimentación automatizada de partes modelo EA-25 de la marca Shinko capaz de generar vibraciones para diferentes valores de voltaje y frecuencia gracias a su regulador integrado modelo C8-3VF, ver Figura 80.

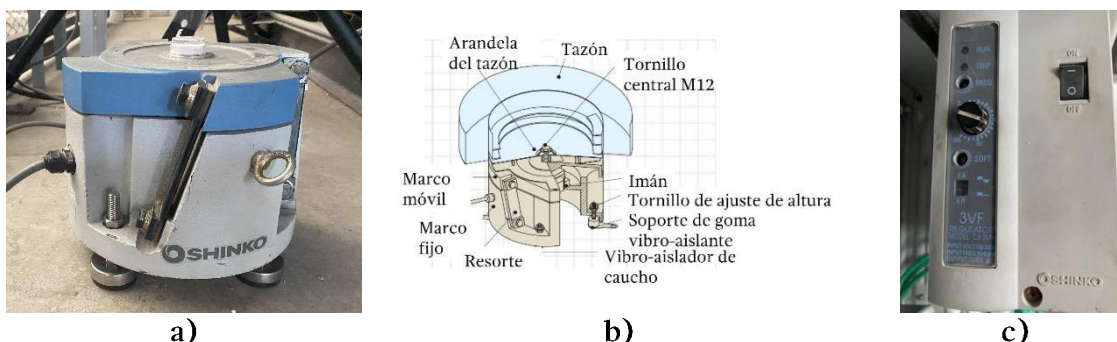


Figura 80. Energía de activación: **a)** Máquina de alimentación automatizada de partes modelo EA-25 de la marca Shinko; **b)** Diagrama estructural de la máquina; **c)** Regulador integrado modelo C8-3VF.

Esta máquina se encontraba disponible en el laboratorio de manufactura de la universidad desde el año 2008. Sin embargo, se encontraba fuera de operación y fue necesario realizar el trabajo de conexión y puesta en marcha para utilizarse como energía de activación (vibraciones) que generaran el movimiento autónomo y aleatorio del () de la clavija. De igual manera la máquina no contaba con los soportes y vibro-aisladores de caucho, entonces fue necesario conseguir los cuatro soportes niveladores antiderrapantes que permitieran operarla de manera satisfactoria. Las características de la máquina de alimentación automatizada de partes modelo EA-25 se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Características de la máquina de alimentación automatizada de partes Shinko modelo EA-25.

Diámetro exterior	260 mm
Altura	190 mm
Peso	30 kg
Ángulo de inclinación de los resortes	15°
Voltaje nominal	200 V
Corriente nominal	1.5 A
Frecuencia de vibración	100~180 Hz
Amplitud máxima periférica	0.6 mm
Peso máximo de la carga	8 kg

El regulador integrado modelo C8-3VF cuenta con una perilla central (potenciómetro) que controla el voltaje entre valores de 0-100 V (amplitud de la vibración) y cuenta con dos trimpot (potenciómetro multivuelta) para regular por una parte la frecuencia de vibración y por otra parte el arranque de la máquina a través del soft de encendido. Controlar el voltaje a través de la perilla suele ser bastante preciso debido a sus niveles respectivamente marcados. Sin embargo, controlar la frecuencia a través del trimpot suele complicarse, ya que debe operarse con un desarmador y contabilizar la cantidad de vueltas para obtener un valor de frecuencia específico. Esto puede generar algunos errores al momento de operar la máquina responsable de generar la perturbación al sistema de autoensamblaje. Se determino primero mediante un multímetro el valor mínimo de la resistencia del trimpot igual a 0 k Ω y a partir de este valor se empezó a girar con el objetivo de encontrar el valor máximo de la resistencia y el número de vueltas equivalentes del dispositivo. Se encontró un valor máximo de resistencia de 20 k Ω para un total de 4 vueltas del trimpot, ver Figura 81.

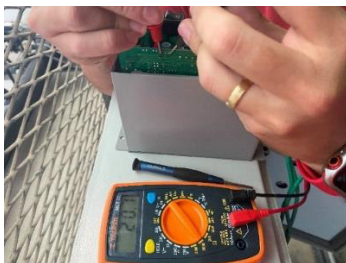


Figura 81. Resistencia máxima del trimpot regulador de la frecuencia de vibración.

De esta manera, desconocíamos los valores de frecuencia equivalente a cada resistencia, pero era posible conocer con exactitud el valor de la resistencia del trimpot para ubicarnos de manera concreta en una configuración deseada de frecuencia de la máquina mediante la lectura del multímetro. Se corroboró primero mediante inspección visual que efectivamente para los valores de resistencia del trimpot siempre correspondiera un comportamiento idéntico de la máquina al configurarse en el mismo nivel. Posteriormente, se utilizaron acelerómetros inerciales MPU6050 de bajo costo y fácil implementación mediante placa ARDUINO UNO con la intención de inspeccionar las aceleraciones de salida sobre el marco móvil de la máquina alimentadora automática de partes y sobre la (_____) (con toda la estructura del medio acoplada sobre la máquina) en una posición central y una en la periferia para garantizar el comportamiento uniforme para cada nivel de resistencia del trimpot, ver Figura 82.

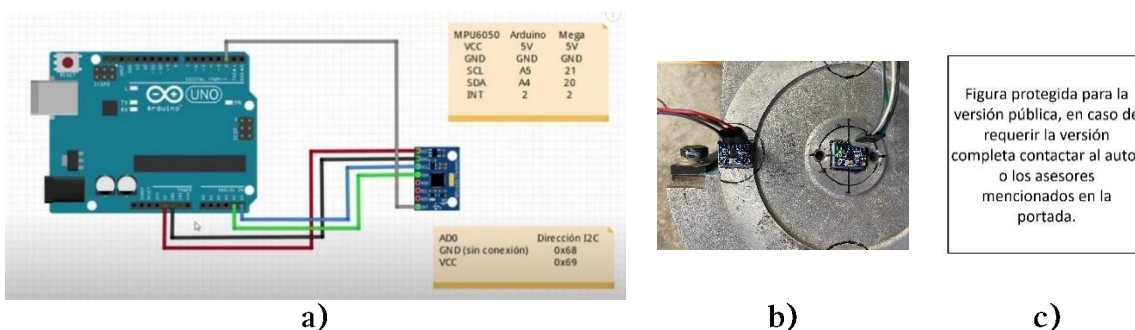


Figura 82. Conexión y montaje de los acelerómetros inerciales MPU6050: a) esquema de conexión; b) montaje sobre el marco móvil; c) (_____).

En general se utilizan acelerómetros con la intención de encontrar visualmente el periodo de la onda de vibración y con este valor resolver la frecuencia teniendo en cuenta que el valor de la frecuencia es el inverso del periodo. Sin embargo, para las frecuencias esperadas para la máquina en el rango de 100 a 180 Hz son necesarios acelerómetros con la capacidad de adquirir por lo menos 6000 datos/s, esto basado en lo reportado en la tesis del 2008 “Análisis del movimiento de las piezas en un alimentador vibratorio de tazón” que validó el rango de frecuencias de la máquina de alimentación automatizada de partes mediante un proceso riguroso llevado a cabo en un laboratorio de vibraciones. En nuestro caso no disponemos del equipo necesario para llevar a cabo el proceso de manera adecuada por lo que la alternativa fue tomar mediciones con los acelerómetros MPU6050 no con la intención de encontrar el periodo de vibración sino con la intención de graficar los valores máximos de aceleración en X (aceleración tangencial), Y (aceleración centrípeta) y Z (aceleración normal) tanto en una posición central como periférica a partir de tres tomas para cada resistencia del trimpot en el rango de 0 a 20 k Ω y verificar que los valores se mantuvieran constantes para cada nivel con voltaje de 0, 50 y 100 V. Finalmente, se obtienen las curvas presentadas en las Figuras 83 y 84, garantizando un funcionamiento constante de las

perturbaciones (energía de activación del autoensamblaje) mediante la configuración del trimpot de frecuencia en cada uno de los valores de resistencia medidos en $k\Omega$.

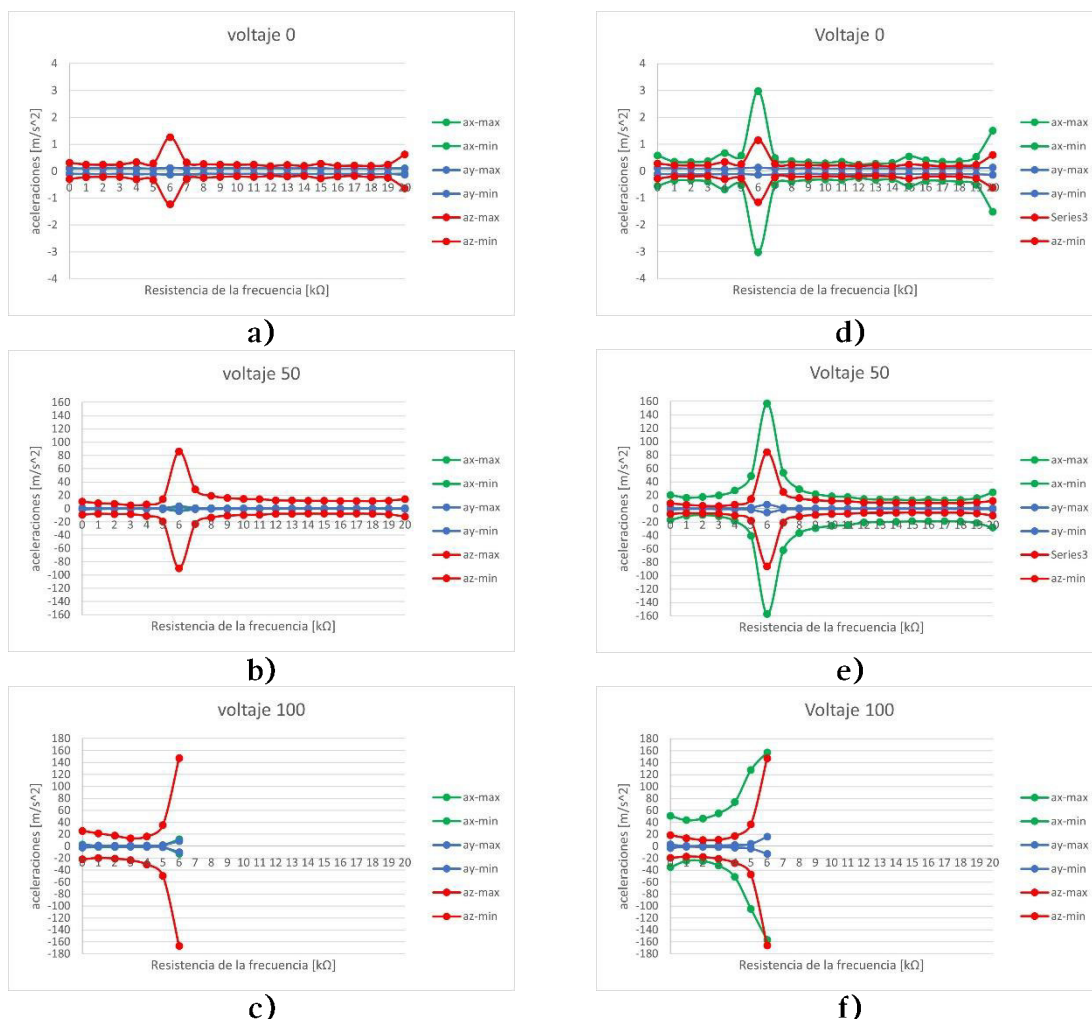
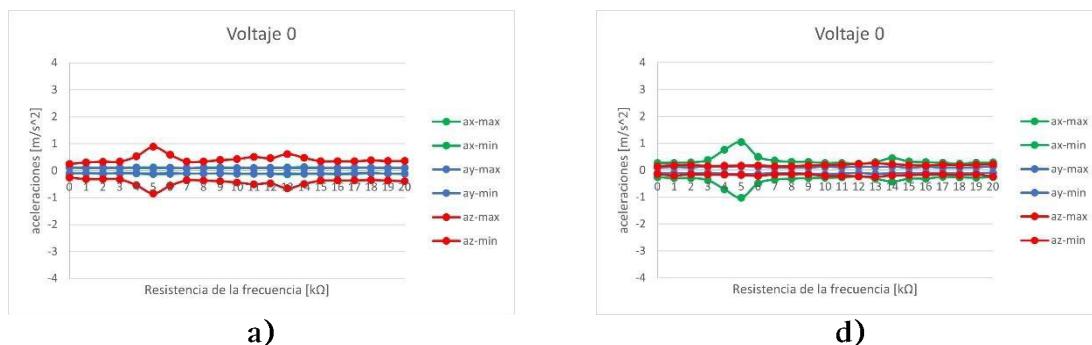


Figura 83. Curvas de aceleración máxima para valores de resistencia del trimpot de frecuencia: **a)** voltaje 0 en el centro del marco móvil; **b)** voltaje 50 en el centro del marco móvil; **c)** voltaje 100 en el centro del marco móvil; **d)** voltaje 0 en la periferia del marco móvil; **e)** voltaje 50 en la periferia del marco móvil; **f)** voltaje 100 en la periferia del marco móvil.



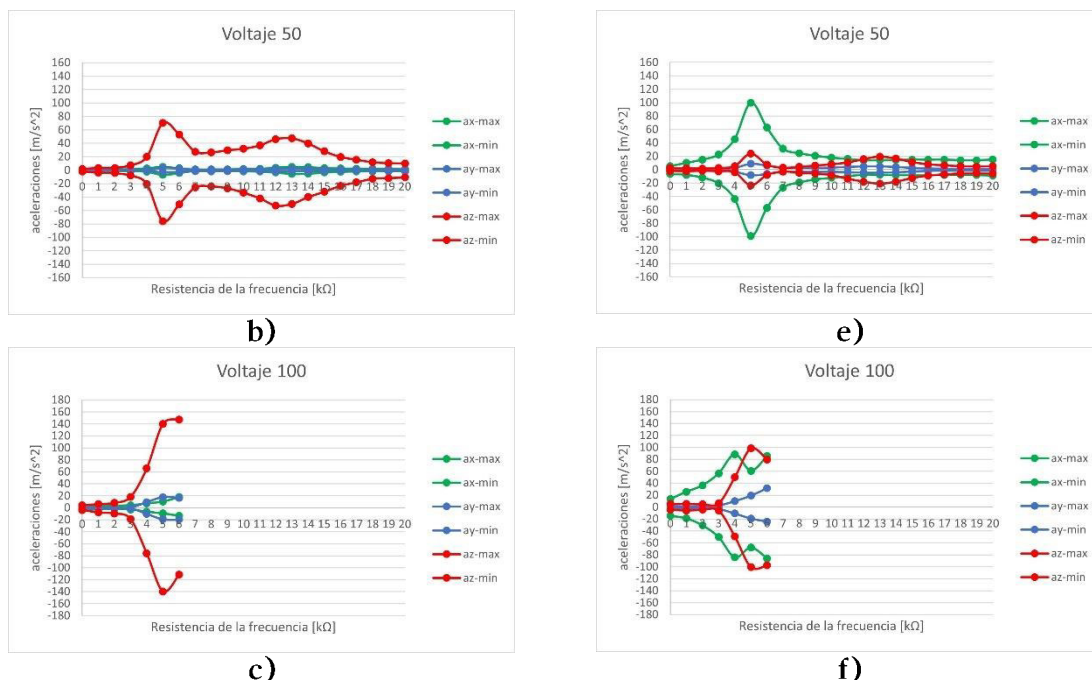


Figura 84. Curvas de aceleración máxima para valores de resistencia del trimpot de frecuencia: **a)** voltaje 0 en el centro de la (____); **b)** voltaje 50 en el centro de la (____); **c)** voltaje 100 en el centro de la (____); **d)** voltaje 0 en la periferia de la (____); **e)** voltaje 50 en la periferia de la (____); **f)** voltaje 100 en la periferia de la (____).

La energía de activación del banco experimental de autoensamblaje entonces es capaz de generar movimiento del (____) con la intención de explorar la (____) de diferentes maneras dependiendo de la configuración de frecuencia y voltaje establecida. Para el éxito de nuestra hipótesis se requiere encontrar al menos una configuración válida en la cual el (____) logre alinear la clavija con el eje de inserción del agujero de la placa, gracias a la complementariedad entre (____), y posteriormente se mantenga en dicha posición hasta que la clavija se libere del (____) y finalmente complete su inserción en el agujero. Varias pruebas iniciales fueron realizadas para observar si existía dicha configuración exitosa en el rango de la máquina utilizada y efectivamente se logró la inserción de las clavijas mediante el proceso de autoensamblaje propuesto. Esto valida el banco experimental de autoensamblaje y la hipótesis del trabajo de tesis actual (página 7).

Se empleó el desarrollo de un código en Matlab de seguimiento de la clavija y (____) por medio de grabación de video con cámara web Logitech C920 HD con la intención de estudiar a fondo los diferentes comportamientos de exploración garantizando diferencia en relación a los diferentes niveles de la energía de activación y favoreciendo la detección del nivel favorable para el autoensamblaje, ver Figura 85.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

a)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

b)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

c)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

d)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

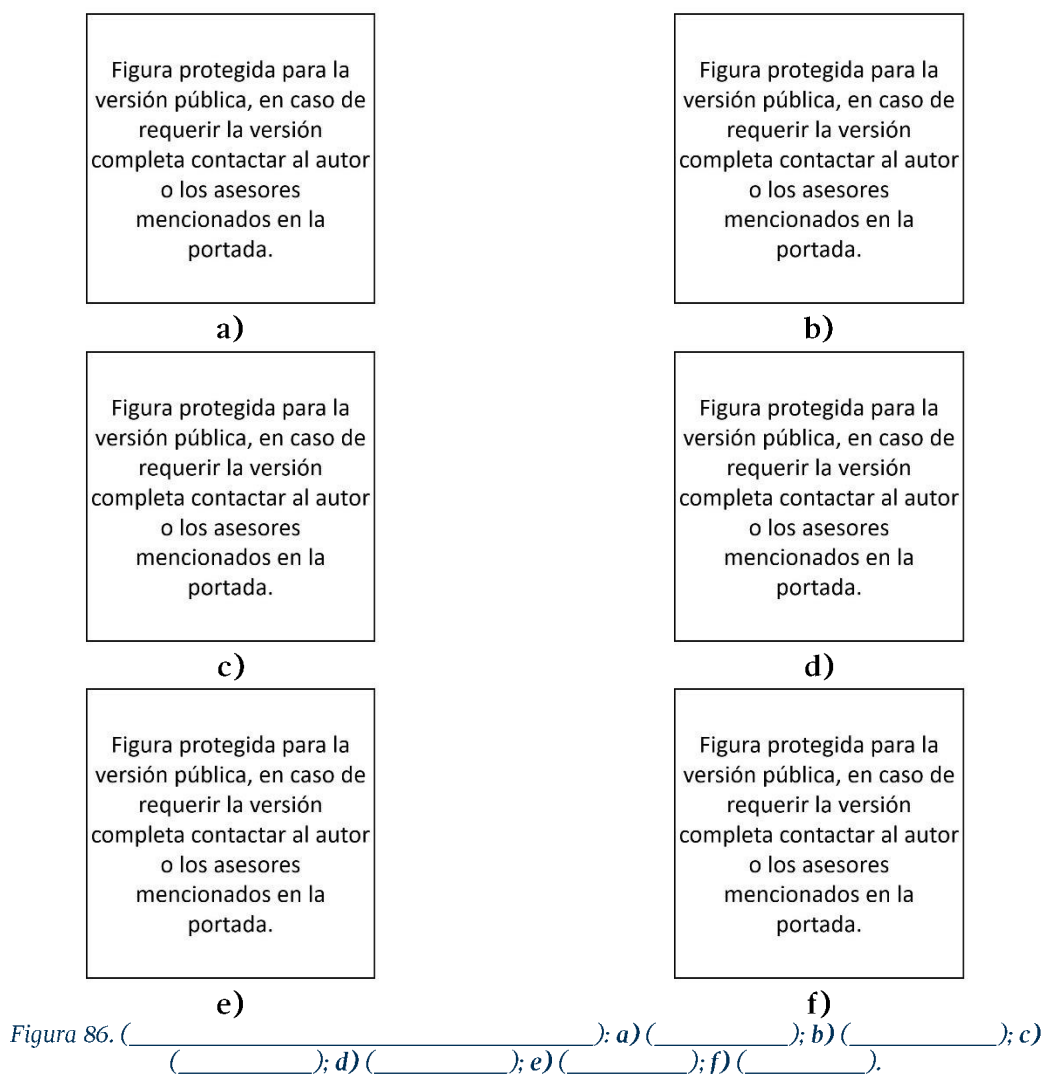
e)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

f)

Figura 85. (_____); a)
 (_____); b) (_____); c)
 (_____); d) (_____); e)
 (_____); f) (_____).

Ahora que es claro el tipo de energía de activación planteada (vibraciones) para el sistema de autoensamblaje vale la pena mencionar que como parte del diseño de la estructura de acero inoxidable fue necesario comprobar sus modos de vibración y los valores de frecuencia natural. El objetivo fue garantizar la integridad estructural del diseño con respecto a los efectos de las vibraciones. Entonces, los valores de frecuencia natural de la estructura no pueden coincidir con el rango de valores de frecuencia de la máquina de alimentación automatizada de partes (100 a 180 Hz), ya que esta condición podría producir fallas estructurales no deseadas por resonancia y sería necesario rediseñar la estructura para variar su frecuencia natural. La alternativa utilizada fue un análisis modal para calcular las frecuencias naturales y las formas de modo de la estructura en el entorno de simulación de Ansys® Workbench mediante el uso de la masa y la rigidez de la estructura. El análisis modal nos permitió encontrar los primeros seis modos de vibración de la estructura y los valores de la frecuencia natural para cada uno de ellos, ver Figura 86.



Entonces, se garantiza la integridad estructural con respecto a los efectos de las vibraciones de la estructura diseñada ya que los valores a los cuales podría encontrarse en resonancia están por encima del rango de valores de la frecuencia de la máquina de alimentación automatizada de partes.

2.3.2.4 Selección de la fuerza de unión

En las implementaciones físicas consideradas en la Tabla 5 (página 62) se observan diferentes tipos posibles de fuerzas de unión entre componentes, entre las cuales podemos mencionar uniones mecánicas por complementariedad, imanes, fuerzas capilares, adhesivos e incluso implementaciones sin interacciones atractivas notables. Teniendo en cuenta nuestro objetivo de inserción de clavija en agujero como problema de autoensamblaje, las fuerzas de unión compatibles para nuestro sistema eran imanes o adhesivos. Sin embargo, para cumplir con el objetivo de encaminar el proceso estudiado al ambiente de la ingeniería mecánica se concluyó que para el problema específico utilizar imanes o adhesivos en cada agujero o clavija claro que facilitaría de cierta manera la solución del problema, pero con el costo de aumentar la complejidad del diseño de las partes. Está claro que nuestro enfoque

Nota: La información identificada de la siguiente manera (____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Lo anterior nos permitió considerar únicamente la fuerza de la gravedad como alternativa de fuerza atractiva entre la clavija y agujero, ya que no necesitábamos modificar el diseño de las partes y mediante un planteamiento adecuado del medio de autoensamblaje podíamos lograr que dicha fuerza actuara en el momento justo para completar la inserción de los componentes propuestos.

La reversibilidad permite en el autoensamblaje la ocurrencia de ensamblajes erróneos en el camino hacia el ensamblaje correcto. Esto se entiende como estados intermedios (mínimos locales) en los cuales los componentes no han alcanzado el mínimo de energía posible, pero de los cuales gracias a la energía de activación y a los niveles de fuerza de unión planteados pueden escapar y dirigirse hacia el mínimo de energía global.

[illegible]

a)

b)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

c) *Figura 87.* (____); b) (____); a) (____);
c) (____); d) (____).

Con el código de detección desarrollado es posible observar los estados intermedios en los cuales la clavija se detiene siendo imposible bajo el nivel de perturbación configurado continuar la exploración hacia su correcto posicionamiento (____). A continuación, se presenta un ejemplo de la situación de atrapamiento en estado intermedio para la prueba donde se consideró variar los niveles de energía de activación para que el dispositivo mostrara la capacidad de reversibilidad y posteriormente alcanzara el posicionamiento adecuado, ver Figura 88.

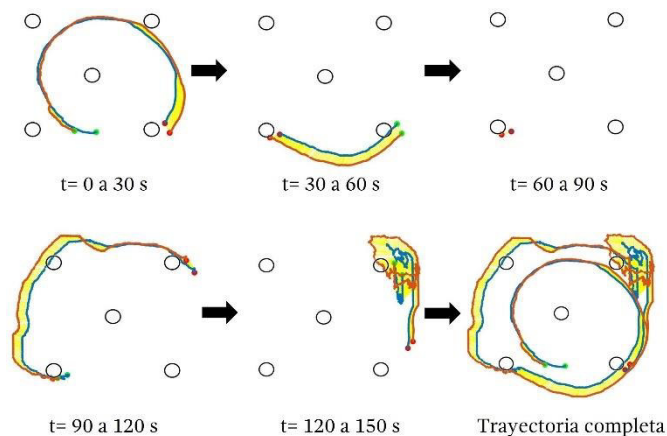


Figura 88. Resultado de la detección del proceso de autoensamblaje a través del tiempo para un dispositivo atrapado en estado intermedio (t= 60 a 90 s) y posteriormente posicionado correctamente (sistema reversible).

Los factores perturbadores controlables son aquellos valores de entrada que varían en un rango amplio, pero de alguna manera bien establecida se pueden fijar en un nivel deseado. En el banco experimental se desea caracterizar el proceso de inserción de clavija en agujero mediante autoensamblaje y para ello se establecen los siguientes factores perturbadores controlables: 1) frecuencia de la vibración, 2) voltaje (amplitud de la vibración), 3) altura de la clavija, 4) (_____), 5) (_____), 6) (_____).

Cuando el objetivo del experimento es la caracterización del proceso, se aconseja mantener reducido el número de niveles de los factores. En general, dos niveles funcionan bastante bien en los estudios de tamizado de factores. Entonces, se aconseja también una región de interés relativamente grande; es decir, el rango entre los niveles en el que se hace variar los factores debe ser amplio y conforme se conozca mayor información de las variables que son importantes y los niveles que producen los mejores resultados, entonces la región de interés se hace más estrecha [88].

Los niveles seleccionados para los factores perturbadores controlables son los siguientes: 1) frecuencia en el valor de la resistencia del trimpot de 4 y 14 k Ω , 2) voltaje en valor de 50 y 70 V, 3) altura de la clavija $h=d$ y $h=3d$, 4) (_____), 5) (_____), 6) (_____).

3.1.3. Selección de la variable de respuesta

Para el diseño de experimento de autoensamblaje existen múltiples variables de respuesta que son de interés. La principal variable de respuesta es 1) si ocurre o no inserción de la clavija en el agujero de la placa bajo cierta configuración de los niveles de los factores. Variables adicionales de respuesta son: 2) (_____), 3) el tipo de posicionamiento alcanzado, estado intermedio o estado global, 4) tiempo de inserción, 5) agujero en donde ocurre la inserción.

En la planeación previa al experimento es crucial exponer todos los puntos de vista y la información del proceso como se llevó a cabo mediante los tres pasos mencionados anteriormente. De esta manera se busca tener certeza previa a la realización de los experimentos en cuanto a que el estudio representará información útil acerca del proceso o producto analizado. En la Figura 89 se presenta una representación resumen del modelo planteado para analizar la inserción de clavija en agujero mediante autoensamblaje en escala macroscópica por medio de diseño de experimentos.

Figura protegida para
la versión pública, en
caso de requerir la
versión completa
contactar al autor o
los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 89. (_____).

3.1.4. Especificaciones de los componentes utilizados en los experimentos.

En la Tabla 7 se presentan algunas características de los componentes empleados en los experimentos, con la intención de ofrecer información acerca del ajuste del autoensamblaje realizado. Se incluyen detalles sobre el material, las dimensiones, las tolerancias, así como el proceso de manufactura utilizado para su fabricación.

Es relevante destacar que el autoensamblaje propuesto en esta investigación utiliza un ajuste 12.7C11/js11, con una tolerancia de 0.22 mm. Este ajuste, aplicado entre los componentes principales, la clavija y el agujero, garantiza un ajuste con holgura (ajuste libre), asegurando siempre un espacio entre ambos. Este tipo de ajuste es común en ensamblajes que requieren facilidad en el montaje y desmontaje.

3.2. ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero diseñado e implementado mediante el banco experimental de pruebas plantea el desafío de determinar la influencia de los seis factores controlables mencionados en la planeación previa del experimento con el objetivo de identificar las configuraciones óptimas que maximizan la probabilidad de inserción de manera autónoma. Considerando la respuesta dicotómica de inserción o no inserción es importante seleccionar adecuadamente un diseño experimental que permita modelar la probabilidad de ocurrencia del evento deseado de inserción al tiempo que se obtiene la importancia de cada uno de los factores involucrados. Entonces, se optó por emplear un diseño factorial fraccionado analizado mediante el método estadístico de regresión logística binaria [89], [90].

La regresión logística binaria se seleccionó debido a su capacidad para modelar relaciones entre variables predictoras categóricas o continuas y una variable de respuesta binaria, en este caso, la ocurrencia o no de inserción. Este enfoque es particularmente adecuado dada la naturaleza del problema, donde los factores de diseño pueden adoptar distintos niveles y su interacción puede ser compleja de evaluar mediante métodos tradicionales. La regresión logística binaria permite no solo determinar la dirección y magnitud del efecto de cada factor sobre la probabilidad de inserción, sino también evaluar la significancia estadística de estas relaciones.

El método de regresión logística ofrece además la flexibilidad para ajustar modelos con datos experimentales obtenidos a partir de todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, permitiendo un análisis exhaustivo de las interacciones entre ellos. Esto permite identificar patrones que pueden no ser evidentes a simple vista, proporcionando un marco robusto y estadísticamente sólido para investigar y optimizar el proceso de autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero.

3.3. REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

3.3.1. Regresión logística binaria

Debido al número de factores involucrados inicialmente en el análisis del autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero, el número de corridas necesarias para realizar una réplica experimental que combine todos los factores es igual a $2^6 = 64$. Además, considerando la realización de al menos 5 réplicas para cada una de las combinaciones posibles, la cantidad de corridas experimentales asciende a 320. Realizar todas estas corridas implica una considerable inversión de tiempo. Por esta razón, se optó por implementar una estrategia similar a un diseño factorial fraccionado a la mitad, realizando únicamente 32 combinaciones para una réplica completa con 5 réplicas para un total de 160 corridas.

Esta aproximación no solo es adecuada desde el punto de vista práctico, sino que también se alinea con los fundamentos de la regresión logística binaria. La regresión logística binaria es

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

una herramienta estadística robusta que puede manejar adecuadamente los datos obtenidos de diseños factoriales fraccionados, permitiendo la estimación de los efectos principales y de las posibles interacciones entre ellos sin la necesidad de realizar todas las combinaciones posibles.

Al implementar esta estrategia se reduce el número de experimentos necesarios mediante la selección de una fracción representativa de todas las combinaciones posibles, preservando la capacidad de identificar los efectos significativos de los factores. La reducción en la cantidad de corridas no compromete la validez del análisis debido a la selección de combinaciones de manera que se mantiene la ortogonalidad y el balance del diseño, asegurando así que las estimaciones de los coeficientes en la regresión logística binaria sean confiables y no estén sesgadas.

En conclusión, la implementación de un diseño factorial fraccionado a la mitad para el planteamiento de las corridas experimentales que se analizan mediante la herramienta estadística de regresión logística binaria proporciona un equilibrio adecuado entre la eficiencia experimental y la capacidad analítica. Permite obtener suficiente información para modelar la probabilidad de ocurrencia de inserción de clavija en agujero mediante autoensamblaje en escala macroscópica en función de los 6 factores controlables, identificar aquellos que tienen un impacto significativo y explorar posibles interacciones, todo ello con un uso optimizado de los recursos disponibles.

Para iniciar la realización de los experimentos se construye primero la matriz de diseño partiendo de un diseño factorial completo 2^5 , es decir, 5 factores (A, B, C, D, E), cada uno con dos niveles, lo que resulta con las mismas 32 combinaciones para una sola réplica que nuestra implementación de un diseño factorial fraccionado a la mitad (2^{6-1}). En este caso construir la matriz de diseño introduciendo un factor adicional (F) utilizando la relación $I = ABCDEF$, lo cual implica que la columna F se obtenga multiplicando los valores de las columnas A, B, C, D, E obteniendo $F=ABCDE$. De esta manera se completa el procedimiento para obtener la matriz de diseño (ver Anexo 2, Tabla A1) para un diseño factorial fraccionado a la mitad (2^{6-1}) útil para reducir el número de experimentos necesarios, manteniendo la capacidad de análisis.

Este método garantiza que se mantenga la ortogonalidad del diseño y se pueda analizar adecuadamente la influencia de cada factor y sus interacciones principales.

La ortogonalidad del diseño garantiza que los efectos de los factores sean estimados de manera independiente y no se confundan con otros efectos. Al mantener el diseño ortogonal, se puede analizar la influencia de cada factor y sus interacciones de manera precisa, mejorando así la calidad de las inferencias estadísticas que se pueden obtener de los datos.

En este estudio, se ha decidido realizar 5 réplicas por cada combinación experimental obtenida de la matriz de diseño factorial fraccionado. Esto resulta en un total de 160 corridas experimentales (32 combinaciones $\times$ 5 réplicas). Este enfoque no solo permite mantener la ortogonalidad del diseño, sino también asegurar que el experimento esté balanceado.

Al realizar 5 réplicas por combinación, se asegura un diseño balanceado, lo que significa que cada combinación de niveles de factores se prueba el mismo número de veces. Esto es crucial para obtener estimaciones precisas de los efectos de los factores y mejorar la robustez de los resultados experimentales. Un diseño balanceado también facilita el análisis estadístico,

proporcionando una mayor capacidad para detectar efectos significativos y reducir el error experimental.

Para mejorar aún más la validez del análisis y minimizar posibles sesgos, se decidió aleatorizar el orden de las corridas experimentales. La aleatorización es una técnica esencial en el diseño experimental, ya que ayuda a distribuir de manera equitativa las posibles fuentes de variabilidad no controlada (como cambios en las condiciones ambientales o en el equipo) a lo largo de las diferentes combinaciones experimentales. Esto contribuye a obtener resultados más fiables y generalizables. En el anexo 2 (ver Anexo 2, Tabla A2), se presentan el orden aleatorizado de las corridas experimentales para la realización del experimento junto con el resultado binario correspondiente al evento de inserción (1) o no inserción (0).

Una vez obtenidos los resultados para la ocurrencia del evento o no de autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero (inserción), se procede a realizar el análisis estadístico de los datos mediante el software Minitab®. El objetivo es determinar la significancia de cada una de los factores establecidos en la respuesta de inserción, posibles interacciones entre estos y la combinación que genera la mayor probabilidad de ocurrencia del evento de inserción (1) mediante el método de regresión logística binaria.

Utilizando el software Minitab® se ajusta un modelo de regresión logística binaria debido a la naturaleza categórica y dicotómica de la variable de respuesta a analizar. En nuestro caso los 6 factores establecidos previamente son los predictores de la respuesta de inserción deseada o evento igual a 1. Minitab® nos permite establecer nuestros predictores como continuos o categóricos para la realización del ajuste del modelo. Los predictores continuos dentro de nuestro análisis son la frecuencia y el voltaje, mientras que los predictores categóricos son la altura de la clavija, (_____).

Para el total de 160 corridas experimentales realizadas la cantidad de eventos (inserciones exitosas) y no eventos (inserciones fallidas) fueron 30 y 130 respectivamente.

En la tabla 8, se presentan los coeficientes estimados para cada uno de los factores incluidos en el modelo, así como sus errores estándar (EE) y los factores de inflación de la varianza (FIV).

Tabla 8. Estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión logística binaria del experimento factorial fraccionado a la mitad.

Término	Coeficiente	EE del coeficiente	FIV
Constante	-2.399	0.582	-
Frecuencia	-0.636	0.308	1.8
Voltaje	0.797	0.308	1.71
Altura (1)	-0.785	0.453	1.01
(_____)	(_____)	(_____)	(_____)
(_____)	(_____)	(_____)	(_____)
(_____)	(_____)	(_____)	(_____)
Frecuencia*Voltaje	0.562	0.308	1.83

En el modelo de regresión logística binaria aplicado, el coeficiente de la constante, cuyo valor es -2.399, tiene una interpretación clave en el contexto de la predicción de la probabilidad de inserción en el proceso de autoensamblaje. Este coeficiente representa el logaritmo natural de las probabilidades de que ocurra la inserción cuando todos los factores de predicción se encuentran en sus niveles de referencia (o se asumen iguales a cero). Un valor negativo de la constante sugiere que, bajo estas condiciones iniciales, la probabilidad de inserción es muy baja. Específicamente, al calcular la probabilidad asociada a este coeficiente mediante la función logística inversa, se obtiene un valor cercano a cero, lo que indica que, sin la intervención de los factores, el éxito del proceso es poco probable. Este resultado subraya la importancia de ajustar correctamente las variables controlables del experimento para mejorar las probabilidades de inserción.

El error estándar asociado a este coeficiente, con un valor de 0.582, indica un nivel razonable de precisión en la estimación de dicho coeficiente. Un error estándar relativamente bajo, como el presente en este caso, refuerza la confiabilidad de la estimación del coeficiente de la constante, sugiriendo que la predicción es sólida y que las condiciones iniciales del sistema tienen un impacto significativo en la probabilidad de inserción. Estos aspectos del modelo son cruciales para comprender cómo las condiciones de referencia afectan el resultado del proceso de autoensamblaje y establecen una base sólida sobre la cual evaluar el efecto de los factores restantes.

En términos generales un coeficiente negativo indica que un aumento en el predictor asociado representa una disminución en la probabilidad de ocurrencia del evento. Entonces, se observa que un aumento en la frecuencia y en la altura de la clavija representan una disminución en la probabilidad de ocurrencia de la inserción. Por otra parte, cuando el coeficiente del predictor es positivo sugiere que el aumento de dicho predictor tiene una influencia positiva en la probabilidad de ocurrencia del evento asociado.
(_____
_____).

(_____
_____).

Los errores estándar de los coeficientes varían entre 0.308 y 0.487, lo cual indica el nivel de precisión en la estimación de cada coeficiente. Un error estándar más bajo sugiere mayor precisión en la estimación de ese coeficiente.
(_____
_____).

Los valores de FIV van de 1.00 a 1.83, indicando que no hay problemas serios de colinealidad en los datos. El FIV más alto es 1.83 para la interacción “Frecuencia*Voltaje”, lo cual está por debajo del umbral comúnmente aceptado de 5, sugiriendo que la colinealidad no es un problema significativo en el modelo.

Considerando los resultados para los coeficientes del modelo de regresión logística binaria podemos escribir la ecuación de regresión y la ecuación de la probabilidad de ocurrencia del evento de inserción (1) como se muestra a continuación en la ecuación (68) y (69) respectivamente.

$$Y' = -2.399 - 0.636 * Frecuencia + 0.797 * Voltaje + 0 * Altura_{-1} - 0.785 * Altura_1 + \left(\frac{0.0001 * frecuencia * voltaje}{1} \right) + 0.562 \quad (68)$$

$$P(1) = \frac{e^{Y'}}{1 + e^{Y'}} \quad (69)$$

Aunque el R-cuadrado tradicional no es directamente aplicable a los modelos de regresión logística, se utilizan el R-cuadrado de desviación y el R-cuadrado ajustado de desviación para evaluar la proporción de variabilidad explicada por el modelo. En este análisis, se obtuvo un R-cuadrado de desviación del 18% y un R-cuadrado ajustado de desviación del 13.46%. Estos valores indican que el modelo explica una porción razonable de la variabilidad en la probabilidad de inserción, lo cual es aceptable para un modelo de regresión logística.

Además de los R-cuadrados de desviación, se realizaron varias pruebas de bondad de ajuste para evaluar la adecuación del modelo:

- Prueba de Desviación: Con un valor p de 0.934, no hay evidencia significativa de que el modelo no se ajuste bien a los datos.
- Prueba de Pearson: Un valor p de 0.705 sugiere que no hay discrepancia significativa entre los valores observados y predichos.
- Prueba de Hosmer-Lemeshow: Un valor p de 0.555 respalda la hipótesis de que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos.

Estas pruebas indican que el modelo proporciona un buen ajuste a los datos y es adecuado para describir la probabilidad de inserción en función de los predictores considerados para un nivel de significancia seleccionado de 0.05.

El análisis de varianza utilizando la prueba de Wald para los predictores produjo los resultados que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Análisis de varianza (prueba de Wald) del experimento factorial fraccionado a la mitad.

Fuente	GL	Chi-cuadrado	Valor p
Regresión	7	18.22	0.011
Frecuencia	1	4.27	0.039
Voltaje	1	6.68	0.01
Altura	1	3	0.083
()	()	()	()
()	()	()	()
()	()	()	()
Frecuencia*Voltaje	1	3.34	0.068

Podemos observar los predictores que son estadísticamente significativos con respecto al nivel de significancia asignado de 0.05. Los predictores como la frecuencia, el voltaje y () tienen un impacto significativo en la probabilidad de inserción, debido a que su valor p es menor al nivel de significancia asignado. Además, es posible identificar que la () es altamente significativa con un valor p de 0.001.

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Por otra parte, la altura, el () y () no muestran efectos significativos. Sin embargo, en el caso de la altura podría considerarse marginalmente significativa con un valor p de 0.083. Finalmente, la interacción entre la frecuencia y el voltaje con un valor p de 0.068 sugiere que la interacción no es significativa, aunque está cerca del umbral de significancia.

La intención principal de este primer análisis estadístico de los datos requería encontrar los predictores o factores que tenían significancia estadística para la respuesta de inserción. La figura 90 muestra los efectos principales para la inserción. La gráfica corrobora los resultados numéricos permitiendo identificar fácilmente la dirección de influencia de cada factor con respecto a la respuesta de inserción y permite descartar los predictores de () y ().

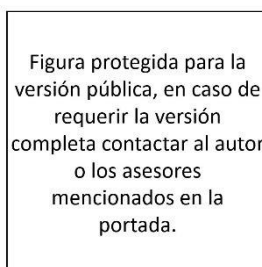


Figura 90. ().

En el software Minitab® se calculan las predicciones para la inserción para cada una de las combinaciones de los predictores establecidos. La figura 91, presenta la configuración óptima para la inserción dentro de los rangos propuestos.

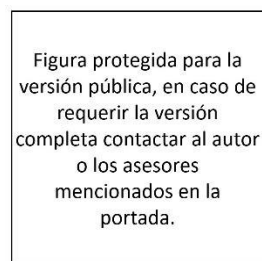


Figura 91. ().

La combinación óptima dentro de los rangos propuestos para cada factor presenta una probabilidad de inserción de 0.510, esto corresponde con la estimación puntual de la probabilidad de inserción bajo las configuraciones de los factores. Entonces, en promedio, hay un 51.0% de probabilidad de que ocurra la inserción cuando los factores están en estos niveles. El intervalo de confianza del 95% para la probabilidad ajustada de inserción es (0.258, 0.756). Este intervalo proporciona una estimación del rango dentro del cual se espera que la verdadera probabilidad de inserción se encuentre con un 95% de confianza, bajo las configuraciones específicas de los factores. Por consiguiente, se tiene un límite inferior de 0.258 y un límite superior de 0.756, los cuales representan una probabilidad mínima del 25.8% y máxima de 75.6% cuando los factores están configurados en los niveles especificados. El intervalo de confianza proporciona una medida de la precisión de la estimación de la probabilidad ajustada. Un intervalo más estrecho indicaría una estimación más precisa, mientras que un intervalo más amplio indica mayor incertidumbre en la estimación. En este caso, el intervalo (0.258, 0.756) es relativamente amplio, lo que sugiere

que hay una variabilidad considerable en la probabilidad de inserción. Esto puede deberse a la incertidumbre en los datos o a la variabilidad inherente en el proceso de inserción.

En la Figura 92, se presenta la gráfica de contorno para la respuesta de inserción con respecto al voltaje y la frecuencia considerando valores fijos para los demás predictores en la configuración óptima.

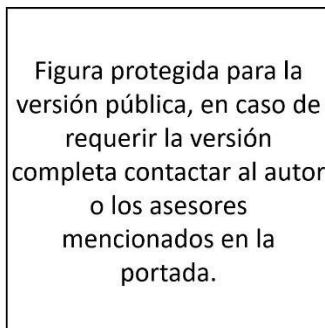


Figura 92.

(_____).

En la Figura 93, se presenta la gráfica de superficie para la respuesta de inserción considerando igualmente la configuración óptima encontrada.

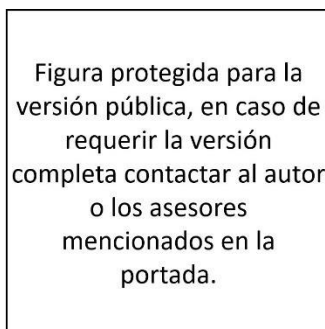


Figura 93.

(_____).

Cuando se analizan diferentes configuraciones de los factores podemos identificar como la probabilidad de inserción se ve afectada significativamente con respecto a la configuración óptima de los factores. A continuación, en la Figura 94, se presentan tres gráficas de contorno para configuraciones diferentes a la óptima donde se visualiza fácilmente la caída en la probabilidad de inserción.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

a)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

b)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

c)

Figura 94. ():
a) ();
b) ();
c) ().

Utilizar el código de detección desarrollado para realizar el seguimiento de las trayectorias del () nos permite comprender a detalle el autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero planteado en esta tesis.

En la Figura 95, se presentan los seguimientos de las trayectorias realizados a las cinco réplicas de la configuración óptima. Las trayectorias permiten comprender los resultados estadísticos a partir de la visualización de trayectorias que constantemente se encuentran próximas a varios de los agujeros existentes. Entonces, se confirma también de manera visual la probabilidad alta de inserción predicha mediante el modelo de regresión logística binaria.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

a)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

b)

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

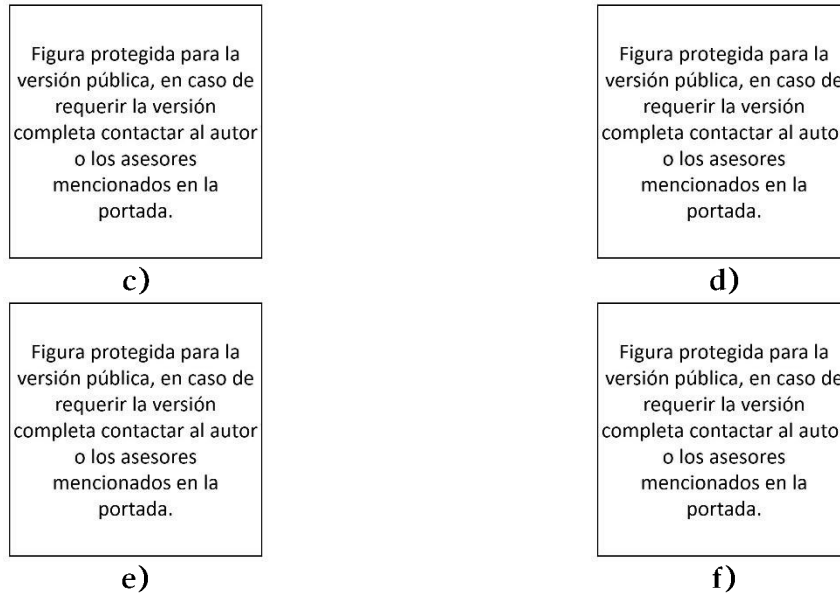


Figura 95. (): a) (); b) (); c) (); d) (); e) (); f) ().

Además, el seguimiento de las trayectorias en cada corrida permite identificar si ocurre o no el posicionamiento en la () antes de la inserción, el () en caso de existir, y el agujero donde finalmente ocurre la inserción, si es que ocurre. Estos resultados se observan en los diferentes índices de la Figura 95. En b), se puede identificar la no inserción, junto con un estado intermedio que causa el atrapamiento del (), imposibilitando la inserción incluso en la configuración con mayor probabilidad. En c), se puede identificar la inserción de la clavija en el agujero 4 sin posicionamiento. En d), se observa el posicionamiento objetivo sobre el agujero 3 donde ocurre la inserción. En e), se visualiza la inserción de la clavija en el agujero 2 sin posicionamiento. Finalmente, en f), se observa la inserción de la clavija con posicionamiento objetivo en el agujero 3. Estos resultados podrían proporcionar bases para controlar en qué agujero se desea que ocurra la inserción dentro de las diferentes configuraciones de los factores, así como alternativas de mejora para la (), de tal manera que el posicionamiento ocurra con una probabilidad alta para todas las inserciones, evitando así posicionamientos erróneos conocidos como estados intermedios no deseados dentro del autoensamblaje.

Para contrastar el análisis visual realizado con el código de detección desarrollado sobre la configuración óptima, se presenta en la Figura 96 la configuración menos favorable para la respuesta de inserción. En la Figura 97, se muestran los seguimientos de las trayectorias realizados a las cinco réplicas de esta configuración. Se hace evidente la baja probabilidad predicha para la inserción debido a la falta de exploración sobre la () y al atrapamiento constante del () en un estado intermedio no deseado en el agujero 2.

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Figura 96.

(_____).

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

a)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

b)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

c)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

d)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

e)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

f)

Figura 97. (_____); a) (_____); b) (_____); c) (_____); d) (_____); e) (_____); f) (_____).

3.3.2. Regresión logística binaria para los factores de mayor influencia

Basado en los resultados del modelo de regresión logística binaria inicial, se plantea un nuevo experimento únicamente con los factores estadísticamente significativos y considerando adicionalmente el factor de la altura, debido a su valor p cercano al umbral de 0.05.

En este caso, se consideran en total cuatro factores o predictores, y se busca encontrar la probabilidad de inserción para diferentes configuraciones. Se plantea realizar un diseño factorial completo 2^4 , es decir, 16 combinaciones en total para una réplica completa. Igualmente, se consideran 5 réplicas para cada combinación, lo que suma un total de 80 corridas experimentales. Igualmente, debido al tipo de respuesta categórica y dicotómica

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

abordada el diseño factorial completo solo se utiliza para obtener el número de combinaciones para un diseño ortogonal. Sin embargo, el análisis estadístico de los datos se realiza igualmente mediante un modelo de regresión logística binaria.

Además de reducir el número de factores para el análisis y con ello el número de corridas, se modificó el rango en los niveles para el factor de frecuencia. Este cambio también surge como resultado del primer diseño experimental, ya que se observó que a menor nivel de frecuencia la respuesta de la inserción aumentaba. Aunque inicialmente se establecieron los niveles para analizar el rango más amplio posible para dicho factor, ahora se busca reducir el rango a niveles donde se conoce que el (_____) realiza trayectorias más amplias sobre la (_____), debido a la experiencia y a las curvas de aceleración obtenidas para el banco experimental, reportadas en las Figuras 83 y 84. Con esto se busca mejorar la cantidad de eventos de inserción respecto al primer experimento y lograr un modelo de regresión logística binaria más preciso, acercándose a la ubicación óptima esperada para el banco experimental planteado.

Los nuevos niveles para la frecuencia se establecen en los valores de resistencia del trimpot de 4 a 6 k Ω , desplazando así el factor de frecuencia hacia la izquierda. Finalmente, dado que los niveles de los demás predictores involucrados ya están establecidos en sus límites y son bastante reducidos, estos se mantienen iguales al primer experimento.

Para iniciar la realización de los experimentos se construye primero la matriz de diseño para un diseño factorial completo 2^4 , es decir, 4 factores (A, B, C, D), cada uno con dos niveles, lo que resulta en 16 combinaciones para una sola réplica. En el anexo 2 (ver Anexo 2, Tabla A3), se muestra la matriz de diseño para el experimento con los factores de mayor influencia resultado del primer experimento analizado anteriormente.

En este estudio, se ha decidido realizar 5 réplicas por cada combinación experimental obtenida de la matriz de diseño factorial completo. Esto resulta en un total de 80 corridas experimentales (16 combinaciones $\times$ 5 réplicas). Este enfoque no solo permite mantener la ortogonalidad del diseño, sino también asegurar que el experimento esté balanceado.

Para mejorar aún más la validez del análisis y minimizar posibles sesgos, se decidió aleatorizar el orden de las corridas experimentales. En el anexo 2 (ver Anexo 2, Tabla A4), se presentan el orden aleatorizado de las corridas experimentales para la realización del experimento junto con el resultado binario correspondiente al evento de inserción (1) o no inserción (0).

Utilizando el software Minitab® se ajusta un modelo de regresión logística binaria debido a la naturaleza categórica y dicotómica de la variable de respuesta a analizar. En nuestro caso se están considerando los 4 factores estadísticamente significativos considerando los resultados del primer experimento previamente realizado y analizado para la respuesta de inserción deseada o evento igual a 1. Minitab® nos permite establecer nuestros predictores como continuos o categóricos para la realización del ajuste del modelo. Los predictores continuos dentro del nuevo análisis son la frecuencia y el voltaje, mientras que los predictores categóricos son la altura de la clavija y (_____).

Para el total de 80 corridas experimentales realizadas la cantidad de eventos (inserciones exitosas) y no eventos (inserciones fallidas) fueron 25 y 55 respectivamente.

En la tabla 10, se presentan los coeficientes estimados para cada uno de los factores incluidos en el modelo, así como sus errores estándar (EE) y los factores de inflación de la varianza (FIV).

Tabla 10. Estimaciones de los coeficientes del modelo de regresión logística binaria del experimento factorial completo.

Término	Coeficiente	EE del coeficiente	FIV
Constante	-1.603	0.634	-
Frecuencia	1.603	0.435	1.46
Voltaje	1.21	0.395	1.28
Altura (1)	-2.42	0.789	1.28
()	()	()	()

En este experimento, el coeficiente de la constante es -1.603, lo que sigue la misma lógica interpretativa anteriormente. Este valor negativo indica que, cuando los factores significativos (Frecuencia, Voltaje, Altura, y ()) se encuentran en sus niveles de referencia, la probabilidad de inserción en el proceso de autoensamblaje es baja. La interpretación del coeficiente de la constante sugiere que, sin la intervención positiva de estos factores, el sistema presenta una tendencia desfavorable hacia la inserción. Esto refuerza la importancia de ajustar adecuadamente los factores significativos para mejorar la probabilidad de éxito en el proceso.

El error estándar de 0.634 asociado a este coeficiente implica una precisión moderada en la estimación de la constante. Este error, aunque algo mayor que el del primer experimento, sigue siendo lo suficientemente bajo como para considerar que la predicción es confiable. La diferencia en los valores de la constante y sus errores estándar entre ambos experimentos refleja cómo la inclusión únicamente de los factores significativos en el segundo experimento ajusta la predicción, haciéndola más específica y relevante para las condiciones operativas optimizadas. Estos resultados destacan cómo la reducción del modelo a los factores más influyentes proporciona una visión más clara y eficiente del proceso de autoensamblaje, permitiendo una mejor gestión de las variables para lograr la inserción deseada.

En términos generales un coeficiente negativo indica que un aumento en el predictor asociado representa una disminución en la probabilidad de ocurrencia del evento. Entonces, se observa que un aumento en la altura de la clavija representa una disminución en la probabilidad de ocurrencia de la inserción en concordancia con el resultado del primer experimento. Por otra parte, cuando el coeficiente del predictor es positivo sugiere que el aumento de dicho predictor tiene una influencia positiva en la probabilidad de ocurrencia del evento asociado. En el análisis, se observan coeficientes positivos para la frecuencia, el voltaje, (). Es importante resaltar que se corroboran los resultados del primer experimento y se observa que la frecuencia para el nuevo rango establecido tiene una influencia positiva en la probabilidad de inserción, es decir, en concordancia con los resultados del primer experimento a menor nivel de frecuencia mayor es la probabilidad de inserción. Sin embargo, en el nuevo rango de frecuencia el nivel alto mejora la probabilidad de inserción y se visualiza como el valor óptimo para este factor.

Los errores estándar de los coeficientes varían entre 0.395 y 0.789, lo cual indica el nivel de precisión en la estimación de cada coeficiente. Un error estándar más bajo sugiere mayor precisión en la estimación de ese coeficiente. Por ejemplo, el coeficiente para la “()” tiene un EE del coeficiente de 0.789, lo que indica una estimación

razonablemente precisa, aunque no tan precisa como el coeficiente de “frecuencia” que tiene un EE del coeficiente de 0.395.

Los valores de FIV van de 1.28 a 1.46, indicando que no hay problemas serios de colinealidad en los datos. El FIV más alto es 1.46 para la “Frecuencia”, lo cual está por debajo del umbral comúnmente aceptado de 5, sugiriendo que la colinealidad no es un problema significativo en el modelo.

Considerando los resultados para los coeficientes del modelo de regresión logística binaria podemos escribir la ecuación de regresión y la ecuación de la probabilidad de ocurrencia del evento de inserción (1) como se muestra a continuación en la ecuación (70) y (71) respectivamente.

$$Y' = -1.603 + 1.603 * Frecuencia + 1.210 * Voltaje + 0 * Altura_{-1} - 2.420 * Altura_1 + (\text{_____}) \quad (70)$$

$$P(1) = \frac{e^{Y'}}{1 + e^{Y'}} \quad (71)$$

Aunque el R-cuadrado tradicional no es directamente aplicable a los modelos de regresión logística, se utilizan el R-cuadrado de desviación y el R-cuadrado ajustado de desviación para evaluar la proporción de variabilidad explicada por el modelo. En este análisis, se obtuvo un R-cuadrado de desviación del 45.21% y un R-cuadrado ajustado de desviación del 41.18%. Estos valores indican que el modelo explica una porción bastante razonable de la variabilidad en la probabilidad de la respuesta dicotómica de inserción, lo cual es mejor en el modelo de regresión logística del experimento realizado con solo los factores estadísticamente significativos según los resultados del primer experimento.

Además de los R-cuadrados de desviación, se realizaron varias pruebas de bondad de ajuste para evaluar la adecuación del modelo:

- Prueba de Desviación: Con un valor p de 0.965, no hay evidencia significativa de que el modelo no se ajuste bien a los datos.
- Prueba de Pearson: Un valor p de 0.226 sugiere que no hay discrepancia significativa entre los valores observados y predichos.
- Prueba de Hosmer-Lemeshow: Un valor p de 0.716 respalda la hipótesis de que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos.

Estas pruebas indican que el modelo proporciona un buen ajuste a los datos y es adecuado para describir la probabilidad de inserción en función de los predictores considerados para un nivel de significancia seleccionado de 0.05.

El análisis de varianza utilizando la prueba de Wald para los predictores produjo los resultados que se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Análisis de varianza (prueba de Wald) del experimento factorial completo.

Fuente	GL	Chi-cuadrado	Valor p
Regresión	4	19.89	0.001
Frecuencia	1	13.56	0
Voltaje	1	9.4	0.002
Altura	1	9.4	0.002
()	()	()	()

Podemos observar que el modelo de regresión en su totalidad es significativo. Esto significa que, colectivamente, los predictores incluidos en el modelo tienen un efecto significativo sobre la probabilidad de inserción. Para el nuevo rango de frecuencia se observa que cambios en la frecuencia tienen un impacto considerable sobre la probabilidad de inserción, siendo altamente significativo. Finalmente, todos los predictores se corroboran estadísticamente significativos con respecto al nivel de significancia asignado de 0.05, debido a que su valor p es menor que el valor de dicho nivel.

Los resultados del análisis de varianza mediante la prueba de Wald muestran que todos los predictores considerados en este segundo experimento (frecuencia, voltaje, altura, ()) son estadísticamente significativos. La significancia de estos predictores indica que cada uno de ellos tiene una influencia importante sobre la probabilidad de inserción, y su inclusión en el modelo de regresión logística binaria está justificada. Esto respalda la decisión de enfocar el nuevo experimento en estos factores clave y ajustarlos para mejorar la precisión del modelo predictivo.

Para el segundo análisis estadístico de los datos se corroboran los predictores o factores que tenían significancia estadística para la respuesta de inserción y se encuentra un modelo de regresión logística binaria que se ajusta mejor a la predicción de la probabilidad de la respuesta de inserción. La figura 98 muestra los efectos principales para la inserción. La gráfica corrobora los resultados numéricos permitiendo identificar fácilmente la dirección de influencia de cada factor con respecto a la respuesta de inserción y permite además con respecto al primer experimento ubicarnos en la región donde la frecuencia mejora la probabilidad de la respuesta, encontrando así el nivel donde se optimiza la inserción.

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

Figura 98. ().

De igual forma que en el primer experimento se calculan las predicciones para la inserción para cada una de las combinaciones de los predictores establecidos con el software Minitab®. La figura 99, presenta la configuración óptima global para la inserción.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 99. (_____).

La combinación óptima global para cada factor presenta una probabilidad de inserción de 0.9742, esto corresponde con la estimación puntual de la probabilidad de inserción bajo las configuraciones de los factores. Entonces, en promedio, hay un 97.42% de probabilidad de que ocurra la inserción cuando los factores están en estos niveles. El intervalo de confianza del 95% para la probabilidad ajustada de inserción es (0.8489, 0.9961). Este intervalo proporciona una estimación del rango dentro del cual se espera que la verdadera probabilidad de inserción se encuentre con un 95% de confianza, bajo las configuraciones específicas de los factores. Por consiguiente, se tiene un límite inferior de 0.8489 y un límite superior de 0.9961, los cuales representan una probabilidad mínima del 84.89% y máxima de 99.61% cuando los factores están configurados en los niveles especificados. El intervalo de confianza proporciona una medida de la precisión de la estimación de la probabilidad ajustada. El intervalo más estrecho con respecto a los resultados del primer experimento indica una estimación más precisa. En este caso, el intervalo (0.8489, 0.9961) sugiere que hay una variabilidad baja en la probabilidad de inserción. Esto se debe a menor incertidumbre en los datos y menor variabilidad inherente en el proceso de inserción para el nuevo rango de frecuencia establecido.

En la Figura 100, se presenta la gráfica de contorno para la respuesta de inserción con respecto al voltaje y la frecuencia considerando valores fijos para los demás predictores en la configuración óptima global.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 100.

(_____).

En la Figura 101, se presenta la gráfica de superficie para la respuesta de inserción considerando igualmente la configuración óptima encontrada.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

Figura 101.

Cuando se analizan diferentes configuraciones de los factores podemos identificar como la probabilidad de inserción se ve afectada con respecto a la configuración óptima global de los factores. A continuación, en la Figura 102, se presentan tres gráficas de contorno para configuraciones diferentes a la óptima donde se visualiza fácilmente la caída en la probabilidad de inserción. Sin embargo, en relación a la caída de la probabilidad de inserción con respecto al primer experimento para configuraciones diferentes a la óptima podemos apreciar una menor reducción de la probabilidad de inserción para algunas configuraciones. Esto nos muestra una probabilidad de inserción generalizada mejor para el experimento que involucra únicamente los factores estadísticamente significativos resultados del primer experimento y el nuevo rango de los niveles de la frecuencia. Explicando así la mayor ocurrencia de eventos deseados de un experimento con respecto al otro y un modelo de regresión logística binaria con mejor ajuste.

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

a)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

b)

Figura protegida para la
versión pública, en caso de
requerir la versión
completa contactar al autor
o los asesores
mencionados en la
portada.

c)

Figura 102. (): a) ();
b) (); c) ().

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada. 116

Utilizar el código de detección desarrollado para realizar el seguimiento de las trayectorias del () nos permite comprender a detalle el autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero planteado en esta tesis.

En la Figura 103, se presentan los seguimientos de las trayectorias realizados a las cinco réplicas de la configuración óptima global. Las trayectorias permiten comprender los resultados estadísticos a partir de la visualización de trayectorias que constantemente se encuentran próximas a varios de los agujeros existentes. Entonces, se confirma también de manera visual la probabilidad alta de inserción predicha mediante el modelo de regresión logística binaria.

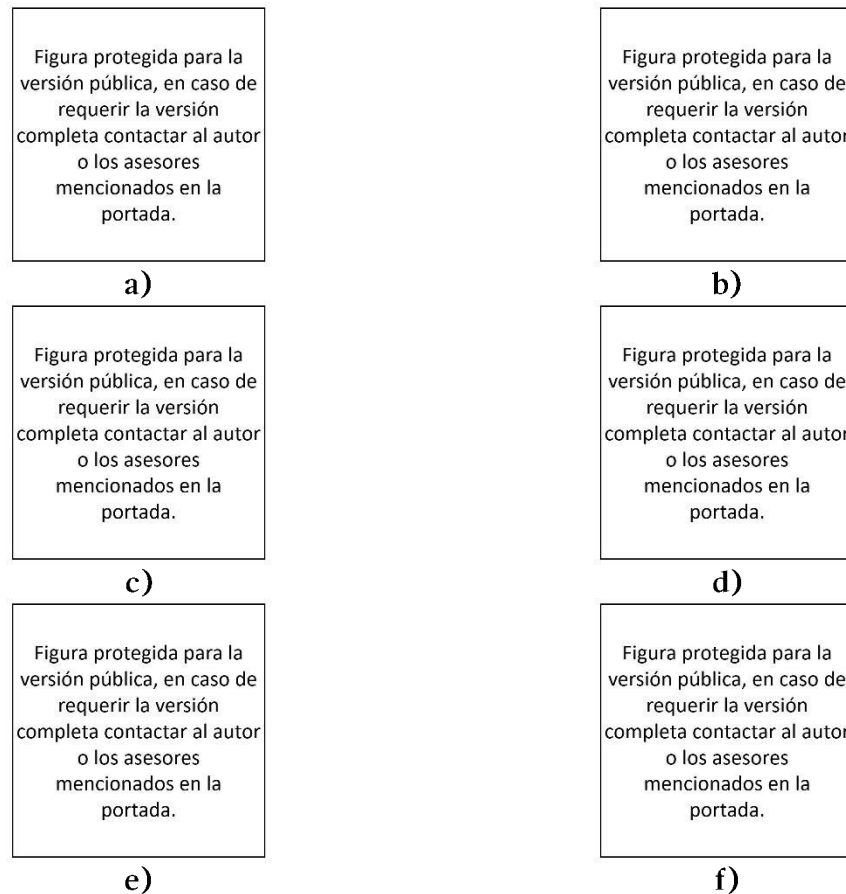


Figura 103. (): a) (); b) (); c) (); d) (); e) (); f) ().

Además, el seguimiento de las trayectorias en cada corrida permite identificar si ocurre o no el posicionamiento en la () antes de la inserción, el tipo de posicionamiento en caso de existir, y el agujero donde finalmente ocurre la inserción, si es que ocurre. Estos resultados se observan en los diferentes índices de la Figura 95. En b), se puede identificar la inserción en el agujero 4 con posicionamiento objetivo y la liberación del posicionamiento segundos después de la inserción. En c), se puede identificar la inserción de la clavija en el agujero 2 con posicionamiento y posterior liberación. En d), se observa el no posicionamiento sobre el agujero 1 donde ocurre la inserción. En e), se visualiza la inserción de la clavija en el agujero sin posicionamiento. Finalmente, en f), se observa la inserción de la clavija con posicionamiento objetivo en el agujero 2 con posterior liberación. Estos

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

resultados podrían proporcionar bases para controlar en qué agujero se desea que ocurra la inserción dentro de las diferentes configuraciones de los factores, así como alternativas de mejora para la (____), de tal manera que el posicionamiento ocurra con una probabilidad alta para todas las inserciones, en contraste con el primer experimento se observa que ocurren menos atrapamientos o estados intermedios de autoensamblaje.

Para contrastar el análisis visual realizado con el código de detección desarrollado sobre la configuración óptima, se presenta en la Figura 104 la configuración menos favorable para la respuesta de inserción. En la Figura 105, se muestran los seguimientos de las trayectorias realizados a las cinco réplicas de esta configuración. Se hace evidente la baja probabilidad predicha para la inserción debido a la falta de (____) y al atrapamiento constante del (____) en un estado intermedio no deseado en el agujero 1 y 4.

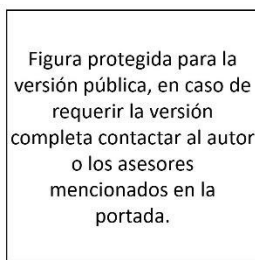
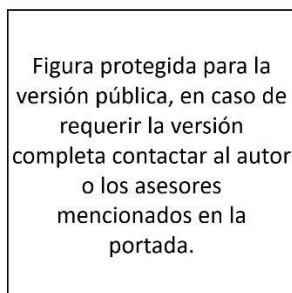
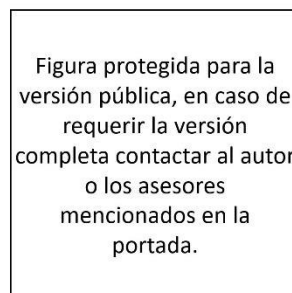


Figura 104.

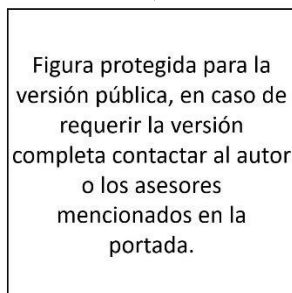
(_____).



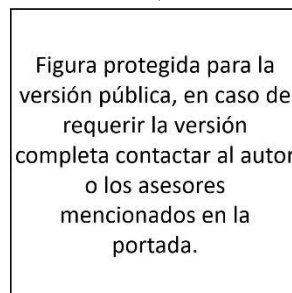
a)



b)



c)



d)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

e)

Figura protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

f)

Figura 105. (____); a) (____); b) (____); c) (____); d) (____); e) (____); f) (____).

3.3.3. Validación del ajuste de la probabilidad de ocurrencia del autoensamblaje a escala macroscópica de clavija en agujero

Después de analizar los dos experimentos iniciales, se decidió corroborar los resultados obtenidos, considerando la probabilidad de inserción predicha por el modelo de regresión logística binaria basado en los cuatro factores significativos. Para esto, se realizaron 30 corridas adicionales divididas en dos configuraciones:

- Configuración óptima: Se ejecutaron 15 corridas con los factores ajustados a los niveles óptimos encontrados en el análisis previo, en particular, con la altura de la clavija en el nivel bajo (frecuencia = 1, voltaje = 1, altura de la clavija = -1, (____) = 1).
- Configuración adicional: Se ejecutaron otras 15 corridas con una configuración similar, pero con la altura de la clavija en el nivel alto (frecuencia = 1, voltaje = 1, altura de la clavija = 1, (____) = 1).

El objetivo fue comparar el porcentaje de inserción real con la probabilidad de inserción predicha para validar la precisión del modelo. En el anexo 2 (ver Anexo 2, Tabla A5), se presentan los resultados obtenidos para las 30 corridas.

Al observar los resultados para la configuración óptima se identifican 14 resultados de inserción exitosa de los 15 posibles, lo que representa un porcentaje de éxito del 93.33%. La probabilidad de inserción predicha por el modelo de regresión logística binaria para esta configuración es del 97.42%.

Calculando el porcentaje de error entre el valor real y el valor predicho se obtiene un valor de 4.38%. Este alto porcentaje de inserción real y el bajo porcentaje de error corroboran la precisión del modelo en esta configuración óptima.

Considerando la configuración similar, pero con la altura de la clavija en el nivel alto se presentan 13 resultados de inserción exitosa de los 15 posibles, representando el 86.67% de porcentaje de éxito.

La probabilidad de inserción predicha por el modelo de regresión logística binaria para esta configuración es del 77.03%.

Nuevamente, aplicando el cálculo del porcentaje de error se obtiene un valor de 11.12%. Aunque este porcentaje es ligeramente mayor al de la configuración óptima, sigue siendo consistente con las predicciones del modelo, confirmando su validez.

Los resultados de estas corridas adicionales respaldan la validez del modelo de regresión logística binaria. La configuración óptima identificada por el modelo mostró una alta tasa de éxito en inserciones reales, con un bajo porcentaje de error, confirmando la precisión del análisis. La configuración con una buena probabilidad también mostró resultados satisfactorios, aunque con un porcentaje de error más alto, lo que es coherente con las predicciones del modelo. Estos hallazgos sugieren que el modelo de regresión logística binaria es una herramienta fiable para predecir la probabilidad de inserción en este contexto experimental, proporcionando una base sólida para futuras optimizaciones y ajustes en el proceso.

3.3.4. Análisis de varianza de un factor

Para profundizar en la validación de los resultados y determinar si la media del tiempo de inserción varía significativamente según la altura de la clavija, se realizó un ANOVA (análisis de varianza) de un factor. En este análisis, se incluyeron únicamente las corridas con respuesta exitosa, y se utilizaron igual número de corridas para el nivel bajo (-1) y alto (1), para mantener un diseño balanceado. El objetivo era observar si las medias de los tiempos de inserción para los dos niveles de altura eran estadísticamente iguales o diferentes con un nivel de significancia del 0.05.

- Hipótesis nula (H0): Las medias de los tiempos de inserción son todas iguales para ambos niveles de altura.
- Hipótesis alternativa (H1): Las medias de los tiempos de inserción no son todas iguales para ambos niveles de altura.
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

En la tabla 12, se presentan los datos utilizados para el ANOVA de un factor.

Tabla 12. Datos utilizados para el ANOVA de un factor.

#	Factor Altura	Respuesta		
		Inserción	Tiempo [s]	Transformación de tiempo
1	-1	1	18	2.89037176
2	1	1	138	4.92725369
3	-1	1	28	3.33220451
4	-1	1	49	3.8918203
5	1	1	157	5.05624581
6	1	1	69	4.2341065
7	-1	1	55	4.00733319
8	-1	1	11	2.39789527
9	1	1	19	2.94443898
10	-1	1	69	4.2341065
11	-1	1	47	3.8501476
12	1	1	51	3.93182563

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

13	-1	1	11	2.39789527
14	-1	1	38	3.63758616
15	-1	1	83	4.41884061
16	-1	1	51	3.93182563
17	-1	1	80	4.38202663
18	1	1	106	4.66343909
19	1	1	264	5.5759491
20	1	1	82	4.40671925
21	-1	1	34	3.52636052
22	1	1	189	5.24174702
23	1	1	81	4.39444915
24	1	1	138	4.92725369
25	1	1	156	5.04985601
26	1	1	69	4.2341065

Inicialmente, se realizó una prueba de normalidad de los datos recolectados para los tiempos de inserción. La gráfica de probabilidad de los tiempos en la Figura 106 muestra que los datos no siguen una distribución normal (Valor $p = 0.010$).

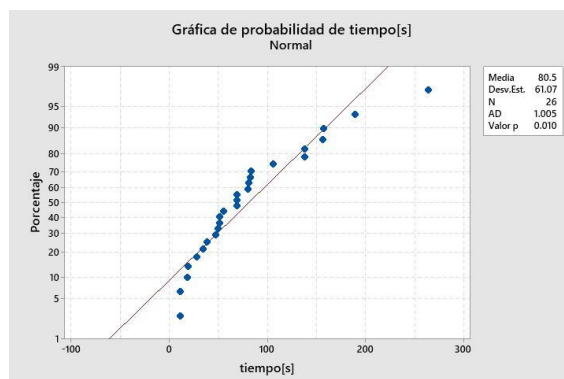


Figura 106. Prueba de normalidad para los datos de la respuesta de tiempo de inserción.

Para abordar este problema, se aplicó una transformación de Box-Cox igual a $\ln(\text{tiempo})$ y se obtuvieron los valores de la última columna de la Tabla 12. Una transformación de Box-Cox es adecuada cuando los datos de respuesta no siguen una distribución normal tras realizar una prueba de normalidad, ya que esta técnica puede ayudar a estabilizar la varianza y aproximar los datos a una distribución normal. Al utilizar una transformación de los datos de respuesta, podemos lograr la normalidad de los datos, lo que es un supuesto fundamental para proceder con un ANOVA.

El ANOVA asume que los residuos del modelo son normalmente distribuidos y que la varianza es homogénea. Si los datos originales no cumplen con estos supuestos, los resultados del ANOVA pueden ser inexactos, llevando a conclusiones erróneas. Una transformación de Box-Cox puede resolver estos problemas ajustando los datos para que se comporten de manera más cercana a una distribución normal, permitiendo así un análisis más fiable y válido.

No realizar dicha transformación podría implicar varios problemas. Primero, los resultados del ANOVA podrían no ser confiables debido a la violación de los supuestos de normalidad. Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

y homogeneidad de la varianza. Esto podría llevar a errores tipo I o tipo II, donde se rechaza incorrectamente una hipótesis nula verdadera o no se rechaza una hipótesis nula falsa, respectivamente. Además, la interpretación de los resultados podría ser problemática, ya que los efectos observados podrían no reflejar la verdadera relación entre las variables debido a la distorsión introducida por la falta de normalidad.

La transformación de Box-Cox aplicada produjo datos de transformación de tiempo que sí se comportaban de manera normal (Valor $p = 0.497$), permitiendo así la realización del ANOVA bajo el cumplimiento de los supuestos necesarios para mayor validez, ver Figura 107.

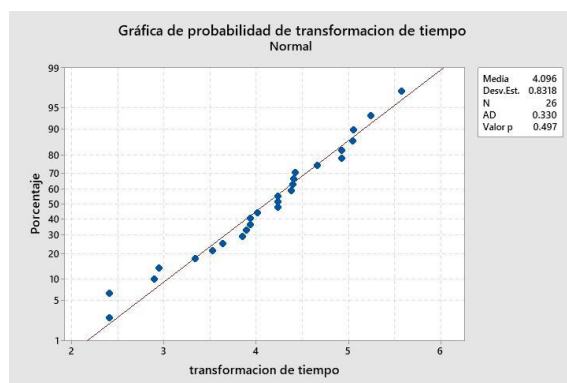


Figura 107. Prueba de normalidad para los datos transformados de la respuesta de tiempo de inserción.

Utilizando el software Minitab® se realiza el ANOVA, obteniendo los resultados reportados en la Tabla 13.

Tabla 13. ANOVA (análisis de varianza) de un factor para la respuesta de tiempo de inserción con valores transformados.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Altura de la clavija	1	6.193	6.1927	13.39	0.001
Error	24	11.104	0.4627		
Total	25	17.296			

El valor p obtenido (0.001) es menor que el nivel de significancia (0.05), lo que indica que se rechaza la hipótesis nula. Esto sugiere que hay una diferencia significativa en los tiempos de inserción entre los dos niveles de altura de la clavija.

Para identificar las diferencias significativas entre las medias de los tiempos de inserción para los diferentes niveles de altura de la clavija, se utilizó la prueba de Tukey. Esta prueba se eligió debido a las siguientes razones:

- **Multiplicidad de Comparaciones:** La intención era comparar todas las combinaciones posibles entre los niveles de altura de la clavija. La prueba de Tukey es particularmente adecuada para realizar múltiples comparaciones simultáneamente sin incrementar significativamente el error tipo I.
- **Control de Error Tipo I:** A diferencia de la prueba de Fisher (LSD), la prueba de Tukey proporciona un mejor control del error tipo I, lo cual es crucial cuando se

realizan muchas comparaciones. Esto minimiza la probabilidad de encontrar diferencias significativas por error.

- Suposiciones de Homogeneidad: Después de transformar los datos usando la transformación de Box-Cox, se verificó la normalidad y homogeneidad de varianzas, lo que justifica el uso de la prueba de Tukey en este contexto.
- Comparaciones entre Todos los Grupos: A diferencia de la prueba de Dunnett, que es más adecuada para comparaciones contra un grupo control, la prueba de Tukey permite comparaciones entre todos los pares de grupos, que es exactamente lo que se buscaba en este análisis.

Por lo tanto, la prueba de Tukey fue la elección más adecuada para este análisis, proporcionando un balance óptimo entre la potencia del test y el control del error tipo I.

Los resultados de la prueba de Tukey se presentan en la Tabla 14 donde se muestra la agrupación de las medias con una confianza del 95%. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Tabla 14. Agrupación de las medias utilizando el método de Tukey y una confianza del 95%.

Altura de la clavija	N	Media	Agrupación
1	13	4.584	A
-1	13	3.608	B

La prueba simultánea de Tukey para diferencias de las medias proporciona una comparación de las medias entre los diferentes niveles del factor investigado, en este caso, la altura de la clavija (-1 y 1), ver Tabla 15.

Tabla 15. Prueba simultánea de Tukey para diferencias de las medias.

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
1 - -1	0.976	0.267	(0.425, 1.527)	3.66	0.001

La diferencia entre las medias de los tiempos de inserción para la altura de la clavija en nivel 1 y en nivel -1 es 0.976. Esto significa que, en promedio, el tiempo de inserción para la altura en nivel 1 es 0.976 unidades de tiempo más alto que para la altura en nivel -1. El valor p ajustado de 0.001 indica que la diferencia entre las medias es altamente significativa. Con un valor p tan bajo (menor que el nivel de significancia de 0.05), se rechaza la hipótesis nula de que las medias son iguales y se acepta la hipótesis alternativa de que las medias son diferentes. De manera gráfica el resultado se observa en la Figura 108, donde el intervalo de confianza para la diferencia de las medias no contiene a cero, concluyendo que las medias correspondientes son significativamente diferentes.

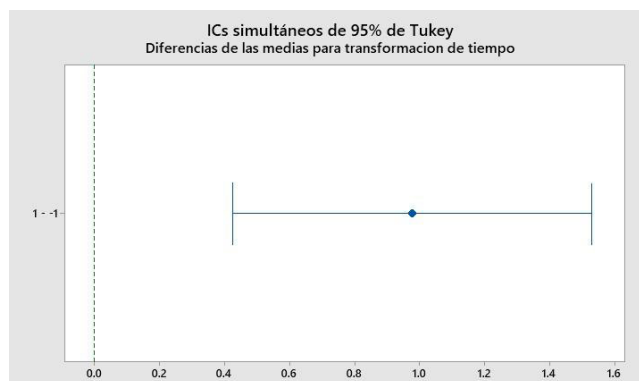


Figura 108. Resultado gráfico de la prueba simultánea de Tukey para diferencias de las medias.

La gráfica de cajas y bigotes de la Figura 109, presenta la distribución de la transformación de los tiempos de inserción en función de la altura de la clavija para el nivel bajo (-1) y nivel alto (1).

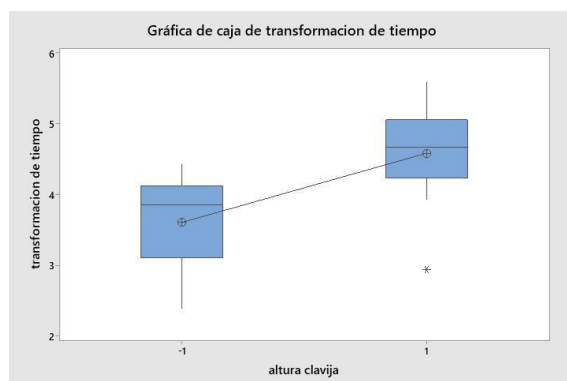


Figura 109. Gráfica de cajas y bigotes para la transformación de tiempo de inserción en función de la altura de la clavija.

Para la altura de clavija en el nivel bajo (-1), la mediana de la transformación del tiempo es más baja comparada con la altura de clavija en el nivel alto (1). Esto indica que los tiempos de inserción transformados son menores cuando la altura de la clavija está en el nivel bajo. El rango intercuartílico, representado por la caja, es de 1.00943 para la altura de clavija en el nivel bajo (-1) y de 0.818944 para la altura de clavija en el nivel alto (1). La altura de la caja y los valores exactos indican que hay una variabilidad ligeramente mayor en el nivel bajo (-1). Se observa un valor atípico para la altura de clavija en el nivel alto (1), que podría ser un dato extremo influenciado por factores no controlados o una variabilidad inherente en el proceso. Las líneas que conectan las medias de ambos niveles de altura muestran una diferencia significativa en las medias de los tiempos de inserción transformados, apoyando la conclusión de que la altura de la clavija tiene un impacto significativo en los tiempos de inserción.

Finalmente, se presenta en la Figura 110, la gráfica cuatro en uno de los residuos para la transformación del tiempo. En la primera gráfica se observan los residuos aproximadamente alineados a lo largo de la línea de referencia, lo que sugiere que los residuos siguen una distribución normal. Esto es importante para validar los supuestos del ANOVA, indicando que los errores son aproximadamente normales. La segunda gráfica ilustra los residuos en función de los valores ajustados. La dispersión aleatoria de los residuos alrededor de cero sin ningún patrón claro sugiere homocedasticidad (varianza constante de los residuos). Esto

es un indicador positivo de que el modelo de regresión es apropiado y los supuestos del ANOVA no están violados. En la tercera gráfica el histograma de los residuos muestra una distribución aproximadamente simétrica alrededor de cero, reforzando la conclusión de que los residuos siguen una distribución normal. Esta es otra verificación de la validez del modelo de ANOVA. En la cuarta gráfica se muestran los residuos en el orden en que se realizaron las observaciones. La ausencia de un patrón claro sugiere que no hay correlación entre los residuos y el orden de las observaciones. Esto indica que los residuos son independientes entre sí, cumpliendo otro supuesto importante del ANOVA.

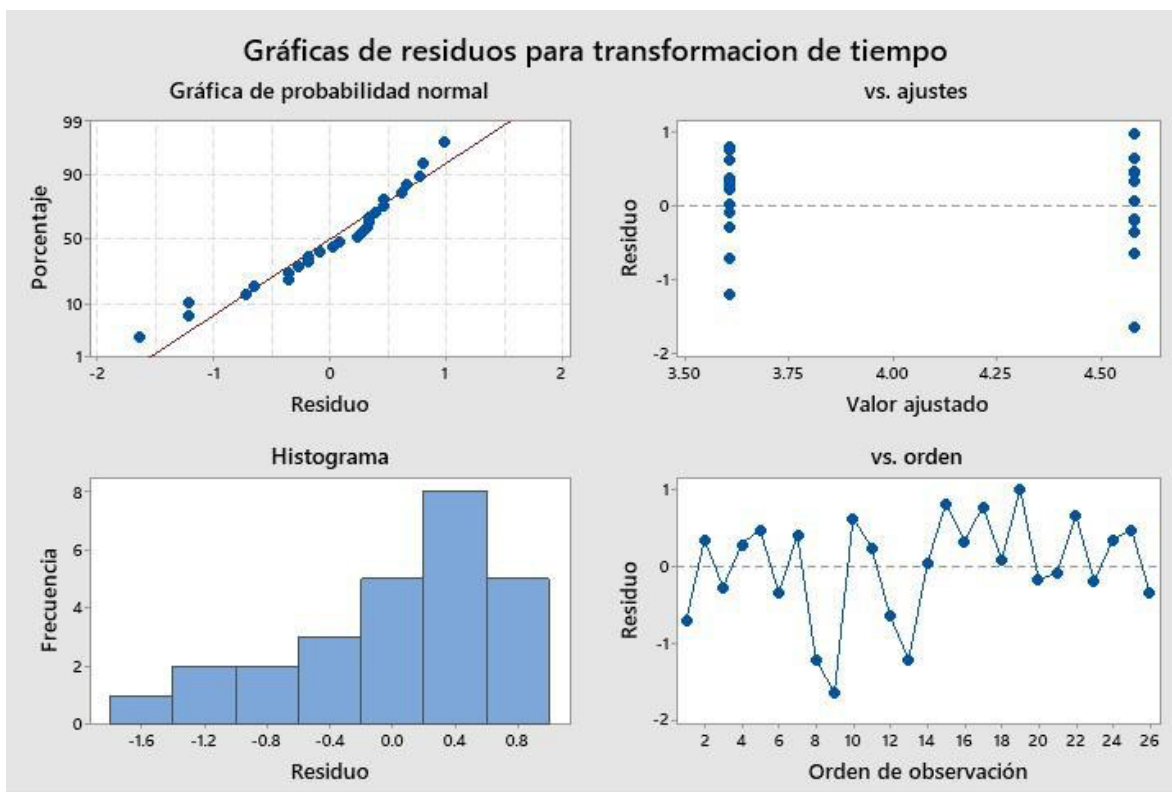


Figura 110. Gráfica cuatro en uno de los residuos para la transformación de tiempo.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES DE LA TESIS

4.1. RESUMEN

Para transformar piezas o componentes individuales previamente manufacturados en productos acabados o máquinas operativas, es esencial llevar a cabo un proceso de ensamblaje que reúna estos componentes en conjuntos o subconjuntos de manera ordenada. Los métodos tradicionales de ensamblaje en ingeniería, a menudo requieren una considerable intervención humana y una significativa inversión de recursos. En contraste, las técnicas de autoensamblaje explotan las interacciones físicas espontáneas para formar estructuras complejas de manera autónoma, prometiendo soluciones de ensamblaje más eficientes y sostenibles. En este sentido la investigación desarrollada cuestiona la viabilidad de implementar un autoensamblaje a escala macroscópica, enfocándose específicamente en el problema de inserción de una clavija en un agujero.

La hipótesis de la investigación postula la viabilidad de desarrollar un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica que permita la inserción autónoma de una clavija en un agujero. Esta hipótesis se centra en la capacidad de identificar y controlar los elementos constitutivos del autoensamblaje, tales como el diseño de los componentes, el entorno en el que ocurre el proceso, las fuerzas perturbadoras y de unión, y la característica de reversibilidad para que una clavija realice la inserción en un agujero mediante la apropiada configuración del proceso. La investigación propuso innovar en la solución del problema de inserción de clavija en agujero a través del entendimiento de las bases tanto del ensamblaje tradicional como del autoensamblaje. Comprender a fondo el problema es esencial para considerar alternativas viables al desarrollar metodologías. Con el conocimiento adquirido, se diseñó un banco experimental capaz de llevar a cabo el ensamblaje de manera autónoma. Este banco experimental permitió estudiar los factores controlables del proceso mediante el diseño de experimentos y generar conclusiones sobre los elementos que facilitan la predicción y optimización de la inserción de clavija en agujero utilizando la metodología de autoensamblaje.

Para el banco experimental desarrollado, se establecieron diversos factores controlables para el autoensamblaje de la clavija en un agujero a escala macroscópica en tres dimensiones. Entre estos factores, se analizaron mediante diseño de experimentos: frecuencia, voltaje, altura de la clavija, (_____), (_____), y (_____). La regresión logística binaria fue el método de análisis seleccionado, dado que se ajusta adecuadamente a la respuesta dicotómica (ocurrencia o no de la inserción) y a la combinación de variables continuas y categóricas de los factores, permitiendo ajustar un modelo de probabilidad para el evento deseado.

Después de realizar múltiples corridas experimentales, se identificaron los factores estadísticamente significativos en la probabilidad de inserción: frecuencia, voltaje, altura de la clavija y (_____), mientras que el (_____) y la (_____) fueron descartados en una primera instancia. En un análisis posterior, se ajustó el rango de frecuencia para encontrar la configuración óptima del proceso utilizando únicamente los factores significativos. Se determinó la probabilidad de inserción para diversas configuraciones posibles y se logró predecir con buen ajuste la ocurrencia de la inserción de la clavija en el agujero.

Adicionalmente, se desarrolló un código de seguimiento que permitió observar detalladamente el proceso de autoensamblaje. Este seguimiento permitió visualizar aspectos

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

como el agujero donde ocurría la inserción, las posiciones del (_____), los estados intermedios de bloqueo, y la capacidad de superar dichos bloqueos. Este análisis también facilitó la identificación de posibles mejoras como por ejemplo el ajuste del sistema en función de factores variables a lo largo del tiempo. Finalmente, se realizó una prueba de ajuste del modelo de probabilidad, que mostró un error menor al 12%, y se analizó el proceso de inserción para diferentes niveles de altura de la clavija, todo bajo métodos de análisis rigurosos y con el cumplimiento de los supuestos necesarios para validar los resultados.

4.2. EVALUACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La investigación realizada ha demostrado que es posible desarrollar un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica, específicamente para la correcta inserción de una clavija en un agujero. Se diseñó y fabricó un banco experimental de autoensamblaje que incorpora los elementos constitutivos esenciales para tal proceso, tales como el diseño de los componentes, el entorno, las fuerzas perturbadoras, las fuerzas de unión y la característica de reversibilidad.

La validación de la hipótesis planteada se realizó mediante un enfoque integrado que combinó la investigación teórica y experimental. Inicialmente, se estudiaron en profundidad los principios teóricos relacionados con la inserción de clavijas cilíndricas en agujeros, identificando las condiciones críticas para que ocurriera el ensamblaje. A partir de este conocimiento, se desarrolló un estudio cuasiestático que permitió analizar las relaciones fuerza-momento inherentes a métodos tradicionales de inserción. Posteriormente, se diseñaron y realizaron experimentos preliminares para explorar cómo una combinación de fuerza y momento podría inducir el movimiento previsto teóricamente. Este proceso condujo al diseño de componentes específicos que incorporaron restricciones de posición para guiar a la clavija hacia el agujero, asegurando la inserción mediante la aplicación controlada de una fuerza externa configurable. Paralelamente, se profundizó en los principios del autoensamblaje, lo que facilitó el desarrollo de un sistema experimental autónomo capaz de ejecutar el ensamblaje sin intervención manual. Este enfoque dual permitió no solo validar la hipótesis, sino también demostrar cómo las predicciones teóricas se materializan en un sistema práctico, cerrando el ciclo entre teoría y experimentación.

Se realizaron múltiples corridas experimentales que no solo validaron un prototipo capaz de insertar una clavija en un agujero mediante un proceso autónomo y estocástico (autoensamblaje), sino que también permitieron realizar un análisis estadístico robusto mediante regresión logística binaria. Este análisis identificó los factores realmente significativos para la respuesta de inserción deseada y ayudó a determinar la configuración óptima de los factores para lograr una alta probabilidad de éxito en un proceso inherentemente variable debido a su naturaleza autónoma y estocástica.

Además, se desarrolló un código de detección para el seguimiento de trayectorias del proceso, que permitió identificar detalles adicionales no contemplados inicialmente en la hipótesis. Este seguimiento detallado no solo corroboró los resultados experimentales, sino que también identificó áreas de mejora y futuras líneas de investigación. Por ejemplo, se observaron aspectos como el comportamiento de las trayectorias de inserción, los estados intermedios de bloqueo y las posibilidades de superar dichos bloqueos, así como los estados objetivos alcanzados.

La investigación también proporcionó una prueba de ajuste del modelo de probabilidad con un error menor al 12%, validando así la precisión del modelo predictivo desarrollado. El análisis de las medias de los tiempos de inserción para diferentes niveles de altura de la clavija, bajo métodos robustos de análisis y cumpliendo con los supuestos necesarios, fortaleció la validez de los resultados obtenidos.

La evaluación de la hipótesis fue positiva y concluyente. La investigación confirmó que es posible desarrollar un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica que facilite la inserción autónoma de una clavija en un agujero. Los resultados obtenidos no solo validan la hipótesis inicial, sino que también establecen una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones del autoensamblaje en diversos sistemas de ingeniería.

4.3. APORTACIÓN CIENTÍFICA

Se logró un aporte significativo al campo del autoensamblaje a escala macroscópica, centrándose en el desarrollo y la validación de una metodología para la inserción de una clavija en un agujero. A través de un enfoque teórico y experimental, se alcanzó un avance importante que no solo enriquece el conocimiento sobre el proceso de autoensamblaje, sino que también permite visualizar nuevas alternativas innovadoras (fabricación autónoma, posicionamiento mediante codificación física, aplicación de fuerzas de campo o estímulos externos sin contacto directo sobre las partes de un ensamblaje, ajuste de sistemas inherentemente estocásticos mediante métodos de diseño de experimentos probabilísticos) para la solución de diversos problemas dentro de la ingeniería. Este proceso promete minimizar la intervención humana y optimizar recursos, lo que representa un avance significativo en la autonomía de procesos de ensamblaje. El banco experimental diseñado y fabricado permite estudiar el proceso de autoensamblaje de manera controlada, es crucial para validar la metodología propuesta y proporciona un entorno para futuros trabajos de investigación. El uso del modelo de regresión logística binaria para el análisis estadístico del proceso de autoensamblaje se puede extrapolar a otros problemas de ingeniería que requieren un enfoque similar para modelar y predecir el comportamiento de sistemas complejos, contribuyendo así al desarrollo de estrategias más efectivas en el diseño y la implementación de procesos. Los resultados obtenidos ofrecen nuevas oportunidades para la investigación y la implementación de procesos autónomos y eficientes, abriendo la puerta a futuras investigaciones que sigan explorando las posibilidades del autoensamblaje en diversas disciplinas. La dirección de la tesis de licenciatura durante la investigación también se considera una aportación significativa, ya que fomenta el desarrollo de nuevos recursos humanos en el campo de la ingeniería. Este proceso de mentoría no solo transmite conocimientos técnicos, sino que también estimula el interés en la investigación y la innovación, formando profesionales capacitados para enfrentar los desafíos actuales y futuros en ingeniería.

4.4. CONCLUSIONES

- Mediante el estudio teórico-experimental detallado del estado del arte en dos áreas principales: la tarea de inserción de clavija en agujero y el proceso de autoensamblaje, se proporcionó una base sólida y comprensión de los principios fundamentales necesarios para desarrollar un proceso de autoensamblaje efectivo para la inserción de clavija en agujero a escala macroscópica.
- Se realizó un exhaustivo análisis de las implementaciones físicas de autoensamblaje a escala macroscópica logradas a lo largo del tiempo, detallando sus características.

Este estudio fue crucial para adquirir el máximo conocimiento práctico posible, lo que permitió diseñar y construir el banco experimental propuesto. Gracias a esta profunda comprensión de sistemas físicos ya implementados, se pudo implementar un sistema capaz de insertar una clavija en un agujero de manera autónoma, aprovechando los principios del autoensamblaje.

- Se replicaron dos implementaciones físicas del proceso de autoensamblaje mediante ingeniería inversa. Este esfuerzo permitió identificar las dificultades inherentes a la manufactura de sistemas de autoensamblaje y su adecuado funcionamiento.
- Se delinearon las características que favorecen la inserción de una clavija en su agujero mediante autoensamblaje. Este proceso requiere un enfoque de diseño completamente nuevo, donde los componentes, sometidos a perturbaciones externas, realizan la tarea de manera autónoma bajo restricciones predefinidas (codificación física del proceso). Este enfoque innovador demanda un proceso mental complejo y diferente al diseño tradicional, reflejando la novedad y los desafíos del autoensamblaje.
- Se logró implementar físicamente un banco experimental capaz de realizar la inserción de clavijas de diferentes alturas en agujeros mediante un proceso de autoensamblaje a escala macroscópica. Las pruebas experimentales preliminares confirmaron la validez de la hipótesis planteada, demostrando que la correcta sincronización de los elementos del autoensamblaje permite realizar la tarea de manera autónoma y eficaz.
- Abordar el proceso de autoensamblaje como alternativa en el ámbito de la ingeniería mecánica abre nuevas posibilidades para mejorar la ejecución de diversas tareas y procesos de ensamblaje. Aunque la investigación se centra en la inserción de una clavija en un agujero, el conocimiento adquirido se puede extrapolar a otros casos de ensamblaje, demostrando el potencial del autoensamblaje como un proceso eficiente y replicable inspirado en la naturaleza.
- La convergencia de desarrollos científicos y de ingeniería actualmente permite explorar nuevas alternativas para abordar tareas y procesos. El autoensamblaje, un proceso multidisciplinario, presenta desafíos significativos en su implementación física. A pesar de estas dificultades, su potencial es ampliamente reconocido en diversos campos, incluso como una alternativa única de fabricación en situaciones extremas, como en nanotecnología para la creación de sistemas diminutos, o en entornos adversos como grandes alturas, profundidades marítimas y el espacio. Dada esta perspectiva, es crucial continuar investigando el autoensamblaje, enfocándose en casos específicos y desafiantes en diferentes campos de la ciencia y la ingeniería. En particular, la ingeniería mecánica se beneficiará enormemente al explorar nuevas aplicaciones y optimizar procesos mediante el autoensamblaje, promoviendo así avances significativos y soluciones innovadoras.
- Las pautas generales para diseñar un experimento fueron empleadas satisfactoriamente para analizar estadísticamente el banco experimental de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones. Esto permitió un análisis robusto y detallado de los factores influyentes en el proceso.

- Para el banco experimental de autoensamblaje se estudiaron factores relevantes para la respuesta de inserción, obteniendo que los factores estadísticamente significativos para la respuesta deseada entre el grupo estudiado son: frecuencia, voltaje, altura de la clavija y (_____). Estos factores tienen un impacto directo en la probabilidad de éxito de la inserción.
- Debido a la respuesta dicotómica de la inserción, se empleó el método de análisis de regresión logística binaria, permitiendo predecir de manera adecuada la probabilidad de inserción para las diferentes configuraciones posibles de los factores o predictores. Esto facilitó la identificación de combinaciones óptimas de factores para maximizar la probabilidad de inserción.
- El porcentaje de error obtenido entre la probabilidad de inserción predicha por el modelo de regresión logística binaria estuvo por debajo del 12% con respecto al resultado real de autoensamblaje realizado mediante 30 corridas de prueba del ajuste. Este nivel de precisión es adecuado para los propósitos del estudio y valida la eficacia del modelo.
- Basado en el conocimiento general del banco experimental diseñado y el análisis estadístico, se encontró el óptimo global del proceso para los rangos de funcionamiento del autoensamblaje planteado. Esto asegura que el proceso puede ser operado en condiciones óptimas para maximizar la eficiencia de la inserción.
- Se observa de manera visual la correlación de los resultados estadísticos con el funcionamiento autónomo y estocástico del autoensamblaje de clavija en agujero mediante el código de detección desarrollado para el seguimiento de trayectorias. Esto permite una comprensión amplia del funcionamiento del banco experimental y el análisis detallado de cómo ocurre la inserción mediante autoensamblaje, adicionalmente a la respuesta deseada.
- Durante la ejecución de las corridas experimentales, se observó que las distintas configuraciones produjeron resultados variados en la inserción. La variación en la configuración de los factores afectó el agujero en el que se lograba la inserción, lo que sugiere que es necesario investigar las configuraciones óptimas para controlar con precisión el agujero de inserción. Además, se logró insertar clavijas con alturas equivalentes a su diámetro y a tres veces su diámetro, dentro de los rangos de factores estudiados. Sin embargo, no se consiguió insertar clavijas con alturas equivalentes a dos veces su diámetro con los niveles estudiados en esta investigación. En conclusión, parece que para cada tipo de clavija existe una configuración específica en el banco experimental que puede lograr la inserción deseada. Al igual que en los métodos tradicionales de inserción de diferentes alturas de clavija, cada configuración requiere parámetros detallados para asegurar un ensamblaje exitoso.
- Para los tiempos de inserción obtenidos se estudió si existe diferencia estadística entre el tiempo de inserción medio para clavijas con altura en nivel bajo (-1) y alto (1), encontrando que sí existe evidencia de diferencia estadística entre las medias de los tiempos de inserción con respecto a la altura de la clavija. Este hallazgo es crucial para ajustar el proceso de ensamblaje en función de la altura de las clavijas.
- Debido a la naturaleza aleatoria y autónoma del proceso, lograr un ajuste perfecto para la respuesta deseada resulta desafiante. A pesar de que la probabilidad calculada

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

para las diferentes configuraciones permite predecir con bastante precisión la respuesta de inserción en el proceso y el diseño del banco experimental, siempre habrá errores significativos. Estos errores se manifiestan cuando la inserción no ocurre a pesar de una alta probabilidad predicha, o cuando el azar produce una inserción cuando la probabilidad esperada es baja. Esta variabilidad es una característica inherente de los procesos de autoensamblaje y debe ser considerada al evaluar y mejorar el sistema.

- El banco experimental propuesto permite analizar el proceso de autoensamblaje de clavija en agujero en tres dimensiones, controlando adecuadamente varios factores del diseño. Sin embargo, existe potencial para mejorar el banco experimental al incorporar el control de factores adicionales, con el objetivo de alcanzar una mayor precisión en el ajuste del proceso. Este banco experimental representa un primer acercamiento al autoensamblaje para resolver un problema complejo dentro de la ingeniería mecánica. Aunque se ha logrado una resolución satisfactoria del problema planteado en esta investigación, no se sugiere que el proceso actual sea la única solución posible ni que no haya margen para mejoras. La flexibilidad en los enfoques y desarrollos es una característica esencial de la metodología de autoensamblaje. El banco experimental y la metodología desarrollada son una solución innovadora que ha sido planteada, probada y analizada con éxito, pero siempre existe la oportunidad de explorar y mejorar aún más el proceso.
- Los resultados han demostrado una manera de abordar el problema planteado en el campo del autoensamblaje, proporcionando posiblemente resultados en ensamblajes más complejos.
- Los resultados obtenidos tienen aplicaciones prácticas en la industria, donde el ensamblaje de componentes pequeños es crucial. La metodología desarrollada puede ser adaptada para optimizar otros procesos de ensamblaje.

4.5. TRABAJO FUTURO

- La implementación de algoritmos de control más avanzados basados en los resultados de este estudio podría mejorar aún más la precisión y eficiencia del autoensamblaje.
- Futuras investigaciones podrían explorar nuevas variables que no fueron consideradas en este estudio, como la fricción y la tolerancia de las piezas, para obtener un control más preciso del proceso de ensamblaje.
- La integración de técnicas de machine learning para ajustar y predecir parámetros del autoensamblaje puede proporcionar una optimización continua del proceso, adaptándose a variaciones en tiempo real. Al mismo tiempo, la implementación de variaciones aleatorias en los niveles de diseño experimental durante el proceso permitirá explorar una gama más amplia de comportamientos y superar estados intermedios no deseados. Este enfoque dinámico y adaptativo puede mejorar significativamente la probabilidad de inserción y la eficiencia del autoensamblaje, ofreciendo una solución más robusta y flexible.

- Evaluar la sostenibilidad del proceso de autoensamblaje, considerando aspectos como el consumo de energía y la durabilidad de las piezas ensambladas, podría ser una dirección valiosa para la investigación futura.
- Explorar el uso de la metodología propuesta en esta investigación para desarrollar sistemas de autoensamblaje destinados a tareas distintas a la inserción de clavija en agujero debe ser un objetivo continuo. Esta línea de investigación contribuirá al avance del conocimiento y fomentará la expansión y adopción de alternativas de construcción innovadoras en diversas áreas.
- Para optimizar el proceso de autoensamblaje y aumentar la precisión del sistema, se puede explorar una mejora significativa en el sistema de detección de trayectorias mediante la incorporación de sensores avanzados, como cámaras de alta resolución, sensores de proximidad láser y sistemas de visión por computadora, para capturar datos detallados sobre el movimiento y la ubicación de los componentes en el proceso de ensamblaje.
- En el sistema de autoensamblaje diseñado y construido, los componentes actualmente actúan de manera pasiva, siendo la perturbación que induce el movimiento, realizada por sistemas externos al componente. Sin embargo, como se discutió en esta investigación, existe una oportunidad significativa para avanzar en el diseño y la implementación de componentes activos. Estos componentes activos serían capaces de generar la perturbación necesaria para su propio movimiento aleatorio internamente, sin depender de sistemas externos.
- Para avanzar en el proceso de autoensamblaje y optimizar su aplicación en la inserción de clavijas en agujeros, se propone la implementación de componentes fabricados con una variedad de materiales. Este enfoque permitirá evaluar el impacto de diferentes materiales en la precisión y viabilidad del autoensamblaje propuesto, proporcionando valiosa información sobre sus capacidades y limitaciones.
- Explorar simulaciones del proceso de autoensamblaje podría reducir el tiempo de ejecución experimental y acelerar la obtención de datos. Utilizar herramientas de simulación permitiría identificar mejoras y fallas en el diseño actual, optimizar cambios en componentes y materiales, y reducir costos asociados con pruebas físicas.

REFERENCIAS

- [1] S. Tibbits, “Design to Self-Assembly,” *Architectural Design*, vol. 82, no. 2, pp. 68–73, 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/ad.1381>.
 - [2] M. Jilek, M. Kulich, and L. Preucil, “Centimeter-scaled Self-assembly : A Preliminary Study,” in *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - ICINCO*, 2020, pp. 438–445, doi: <https://doi.org/10.5220/0009830104380445>.
 - [3] T. A. G. Hageman, P. A. Löthman, M. Dirnberger, M. C. Elwenspoek, A. Manz, and L. Abelman, “Macroscopic equivalence for microscopic motion in a turbulence driven three-dimensional self-assembly reactor,” *Journal of Applied Physics*, vol. 123, no. 2, pp. 1–10, 2018, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5007029>.
 - [4] P. A. Löthman *et al.*, “A Thermodynamic Description of Turbulence as a Source of Stochastic Kinetic Energy for 3D Self-Assembly,” *Advanced Materials Interfaces*, vol. 7, no. 5, pp. 1–11, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201900963>.
 - [5] M. Jílek, M. Somr, M. Kulich, J. Zeman, and L. Přeucil, “Towards a Passive Self-Assembling Macroscale Multi-Robot System,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 7293–7300, 2021, doi: [10.1109/LRA.2021.3096748](https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3096748).
 - [6] S. Tibbits, “From Automated to Autonomous Assembly,” *Architectural Design*, vol. 87, no. 4, pp. 6–15, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/ad.2189>.
 - [7] L. Abelman, T. A. G. Hageman, P. A. Löthman, M. Mastrangeli, and M. C. Elwenspoek, “Three-dimensional self-assembly using dipolar interaction,” *Science Advances*, vol. 6, no. 19, pp. 1–4, 2020, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2007>.
 - [8] K. Nakajima, A. M. T. Ngouabeu, S. Miyashita, M. Göldi, R. M. Fuchslin, and R. Pfeifer, “Morphology-induced collective behaviors: Dynamic pattern formation in water-floating elements,” *PLoS ONE*, vol. 7, no. 6, pp. 1–15, 2012, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037805>.
 - [9] N. Bhalla, D. Ipparhi, E. Klemp, and M. Dorigo, “A geometrical approach to the incompatible substructure problem in parallel self-assembly,” in *Bartz-Beielstein, T., Branke, J., Filipič, B., Smith, J. (eds) Parallel Problem Solving from Nature – PPSN XIII. PPSN 2014. Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8672, no. 1, pp. 751–760, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10762-2_74.
 - [10] N. Bhalla and P. J. Bentley, “Programming Self-Assembling Systems via Physically Encoded Information,” in *Doursat, R., Sayama, H., Michel, O. (eds) Morphogenetic Engineering. Understanding Complex Systems. Springer, Berlin, Heidelberg*, 2012, pp. 157–188, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33902-8_7.
 - [11] S. Papadopoulou, Athina; Laucks, Jared; Tibbits, “From Self-Assembly To Evolutionary Structures,” *Architectural Design*, vol. 87, no. 4, pp. 28–37, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/ad.2192>.
 - [12] A. Hafez, Q. Liu, and J. C. Santamarina, “Self-assembly of millimeter-scale magnetic particles in suspension,” *Soft Matter*, vol. 17, no. 29, pp. 6935–6941, 2021, doi: <https://doi.org/10.1039/D1SM00588J>.
 - [13] N. Vandewalle, M. Poty, N. Vanesse, J. Caprasse, T. Defize, and C. Jérôme, “Switchable
- Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

self-assembled capillary structures,” *Soft Matter*, vol. 16, no. 45, pp. 10320–10325, 2020, doi: <https://doi.org/10.1039/d0sm01251c>.

- [14] A. Hachohen, I. Hanniel, Y. Nikulshin, S. Wolfus, A. Abu-Horowitz, and I. Bachelet, “Meshing complex macro-scale objects into self-assembling bricks,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2015, doi: <https://doi.org/10.1038/srep12257>.
- [15] K. Kimura, T. Okuyama, T. Okano, and H. Suzuki, “Selective bonding method for self-assembly of heterogeneous components using patterned surfaces,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 279, no. 15, pp. 306–312, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.001>.
- [16] Y. Liu *et al.*, “Self-Assembly at a Macroscale Using Aerodynamics,” *Applied Sciences-basel*, vol. 12, no. 15, pp. 1–12, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12157676>.
- [17] T. Okuyama, T. Hikida, T. Okano, and H. Suzuki, “Selective self-assembly of three-component system based on hydrophilic/hydrophobic patterning,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 312, p. 112143, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112143>.
- [18] N. Bhalla, P. J. Bentley, P. D. Vize, and C. Jacob, “Staging the Self-Assembly Process: Inspiration from Biological Development,” *Artificial Life*, vol. 20, no. 1, pp. 29–53, 2014, doi: https://doi.org/10.1162/ARTL_a_00095.
- [19] B. Haghighat, M. Mastrangeli, G. Mermoud, F. Schill, and A. Martinoli, “Fluid-mediated stochastic self-assembly at centimetric and sub-millimetric scales: Design, modeling, and control,” *Micromachines*, vol. 7, no. 8, pp. 1–23, 2016, doi: [10.3390/mi7080138](https://doi.org/10.3390/mi7080138).
- [20] M. Jilek, K. Stranska, M. Somr, M. Kulich, J. Zeman, and L. Preucil, “Self-Stabilizing Self-Assembly,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 9763–9769, 2022, doi: [10.1109/LRA.2022.3191795](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3191795).
- [21] D. Ipparhi, A. Winslow, M. Sitti, M. Dorigo, and M. Mastrangeli, “Yield prediction in parallel homogeneous assembly,” *Soft Matter*, vol. 13, no. 41, pp. 7595–7608, 2017, doi: <https://doi.org/10.1039/C7SM01189J>.
- [22] M. Grünwald, S. Tricard, G. M. Whitesides, and P. L. Geissler, “Exploiting non-equilibrium phase separation for self-assembly,” *Soft Matter*, vol. 12, no. 5, pp. 1517–1524, 2016, doi: <https://doi.org/10.1039/c5sm01922b>.
- [23] I. O’Hara *et al.*, “Self-assembly of a swarm of autonomous boats into floating structures,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 1234–1240, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907011>.
- [24] M. Poty, G. Lumay, and N. Vandewalle, “Customizing mesoscale self-assembly with three-dimensional printing,” *New Journal of Physics*, vol. 16, no. 2, p. 23013, 2014, doi: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/2/023013>.
- [25] J. Metzmacher, M. Poty, G. Lumay, and N. Vandewalle, “Self-assembly of smart mesoscopic objects,” *European Physical Journal E*, vol. 40, no. 108, pp. 1–6, 2017, doi: <https://doi.org/10.1140/epje/i2017-11599-y>.
- [26] L. S. Penrose and R. Penrose, “A self-reproducing Analogue,” *Nature*, vol. 179, no. 4571, p. 1183, 1957, doi: <https://doi.org/10.1038/1791183a0>.
- [27] S. Tibbits, “The self-assembly line,” in *Proceedings of the 32nd Annual Conference of*

the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 2012, pp. 365–372, doi: <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2012.365>.

- [28] M. Boncheva and G. M. Whitesides, “Making Things by Self-Assembly,” *MRS Bulletin*, vol. 30, no. 10, pp. 736–742, 2005, doi: <https://doi.org/10.1557/mrs2005.208>.
- [29] C. J. Barnes, G. F. Dagleish, G. E. M. Jared, H. Mei, and K. G. Swift, “Assembly oriented design,” in *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP’99) (Cat. No.99TH8470)*, Porto, Portugal, 1999, pp. 45–50, doi: <https://doi.org/10.1109/isatp.1999.782933>.
- [30] G. Boothroyd and L. Alting, “Design for Assembly and Disassembly,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 625–636, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63249-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63249-1).
- [31] A. Redford, “Design for assembly,” *Design Studies*, vol. 4, no. 3, pp. 170–176, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0142-694X\(83\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0142-694X(83)90026-1).
- [32] G. Boothroyd, “Design for Assembly- The Key to Design for Manufacture,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 3–11, 1987, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02601481>.
- [33] G. M. Whitesides and B. Grzybowski, “Self-assembly at all scales,” *Science*, vol. 295, no. 5564, pp. 2418–2421, 2002, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1070821>.
- [34] X. Yang, R. Tan, H. Lu, and Y. Shen, “Magnetic-Directed Manipulation and Assembly of Fragile Bioartificial Architectures in the Liquid-Liquid Interface,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 5, pp. 3590–3600, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3136639>.
- [35] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2010.
- [36] G. Formentini, N. Boix Rodríguez, and C. Favi, “Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: a systematic literature review,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, pp. 4307–4334, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08837-6>.
- [37] J. Xu, Z. Hou, Z. Liu, and H. Qiao, “Compare Contact Model-based Control and Contact Model-free Learning: A Survey of Robotic Peg-in-hole Assembly Strategies,” *arXiv*, 2019, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05240>.
- [38] W. Li, H. Cheng, C. Li, and X. Zhang, “Robotic assembly for irregular shaped peg-in-hole with partial constraints,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, p. 7394, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11167394>.
- [39] K. Nottensteiner, A. Sachtler, and A. Albu-Schäffer, “Towards Autonomous Robotic Assembly: Using Combined Visual and Tactile Sensing for Adaptive Task Execution,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 101, no. 49, pp. 1–22, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01303-z>.
- [40] V. Nguyen and J. Marvel, “Evaluation of Robot Degradation on Human-Robot Collaborative Performance in Manufacturing,” *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 23–36, 2022, doi: <https://doi.org/10.1520/SSMS20210036>.
- [41] H. Lee, S. Park, K. Jang, S. Kim, and J. Park, “Contact State Estimation for Peg-in-Hole

Assembly Using Gaussian Mixture Model,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 3349–3356, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3146949>.

- [42] Z. Jia, A. Bhatia, R. M. Aronson, D. Bourne, and M. T. Mason, “A Survey of Automated Threaded Fastening,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 298–310, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2835382>.
- [43] M. E. Caine, “Chamferless Assembly of Rectangular Parts in Two and Three Dimensions,” S.M. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, 1985.
- [44] J. A. Pelesko, *Self assembly: The science of things that put themselves together*, 1st Ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2007.
- [45] Michael Rubenstein, Alejandro Cornejo, and Radhika Nagpal, “Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm,” *Science*, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, 2014, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1254295>.
- [46] K. Hosokawa, I. Shimoyama, and H. Miura, “Two-dimensional micro-self-assembly using the surface tension of water,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 57, no. 2, pp. 117–125, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)80102-1](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)80102-1).
- [47] D. J. Campbell, E. R. Freidinger, J. M. Hastings, and M. K. Querns, “Spontaneous assembly of soda straws,” *Journal of Chemical Education*, vol. 79, no. 2, pp. 201–202, 2002, doi: <https://doi.org/10.1021/ed079p201>.
- [48] G. Aggarwal, Q. Cheng, M. H. Goldwasser, M. Kao, P. Espanes, and R. T. Schweller, “Complexities for Generalized Models of Self-Assembly,” *SIAM Journal on Computing*, vol. 34, no. 6, pp. 1493–1515, 2005, doi: <https://doi.org/10.1137/S0097539704445202>.
- [49] J. H. Reif, S. Sahu, and P. Yin, “Complexity of graph self-assembly in accretive systems and self-destructible systems,” *Theoretical Computer Science*, vol. 412, no. 17, pp. 1592–1605, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2010.10.034>.
- [50] M. Fialkowski, K. J. M. Bishop, R. Klajn, S. K. Smoukov, C. J. Campbell, and B. A. Grzybowski, “Principles and implementations of dissipative (dynamic) self-assembly,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 6, pp. 2482–2496, 2006, doi: <https://doi.org/10.1021/jp054153q>.
- [51] A. Masumori and H. Tanaka, “Morphological computation on two dimensional self-Assembly system,” in *ACM SIGGRAPH 2013 Posters (SIGGRAPH ’13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 25, 2013, p. 1, doi: <https://doi.org/10.1145/2503385.2503412>.
- [52] S. K. Kulkarni, *Nanotechnology: Principles and Practices*, 3rd ed. New York: Springer, 2015.
- [53] R. Gross and M. Dorigo, “Self-assembly at the macroscopic scale,” in *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96, no. 9, pp. 1490–1508, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927352>.
- [54] N. Bhalla, “Designing Self-Assembling Systems Via Physically Encoded Information,” Thesis for the degree of doctor of philosophy, University of Calgary, 2011.
- [55] L. S. Penrose, “Mechanics of Self-Reproduction,” *Annals of human genetics*, vol. 23, no. 1, pp. 59–72, 1958, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1958.tb01442.x>.

- [56] S. Murata, H. Kurokawa, and S. Kokaji, "Self- Assembling Machine," in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, CA, USA, 1994*, pp. 441–448, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351257>.
- [57] K. Hosokawa, I. Shimoyama, and H. Miura, "Dynamics of Self-Assembling Systems : Analogy with Chemical Kinetics," *Artificial Life*, vol. 1, no. 4, pp. 413–427, 1994, doi: <https://doi.org/10.1162/artl.1994.1.4.413>.
- [58] J. Breivik, "Self-organization of template-replicating polymers and the spontaneous rise of genetic information," *Entropy*, vol. 3, no. 4, pp. 273–279, 2001, doi: <https://doi.org/10.3390/e3040273>.
- [59] N. B. Bowden, M. Weck, I. S. Choi, and G. M. Whitesides, "Molecule-mimetic chemistry and mesoscale self-assembly," *Accounts of Chemical Research*, vol. 34, no. 3, pp. 231–238, 2001, doi: <https://doi.org/10.1021/ar0000760>.
- [60] R. F. Ismagilov, A. Schwartz, N. Bowden, and G. M. Whitesides, "Autonomous movement and self-assembly," *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 41, no. 4, pp. 652–654, 2002, doi: [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020215\)41:4<652::AID-ANIE652>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020215)41:4<652::AID-ANIE652>3.0.CO;2-U).
- [61] N. Bhalla, P. J. Bentley, and C. Jacob, "Mapping Virtual Self-assembly Rules to Physical Systems," 2007, pp. 167–198.
- [62] D. Tsutsumi and S. Murata, "Multistate part for mesoscale self-assembly," in *SICE Annual Conference 2007, Takamatsu, Japan, 2007*, pp. 890–895, doi: <https://doi.org/10.1109/SICE.2007.4421110>.
- [63] S. B. Shetye, I. Eskinazi, and D. P. Arnold, "Self-assembly of millimeter-scale components using integrated micromagnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4293–4296, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001344>.
- [64] S. Miyashita, M. Kessler, and M. Lungarella, "How morphology affects self-assembly in a stochastic modular robot," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008*, pp. 3533–3538, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543751>.
- [65] S. Miyashita, Z. Nagy, B. J. Nelson, and R. Pfeifer, "The influence of shape on parallel self-assembly," *Entropy*, vol. 11, no. 4, pp. 643–666, 2009, doi: <https://doi.org/10.3390/e11040643>.
- [66] N. Bhalla, P. J. Bentley, and C. Jacob, "Evolving physical self-assembling systems in two-dimensions," in *Tempesti, G., Tyrrell, A.M., Miller, J.F. (eds) Evolvable Systems: From Biology to Hardware. ICES 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6274. Springer, Berlin, Heidelberg., 2010*, pp. 381–392, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15323-5_33.
- [67] M. T. Tolley and H. Lipson, "Fluidic manipulation for scalable stochastic 3D assembly of modular robots," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010*, pp. 2473–2478, doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509664>.
- [68] M. T. Tolley and H. Lipson, "Programmable 3D stochastic fluidic assembly of cm-scale modules," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011*, pp. 4366–4371, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6048820>.
- [69] S. Miyashita, M. Göldi, and R. Pfeifer, "How reverse reactions influence the yield of

self-assembly robots,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 5, pp. 627–641, 2011, doi: <https://doi.org/10.1177/0278364910393288>.

- [70] K. A. Mirica, F. Ilievski, A. K. Ellerbee, S. S. Shevkoplyas, and G. M. Whitesides, “Using magnetic levitation for three dimensional self-assembly,” *Advanced Materials*, vol. 23, no. 36, pp. 4134–4140, 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201101917>.
- [71] F. Ilievski, K. A. Mirica, A. K. Ellerbee, and G. M. Whitesides, “Templated self-assembly in three dimensions using magnetic levitation,” *Soft Matter*, vol. 7, no. 19, pp. 9113–9118, 2011, doi: <https://doi.org/10.1039/c1sm05962a>.
- [72] N. Bhalla, P. J. Bentley, P. D. Vize, and C. Jacob, “Staging the Self-Assembly Process Using Morphological Information,” in *the ECAL 2011: The 11th European Conference on Artificial Life. ECAL 2011: The 11th European Conference on Artificial Life. Paris, France.*, 2011, p. 18, doi: <https://doi.org/10.7551/978-0-262-29714-1-ch018>.
- [73] F. Ilievski, M. Mani, G. M. Whitesides, and M. P. Brenner, “Self-assembly of magnetically interacting cubes by a turbulent fluid flow,” *Physical Review E*, vol. 83, no. 1, pp. 3–6, 2011, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.017301>.
- [74] N. Bhalla, P. J. Bentley, P. D. Vize, and C. Jacob, “Programming and evolving physical self-assembling systems in three dimensions,” *Natural Computing*, vol. 11, no. 3, pp. 475–498, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s11047-011-9293-6>.
- [75] R. Cademartiri *et al.*, “A simple two-dimensional model system to study electrostatic-self-assembly,” *Soft Matter*, vol. 8, no. 38, pp. 9771–9791, 2012, doi: <https://doi.org/10.1039/c2sm26192h>.
- [76] S. Tricard, C. A. Stan, E. I. Shakhnovich, and G. M. Whitesides, “A macroscopic device described by a Boltzmann-like distribution,” *Soft Matter*, vol. 9, no. 17, pp. 4480–4488, 2013, doi: <https://doi.org/10.1039/c3sm27385g>.
- [77] P. C. Foster, N. J. Mlot, A. Lin, and D. L. Hu, “Fire ants actively control spacing and orientation within self-assemblages,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 217, no. 12, pp. 2089–2100, 2014, doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.093021>.
- [78] L. A. Woldering, A. J. Been, L. Alink, and L. Abelmann, “Using magnetic levitation for 2D and 3D self-assembly of cubic silicon macroparticles,” *Physica Status Solidi - Rapid Research Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 176–184, 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/pssr.201510298>.
- [79] A. J. Olson, “Self-assembly gets physical,” *Nature Nanotechnology*, vol. 10, no. 8, p. 728, 2015, doi: [10.1038/nnano.2015.172](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.172).
- [80] R. Messina and I. Stanković, “Self-assembly of magnetic spheres in two dimensions: The relevance of onion-like structures,” *Epl*, vol. 110, no. 4, p. 46003, 2015, doi: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/110/46003>.
- [81] B. Haghighat and A. Martinoli, “Characterization and validation of a novel robotic system for fluid-mediated programmable stochastic self-assembly,” in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea (South)*, 2016, pp. 2778–2783, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759431>.
- [82] S. Egri and G. Bihari, “Self-assembly of magnetic spheres: a new experimental method and related theory,” *Journal of Physics Communications*, vol. 2, no. 10, p. 105003, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/2399-6528/aadfc9>.

- [83] D. Ipparthy *et al.*, “Kinetics of orbitally shaken particles constrained to two dimensions,” *Physical Review E*, vol. 98, no. 4, pp. 1–8, 2018, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.042137>.
- [84] R. Niu *et al.*, “Magnetic handshake materials as a scale-invariant platform for programmed self-assembly,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 116, no. 49, pp. 24402–24407, Dec. 2019, doi: [10.1073/pnas.1910332116](https://doi.org/10.1073/pnas.1910332116).
- [85] U. Culha, Z. S. Davidson, M. Mastrangeli, and M. Sitti, “Statistical reprogramming of macroscopic self-assembly with dynamic boundaries,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 117, no. 21, pp. 1–8, 2020, doi: [10.1073/pnas.2001272117](https://doi.org/10.1073/pnas.2001272117).
- [86] A. Hafez, Q. Liu, and J. C. Santamarina, “Self-assembly of millimeter-scale magnetic particles in suspension,” *Soft Matter*, vol. 17, no. 29, pp. 6935–6941, 2021, doi: [10.1039/D1SM00588J](https://doi.org/10.1039/D1SM00588J).
- [87] M. Nisser, Y. Makaram, F. Faruqi, R. Suzuki, and S. Mueller, “Selective Self-Assembly using Re-Programmable Magnetic Pixels,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022, pp. 12659–12666, doi: <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981879>.
- [88] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, 2a.ed. México: Limusa Wiley, 2004.
- [89] J. R. Wilson and K. A. Lorenz, “Introduction to Binary Logistic Regression BT - Modeling Binary Correlated Responses using SAS, SPSS and R,” J. R. Wilson and K. A. Lorenz, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 3–16.
- [90] D. W. Hosmer, S. Lemeshow, and R. X. Sturdivant, *Applied Logistic Regression*, 3rd Ed. Wiley, 2013.
- [91] J. Eliecer Benitez-prada, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gómez, J. M. Méndez-Hernández, and J. F. Reveles-Arredondo, “Una revisión del autoensamblaje enfocado en escala macroscópica,” *Ingenio Magno*, vol. 13, no. 2, pp. 1–13, 2022.

ANEXOS

Anexo 1. PUBLICACIONES Y ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS DEL DOCTORADO

Dentro del plan de estudios del doctorado en ingeniería mecánica de la Universidad de Guanajuato, se busca asegurar la formación integral del estudiante, fomentando el desarrollo de habilidades esenciales. Con este objetivo en mente, la investigación incluyó la presentación del tema en dos congresos internacionales, demostrando la capacidad de generación y comunicación del conocimiento ante pares. Asimismo, se publicó un artículo en una revista arbitrada de divulgación científica.

Además, se dirigió una tesis de licenciatura, comprobando la capacidad de formar nuevos recursos humanos. A este nivel, la dirección de tesis no solo implica la transmisión de conocimientos, sino también la mentoría integral del estudiante asesorado, fomentando su capacidad para investigar, desarrollar innovaciones y promover la creatividad. Este proceso, además, motiva el interés académico del estudiante y contribuye a la construcción de una base sólida para su futura carrera en investigación y desarrollo.

Finalmente, el conocimiento básico necesario para el desarrollo del trabajo de investigación fue reforzado mediante un curso optativo tomado durante el periodo de estudio. A continuación, se presentan las actividades mencionadas con sus respectivas constancias.



a)



b)

Figura A1. Disertación en congresos, certificados otorgados en calidad de ponente: a) congreso internacional de investigación, innovación y divulgación científica: perspectivas disruptivas de la Universidad Señor de Sipán, Perú; b) III congreso internacional de ingeniería mecánica – COIIM 2022, Perú.

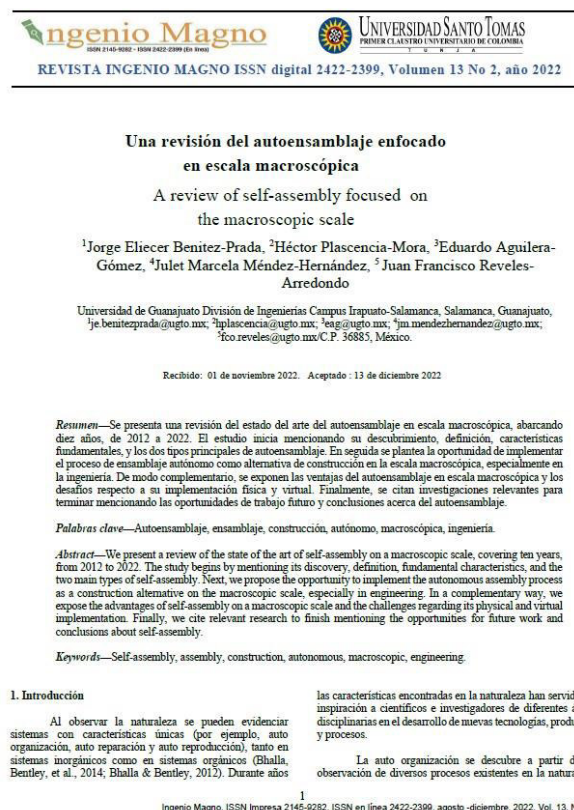


Figura A2. Artículo de divulgación científica: “Una revisión del autoensamblaje enfocado en escala macroscópica” [91], publicado en la revista Ingenio Magno de la Universidad Santo Tomas, Colombia, 2022.



Figura A3. Dirección de tesis de licenciatura: notificación de registro de trabajo de tesis de licenciatura bajo la asesoría del Dr. Héctor Plascencia Mora y el M. EN. I. Jorge Eliecer Benitez Prada, 2023.



Figura A4. Curso optativo: constancia de calificación de curso optativo: "Diseño de experimentos y probabilístico" tomado en la Universidad de Guanajuato, para el aseguramiento del conocimiento básico necesario para el desarrollo del proyecto de tesis, 2023.

Anexo 2. MATRIZ DE DISEÑO, ORDEN ALEATORIZADO Y RESPUESTA DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Tabla A1. Matriz de diseño para el experimento factorial fraccionado a la mitad.

	Frecuencia	Voltaje	Altura	()	()	()
#	A	B	C	D	E	F=ABCDE
1	1	1	-1	-1	1	1
2	1	1	1	1	-1	-1
3	1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7	1	-1	1	1	1	-1
8	-1	-1	-1	1	-1	1
9	1	-1	-1	1	1	1
10	-1	1	1	1	1	-1
11	1	-1	-1	-1	-1	1
12	-1	1	1	1	-1	1
13	1	-1	1	1	-1	1
14	-1	1	1	-1	-1	-1
15	1	-1	-1	1	-1	-1
16	1	1	-1	-1	-1	-1
17	-1	-1	1	1	1	1
18	1	1	-1	1	1	-1
19	-1	1	-1	-1	1	-1
20	1	-1	-1	-1	1	-1
21	-1	1	-1	1	1	1
22	1	-1	1	-1	-1	-1
23	-1	-1	-1	1	1	-1
24	-1	1	-1	-1	-1	1
25	1	1	-1	1	-1	1
26	-1	-1	1	-1	1	-1
27	-1	-1	1	-1	-1	1
28	-1	-1	-1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	-1	-1
30	-1	1	1	-1	1	1
31	1	-1	1	-1	1	1
32	-1	1	-1	1	-1	-1

Tabla A2. Orden aleatorizado de las corridas para la realización del experimento factorial fraccionado a la mitad.

	Frecuencia	Voltaje	Altura	()	()	()	Respuesta
#	A	B	C	D	E	F	inserción
1	1	1	-1	-1	1	1	0
2	1	1	1	1	-1	-1	0
3	1	1	1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	-1	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
7	1	-1	1	1	1	-1	0
8	-1	-1	-1	1	-1	1	0
9	1	-1	-1	1	1	1	0
10	1	1	1	-1	-1	1	0
11	-1	1	1	1	1	-1	0
12	-1	1	1	1	1	-1	0
13	1	-1	-1	-1	-1	1	0
14	-1	1	1	1	-1	1	0
15	-1	1	1	1	1	-1	0
16	1	-1	1	1	-1	1	0
17	-1	1	1	-1	-1	-1	0
18	1	-1	-1	1	-1	-1	0
19	1	1	1	-1	-1	1	1
20	1	1	-1	-1	-1	-1	0
21	-1	-1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	-1	-1	1	0
23	-1	-1	1	1	1	1	0
24	1	1	-1	1	1	-1	1
25	1	1	-1	-1	-1	-1	0
26	-1	1	-1	-1	1	-1	0
27	1	-1	-1	-1	1	-1	0
28	-1	1	-1	1	1	1	1
29	1	-1	1	-1	-1	-1	0
30	1	1	-1	-1	1	1	0
31	-1	-1	-1	1	1	-1	0
32	-1	1	-1	-1	-1	1	1
33	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
34	-1	1	1	1	1	-1	0
35	-1	1	-1	-1	1	-1	1
36	1	-1	1	1	1	-1	0
37	1	1	-1	1	-1	1	0
38	-1	-1	1	-1	1	-1	0
39	1	1	-1	-1	1	1	0
40	-1	-1	1	-1	1	-1	0
41	1	1	1	-1	1	-1	0

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

42	-1	-1	-1	1	-1	1	0
43	1	-1	-1	1	-1	-1	0
44	-1	1	1	1	-1	1	1
45	1	1	-1	1	1	-1	1
46	-1	-1	1	-1	-1	1	0
47	-1	-1	-1	-1	1	1	0
48	-1	-1	1	1	-1	-1	0
49	1	-1	1	1	-1	1	0
50	-1	-1	-1	-1	1	1	1
51	1	-1	1	1	-1	1	0
52	-1	-1	-1	1	-1	1	1
53	-1	-1	1	-1	-1	1	0
54	1	1	-1	1	1	-1	0
55	-1	-1	1	1	1	1	0
56	1	-1	-1	1	-1	-1	0
57	-1	1	-1	1	1	1	1
58	-1	1	1	-1	1	1	0
59	1	-1	1	-1	1	1	0
60	-1	-1	-1	1	1	-1	1
61	-1	-1	-1	1	-1	1	0
62	-1	1	1	1	-1	1	0
63	1	-1	-1	-1	-1	1	0
64	1	1	-1	1	-1	1	1
65	-1	-1	-1	1	1	-1	0
66	-1	1	1	-1	-1	-1	0
67	1	-1	-1	-1	1	-1	0
68	1	-1	-1	-1	-1	1	0
69	-1	-1	1	-1	1	-1	0
70	-1	-1	-1	1	1	-1	0
71	1	-1	1	-1	1	1	0
72	-1	1	1	1	-1	1	1
73	-1	1	-1	1	-1	-1	0
74	-1	1	1	-1	1	1	0
75	-1	1	1	-1	1	1	0
76	1	-1	1	1	1	-1	0
77	-1	-1	1	-1	1	-1	0
78	1	1	1	-1	1	-1	0
79	-1	-1	-1	-1	1	1	1
80	1	1	-1	1	-1	1	1
81	1	1	1	1	1	1	0
82	-1	1	1	-1	1	1	0
83	1	-1	-1	-1	1	-1	0
84	-1	-1	-1	-1	1	1	0

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

85	1	-1	1	-1	1	1	0
86	1	-1	-1	-1	1	-1	0
87	1	1	1	1	1	1	0
88	1	1	-1	1	1	-1	1
89	-1	1	-1	1	1	1	0
90	1	1	1	1	-1	-1	0
91	-1	1	-1	-1	-1	1	0
92	-1	-1	1	1	1	1	1
93	1	-1	1	-1	-1	-1	0
94	1	1	1	1	1	1	0
95	-1	1	-1	1	1	1	0
96	-1	1	-1	-1	-1	1	0
97	1	-1	-1	-1	1	-1	0
98	1	1	1	-1	1	-1	0
99	-1	-1	-1	1	1	-1	0
100	1	-1	1	-1	1	1	0
101	1	-1	-1	1	1	1	0
102	1	1	-1	1	-1	1	0
103	1	-1	1	-1	-1	-1	0
104	1	-1	-1	1	-1	-1	0
105	1	-1	1	1	1	-1	0
106	-1	-1	1	-1	-1	1	0
107	-1	1	1	1	1	-1	0
108	-1	-1	1	-1	-1	1	0
109	1	1	-1	-1	-1	-1	0
110	-1	-1	1	1	-1	-1	0
111	-1	-1	1	1	1	1	0
112	1	-1	1	1	-1	1	0
113	1	1	1	-1	1	-1	0
114	-1	1	1	-1	-1	-1	0
115	1	-1	-1	1	1	1	0
116	1	-1	1	-1	-1	-1	0
117	-1	1	1	1	-1	1	0
118	1	-1	-1	-1	-1	1	0
119	1	-1	1	1	-1	1	0
120	-1	1	-1	-1	1	-1	0
121	1	1	-1	-1	1	1	0
122	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
123	1	1	-1	-1	-1	-1	0
124	-1	1	1	-1	1	1	0
125	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
126	-1	1	1	-1	-1	-1	0
127	-1	-1	-1	1	-1	1	0

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

128	-1	1	-1	-1	-1	1	0
129	-1	-1	1	1	-1	-1	1
130	-1	1	-1	-1	1	-1	0
131	1	-1	1	-1	-1	-1	0
132	-1	-1	1	-1	-1	1	0
133	-1	1	-1	1	1	1	0
134	1	-1	1	-1	1	1	0
135	1	1	1	1	-1	-1	0
136	-1	-1	-1	-1	1	1	0
137	-1	1	-1	1	-1	-1	1
138	1	1	-1	1	-1	1	0
139	1	1	-1	-1	-1	-1	0
140	1	-1	-1	1	1	1	1
141	1	-1	-1	1	-1	-1	0
142	1	1	1	1	-1	-1	1
143	1	1	-1	1	1	-1	1
144	-1	1	-1	1	-1	-1	1
145	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
146	1	1	1	1	-1	-1	0
147	1	1	1	1	1	1	0
148	-1	-1	1	-1	1	-1	0
149	-1	1	-1	-1	1	-1	0
150	1	-1	-1	-1	-1	1	0
151	-1	1	1	-1	-1	-1	1
152	1	1	1	-1	-1	1	0
153	-1	-1	1	1	-1	-1	0
154	-1	1	-1	-1	-1	1	0
155	1	-1	1	1	1	-1	0
156	-1	-1	1	1	-1	-1	1
157	-1	1	-1	1	-1	-1	1
158	1	1	-1	-1	1	1	0
159	1	-1	-1	1	1	1	0
160	-1	1	-1	1	-1	-1	1

Tabla A3. Matriz de diseño para el experimento factorial completo.

	Frecuencia	Voltaje	Altura	(_____)
#	A	B	C	D
1	-1	-1	1	1
2	-1	-1	-1	1
3	1	1	1	1
4	-1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1
7	-1	-1	1	-1
8	1	-1	1	-1
9	-1	1	-1	1
10	1	1	1	-1
11	1	-1	1	1
12	-1	1	-1	-1
13	1	-1	-1	-1
14	1	1	-1	-1
15	-1	1	1	-1
16	-1	1	1	1

Tabla A4. Orden aleatorizado de las corridas para la realización del experimento factorial completo.

	Frecuencia	Voltaje	Altura	()	Respuesta inserción
#	A	B	C	D	
1	1	-1	1	1	1
2	-1	1	-1	-1	1
3	-1	1	1	-1	0
4	1	-1	1	-1	0
5	1	1	1	-1	0
6	-1	-1	1	1	0
7	-1	-1	-1	1	0
8	-1	1	1	-1	0
9	1	1	1	-1	0
10	-1	-1	1	-1	0
11	-1	1	-1	1	1
12	-1	-1	-1	-1	0
13	1	1	1	1	1
14	1	1	-1	-1	1
15	1	-1	-1	-1	0
16	-1	1	-1	1	1
17	1	1	-1	-1	1
18	1	1	-1	1	1
19	1	-1	1	-1	0
20	1	-1	-1	1	1
21	-1	1	-1	1	1
22	1	-1	-1	1	1
23	-1	1	-1	-1	0
24	1	1	1	1	1
25	-1	-1	-1	-1	0
26	1	-1	-1	-1	0
27	1	-1	1	1	0
28	-1	1	1	1	0
29	-1	-1	-1	1	0
30	1	1	1	-1	0
31	-1	1	1	-1	0
32	1	-1	1	-1	1
33	1	-1	-1	1	1
34	-1	-1	1	-1	0
35	-1	1	1	-1	0
36	-1	1	1	1	0
37	-1	-1	1	1	0
38	-1	1	1	-1	0
39	1	1	-1	1	1
40	-1	-1	-1	1	0
41	1	1	1	1	1

Nota: La información identificada de la siguiente manera () está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.

42	-1	-1	-1	-1	0
43	1	-1	-1	1	0
44	1	1	-1	1	1
45	1	-1	1	1	0
46	-1	1	1	1	0
47	-1	1	-1	-1	0
48	-1	1	-1	1	0
49	-1	-1	1	1	0
50	-1	-1	-1	-1	0
51	-1	1	1	1	1
52	-1	-1	-1	1	0
53	1	1	1	1	1
54	-1	-1	1	1	0
55	1	-1	1	1	0
56	1	1	-1	1	1
57	1	-1	-1	-1	1
58	1	1	-1	1	1
59	-1	-1	1	1	0
60	1	-1	1	-1	0
61	1	-1	1	-1	0
62	1	-1	-1	-1	0
63	1	1	-1	-1	1
64	1	1	-1	-1	1
65	1	1	1	1	0
66	-1	-1	-1	1	0
67	1	-1	-1	1	1
68	-1	-1	-1	-1	0
69	-1	1	-1	-1	0
70	1	-1	-1	-1	0
71	-1	1	1	1	0
72	-1	-1	1	-1	0
73	-1	1	-1	-1	0
74	-1	-1	1	-1	0
75	-1	1	-1	1	0
76	1	1	-1	-1	0
77	1	1	1	-1	0
78	1	1	1	-1	0
79	1	-1	1	1	0
80	-1	-1	1	-1	0

Tabla A5. Respuesta de inserción para las corridas de validación.

	Frecuencia	Voltaje	Altura	(_____)	Respuesta inserción
#	A	B	C	D	
1	1	1	-1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	0
4	1	1	-1	1	1
5	1	1	-1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	-1	1	0
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	0
10	1	1	-1	1	1
11	1	1	-1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	-1	1	1
14	1	1	-1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	-1	1	1
17	1	1	-1	1	1
18	1	1	-1	1	1
19	1	1	-1	1	1
20	1	1	-1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1
24	1	1	-1	1	1
25	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1
30	1	1	-1	1	1

Nota: La información identificada de la siguiente manera (_____) está protegida para la versión pública, en caso de requerir la versión completa contactar al autor o los asesores mencionados en la portada.