

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO



***Modelo Accesible de Inteligencia Colectiva para la
Fabricación Automatizada de la Envolvente Arquitectónica***

T E S I S

que para obtener el grado de

DOCTOR EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

Presenta

AARÓN TADEO ONCHI RASCÓN

Director de Tesis

DR. CAMILO CARAVEO MENA

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

ENERO DEL 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

**MODELO ACCESIBLE DE INTELIGENCIA COLECTIVA PARA LA
FABRICACIÓN AUTOMATIZADA DE LA ENVOLVENTE
ARQUITECTÓNICA**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA
AARÓN TADEO ONCHI RASCÓN

Correo electrónico UABC: onchia@uabc.edu.mx

Correo personal: at.onchi@gmail.com

Identificador ORCID: [0000-0003-2167-6758](https://orcid.org/0000-0003-2167-6758)

Director de tesis: Dr. Camilo Caraveo Mena

Identificador ORCID: [0000-0001-6104-3061](https://orcid.org/0000-0001-6104-3061)

Comité tutorial:

Dr. David Abdel Mejía Medina

Identificador ORCID: [0000-0003-2860-2428](https://orcid.org/0000-0003-2860-2428)

Dr. Gonzalo Bojórquez Morales

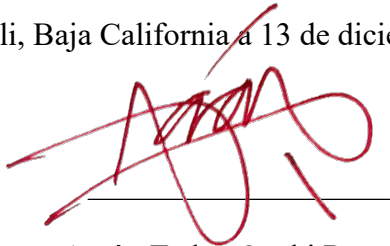
Identificador ORCID: [0000-0001-9303-9278](https://orcid.org/0000-0001-9303-9278)

Código QR vinculado al repositorio virtual del MyDAUD

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, Baja California a 13 de diciembre de 2024

A handwritten signature in red ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Aarón Tadeo Onchi Rascón

DEDICATORIA

DEDICO EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN A MI ESPOSA M.ARQ. GLORIA GABRIELA ALCARAZ ADAME POR SU INCONDICIONAL APOYO Y PORQUE SIN ELLA ESTE TRABAJO NO HUBIERA SIDO POSIBLE. TAMBIÉN A MIS PADRES Y HERMANOS, QUIENES SIEMPRE ESTUVIERON AL PENDIENTE DE ESTE DESARROLLO Y PORQUE ME BRINDARON ALIENTO PARA CULMINARLO.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS A MI DIRECTOR DE TESIS DR. CAMILO CARAVEO MENA POR EL SOPORTE Y GUÍA EN EL TRAYECTO DE ESTE TRABAJO. A MI COMITÉ TUTORIAL CONFORMADO POR EL DR. DAVID ABDEL MEJÍA MEDINA Y EL DR. GONZALO BOJÓRQUEZ MORALES POR EL IMPORTANTE APOYO RECIBIDO CON SUS ASESORÍAS, OBSERVACIONES Y CONSEJOS. A MIS SINODALES EL DR. JORGE ALBERTO CID CRUZ Y EL DR. JOSÉ FRANCISCO ARMENDARIZ LÓPEZ POR SUS RECOMENDACIONES, COMENTARIOS Y ESTAR AL TANTO DE ESTA INVESTIGACIÓN.

A LOS PROFESORES QUE ME BRINDARON CLASES, EN ESPECIAL AL DR. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA, DRA. MARLENE ZAMORA MACHADO, DRA. CRISTINA SOTELO SALAS, DRA. VERÓNICA JIMÉNEZ LÓPEZ, DR. ALEJANDRO JOSÉ PEIMBERT DUARTE, DR. GONZALO BOJÓRQUEZ MORALES Y EL DR. JORGE ALBERTO CID CRUZ POR SUS ENSEÑANZAS, INFORMACIÓN, RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS Y REFERENCIAS QUE FUERON FUNDAMENTALES ESTA REALIZACIÓN.

TAMBIÉN EXTIENDO OTRO ESPECIAL AGRADECIMIENTO AL M. JAIME ALONSO LOBATO CARDOSO DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD (C3, UNAM), Y AL DR. PABLO PADILLA LONGORIA DEL DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS Y MECÁNICA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN SISTEMAS (IIMAS, UNAM), POR SU DISPOSICIÓN PARA BRINDAR ASESORÍA Y REVISIÓN EXTERNA, ASÍ COMO POR SER ANFITRIONES EN LA ESTANCIA ACADÉMICA EFECTUADA DURANTE ESTE PROCESO. DE LA MISMA MANERA, A LA DRA. JULIA MÚGICA Y AL DR. MARTÍN ZUMAYA HERNÁNDEZ POR SU ASESORÍA EXTERNA Y APOYO CON RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS.

AL DR. OSBALDO RESENDIS-ANTONIO QUE, EN CALIDAD DE COORDINADOR ACADÉMICO DEL CENTRO DE CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD (C3) DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), ACEPTARON MI SOLICITUD Y ME RECIBIERON EN SU INSTITUCIÓN PARA EFECTUAR UNA ESTANCIA ACADÉMICA DE INVESTIGACIÓN.

AL CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES, CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS POR EL APOYO FINANCIERO PARA LA REALIZACIÓN DEL PROGRAMA DE POSGRADO EN INVESTIGACIÓN; AL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO POR LA FORMACIÓN Y SOPORTE EN EL DESARROLLO DEL PRESENTE ESTUDIO, ASÍ COMO AL COORDINADOR GENERAL DEL MYDAUD DR. LUIS JESÚS VILLARREAL GÓMEZ.

RESUMEN

**MODELO ACCESIBLE DE INTELIGENCIA COLECTIVA PARA LA FABRICACIÓN AUTOMATIZADA DE
LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA**

Los avances en la Fabricación Digital (FD) han representado una oportunidad para generar nuevas líneas de investigación en la Arquitectura. El modelo típico incorpora procesos de automatización predominantemente manejada con brazos robóticos industriales y sistemas de Control Numérico Computacional (CNC). Este modelo representó a finales del siglo XX, un cambio de paradigma en la Arquitectura; sin embargo, la literatura ha evidenciado que estos medios robóticos significan una problemática de accesibilidad tecnológica por escala, movilidad, manipulación y mantenimiento. También, esta integración de Arquitectura y Automatización puede ser complementada con Inteligencia Artificial (IA) cuando existe colectividad robótica. Esta incorporación puede significar brechas interdisciplinarias que aumentan la inaccesibilidad. Todo este escenario repercute en una problemática de asequibilidad y sostenibilidad por desventaja social y desequilibrio económico. El presente trabajo, busca elaborar un modelo de Inteligencia Colectiva que contribuya a la accesibilidad del medio tecnológico en la FD para la construcción arquitectónica. El objetivo es favorecer la colaboración multi-robótica, para minimizar su escala al momento de participar en los procesos de construcción de la envolvente arquitectónica. Centrar la investigación en este modelo tiene el potencial de reducir la problemática de accesibilidad tecnológica y de diluir las brechas interdisciplinarias existentes en la traducción de los procesos de Automatización e IA a la problemática arquitectónica.

Palabras clave: Fabricación Digital, Construcción robótica, Sistemas multi-robóticos, Inteligencia Colectiva, Diseño computacional.

ABSTRACT

ACCESSIBLE MODEL OF COLLECTIVE INTELLIGENCE FOR THE AUTOMATED MANUFACTURING
OF THE ARCHITECTURAL ENVELOPE

Advances in Digital Fabrication (DF) have represented an opportunity to generate new lines of research in Architecture. The typical model incorporates automation processes managed with industrial robotic arms and Computer Numerical Control (CNC) systems. This model represented a paradigm shift in Architecture at the end of the 20th century; however, literature has shown that these robotic means pose a problem of technological accessibility due to scale, mobility, manipulation and maintenance. Also, this integration of Architecture and Automation can be complemented with Artificial Intelligence (AI) when there is robotic collectivity. This incorporation can mean interdisciplinary gaps that increase inaccessibility. This entire scenario has an impact on affordability and sustainability due to social disadvantages and economic imbalance. This work seeks to develop a Collective Intelligence model that contributes to the accessibility of technology in DF for architectural construction. The objective is to promote multi-robotic collaboration, to minimize its scale when participating in the construction processes of the architectural envelope. Focusing research on this model has the potential to reduce the problem of technological accessibility and dilute the existing interdisciplinary gaps in the translation of Automation and AI processes to architectural problems.

Keywords: *Digital Fabrication, Robotic Construction, Multi-robotic System, Collective Intelligence, Computational Design.*

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.....		5
	Relación interdisciplinar del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la fabricación arquitectónica.....	5
FIGURA 2.....		10
	Diagrama descriptivo de las cuatro eras de la relación entre diseño y computación. 10	
FIGURA 3.....		16
	Estructura de preguntas y objetivos de investigación.....	16
FIGURA 4.....		31
	Diagrama de flujo basado en el método PRISMA (Liberati et al., 2009; Page et al., 2021) para el desarrollo de la RS.	31
FIGURA 5.....		33
	Relación de palabras clave más utilizadas: arriba diagrama “TreeMap” con representación de 30 palabras clave, abajo diagrama “WordCloud” con muestra de 100 palabras clave más investigadas en la FD.....	33
FIGURA 6.....		35
	Tendencia de tópicos más investigadas en la FD con relación al tiempo.....	35
FIGURA 7.....		36
	(a) Lista de autores (50) de mayor relevancia -arriba- y (b) redes de colaboración investigativa en la producción científica de la FD -abajo-.....	36
FIGURA 8.....		38

Lista de países (40) con mayor contribución en la producción científica de la FD.	38
FIGURA 9.....	39
Redes colaborativas entre los principales países (50) con mayor contribución en la producción científica de la FD.....	39
FIGURA 10.....	42
Resultados de la evaluación de calidad de documentos seleccionados para lectura completa.	42
FIGURA 11.....	44
Relación de enfoques en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.	45
FIGURA 12.....	47
Relación de materiales utilizados en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.	47
FIGURA 13.....	49
Relación de medios robóticos utilizados en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.....	50
FIGURA 14.....	51
Interrelación del contenido de los artículos revisados, los enfoques y los medios robóticos utilizados en el proceso de FD.	51
FIGURA 15.....	76

Enfoques de autores del grupo de artículos orientados a la “Construcción Multi Robótica e IC”.	76
FIGURA 16.....	79
Diagrama para la estructuración del Marco Teórico. Se toma como antecedente importante, las referencias metodológicas analizadas en la revisión del Estado del Arte.	79
FIGURA 17.....	94
Diagrama descriptivo de las cuatro eras de la relación entre diseño y computación.	94
FIGURA 18.....	95
El algoritmo como traductor o mediador entre el pensamiento humano y la computadora.	95
FIGURA 19.....	97
Ejemplo de algoritmo expresado en diagrama de flujo.	97
FIGURA 20.....	106
Método integrado de investigación en la Fabricación Digital (FD).	106
FIGURA 21.....	107
Pasos generales de la Fabricación Digital (FD).	107
FIGURA 22.....	108
Los tres pasos del proceso de Fabricación Digital en la Arquitectura.	108
FIGURA 23.....	119
Diagrama descriptivo de la Inteligencia Artificial y sus subconjuntos.	119

FIGURA 24.....	123
Clasificación de algoritmos metaheurísticos.....	123
FIGURA 25.....	130
Componentes de la hipótesis de investigación como directriz para el diseño metodológico.	
.....	130
FIGURA 26.....	132
Componentes del título de investigación estructurado bajo los lineamientos del diseño	
metodológico.	132
FIGURA 27.....	133
Componentes explicativos del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).....	133
FIGURA 28.....	134
Diagrama del diseño y los mecanismos de funcionamiento del modelo de Inteligencia	
Colectiva (IC). El esquema muestra la primera fase del desarrollo.....	135
FIGURA 29.....	136
Diagrama extendido de la aplicación del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) a un	
Sistema Multi-Robótico ciber-físico. El esquema muestra la primera y segunda fase del	
desarrollo.....	136
FIGURA 30.....	139
Simulación realizada a través del algoritmo de movimiento Browniano en el entorno de	
programación Processing.	139
FIGURA 31.....	141

Enfoque topológico de Craig Reynolds para el comportamiento de interacción de la Inteligencia de Enjambre.....	141
FIGURA 32.....	143
Enfoque matemático de Iain Couzin para el comportamiento de interacción de la Inteligencia de Enjambre.....	143
FIGURA 33.....	145
(a) Algoritmo de separación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.....	145
FIGURA 34.....	147
(a) Algoritmo de alineación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.....	148
FIGURA 35.....	150
(a) Algoritmo de cohesión desarrollado en el entorno de programación Processing (Java) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.....	150
FIGURA 36.....	153
Complementos algorítmicos de Grasshopper para los métodos metaheurísticos de Inteligencia de Enjambre.....	153
FIGURA 37.....	153

Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Inteligencia de Enjambre mediante Quelea.....	153
FIGURA 38.....	155
Secuencia que muestra la simulación tridimensional de los comportamientos de la Inteligencia de Enjambre con Quelea de Grasshopper.....	155
FIGURA 39.....	157
Sistema de interacción global y local de Inteligencia de Enjambre.....	157
FIGURA 40.....	158
Herramienta de Grasshopper Millipede para la simulación del Método de Elementos Finitos (FEM) y la optimización topológica estructural.....	158
FIGURA 41.....	158
Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación de optimización topológica estructural con el método FEM a través de Millipede.....	158
FIGURA 42.....	160
Resultado de la simulación realizada con el algoritmo de optimización topológica estructural (FEM) en el entorno de programación visual Grasshopper con el complemento Millipede.....	160
FIGURA 43.....	161
Agentes conducidos por un campo de flujo vectorial determinado en un entorno de interacción.....	161
FIGURA 44.....	162

Integración de las tres especialidades (Arquitectura, Automatización e Inteligencia Artificial) en el modelo de Inteligencia Colectiva (IC).	162
FIGURA 45.....	163
Relación de variables de análisis específicas del modelo de Inteligencia Colectiva. .	163
FIGURA 46.....	165
Aplicación del modelo de IC para la simulación del Sistema Multi-Robótico (SMR).	165
FIGURA 47.....	166
Componentes explicativos del Sistema Multi-Robótico SMR.....	166
FIGURA 48.....	169
Vehículos de Braitenberg y sus comportamientos.....	169
FIGURA 49.....	170
Sistema odométrico de los Vehículos de Braitenberg.....	170
FIGURA 50.....	172
Robot que evita obstáculos: ejemplar físico de Vehículo de Braitenberg.	172
FIGURA 51.....	174
Flujograma algorítmico base en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg mediante Quelea.	174
FIGURA 52.....	176
Simulación tridimensional realizada con el algoritmo para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg mediante Quelea.	176

FIGURA 53.....	177
Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg con reconocimiento de campo de flujo vectorial mediante Quelea.....	177
FIGURA 54.....	184
(a) Algoritmo del modelo Termitas desarrollado por Uri Wilensky (1997) en NetLogo -arriba-. (b) Resultado de la simulación bidimensional realizada por el algoritmo -abajo-.....	184
FIGURA 55.....	186
Componentes explicativos de la Envolvente Arquitectónica (EA).....	186
FIGURA 56.....	188
Ejemplo de sistema constructivo constituido por tejido denso de elementos de madera endebles.	188
FIGURA 57.....	189
Ejemplo de sistema constructivo constituido por tejido denso de elementos de madera endebles.	189
FIGURA 58.....	191
Componentes explicativos de la simulación del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).191	
FIGURA 59.....	193

Criterios de selección de las plataformas de simulación robótica para el desarrollo de la segunda fase de investigación del modelo de Inteligencia Colectiva y el Sistema Multi-Robótico.	194
FIGURA 60.....	195
Flujograma del diseño general del cuasiexperimento de la investigación.	195
FIGURA 61.....	198
Componentes explicativos del diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos.	198
FIGURA 62.....	200
Estrategias estadísticas para describir el desempeño de los agentes.	200
FIGURA 63.....	202
Estrategia general de recolección, análisis y evaluación de datos.....	202
FIGURA 64.....	204
Diseño del instrumento de recolección de datos: ficha de registro de información resultante del cuasiexperimento.....	204
FIGURA 65.....	205
Ficha de recolección de datos como instrumento de registro de información (página 1).	205
FIGURA 66.....	209
Ficha de recolección de datos como instrumento de registro de información (página 2).	209

FIGURA 67.....	210
Diseño del instrumento de análisis y evaluación de datos: hoja de cálculo automatizada y gráficas de datos cuantitativos.	210
FIGURA 68.....	211
Ejemplar de tabla de la hoja de cálculo automatizada para el vaciado de información registrada en las fichas de recolección de datos.	211
FIGURA 69.....	214
Estructura de contenido del cuasiexperimento del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).	214
FIGURA 70.....	215
Componentes de imagen resultante de la simulación para la optimización topológica estructural realizada por el algoritmo FEM.....	215
FIGURA 71.....	220
(a) Flujograma de Grasshopper configurado para la optimización topológica estructural FEM realizado con Millipede -arriba-. (b) Resultado de la simulación ejercida por el algoritmo -abajo-.....	220
FIGURA 72.....	223
Componentes del entorno virtual de desenvolvimiento de los agentes: (a) dimensiones delimitadoras -arriba-, (b) contorno y vacío que dan forma a la topología que representa la sección de la EA -medio-, (c) imagen resultante de la optimización topológica estructural FEM -abajo-.....	223

FIGURA 73.....	229
Flujograma de Grasshopper configurado para la simulación del sistema Multi-Agente realizado con Quelea.	229
FIGURA 74.....	231
(a) Resultado de simulación en dos dimensiones -arriba-, (b) resultado en tres dimensiones del sistema Multi-Agente realizado con Quelea -medio-, (c) resultado con la imagen de la optimización topológica estructural FEM -abajo-.....	231
FIGURA 75.....	237
Ejemplar de selección de elementos fallidos en una simulación (ensayo) del sistema Multi-Agente.	237
FIGURA 76.....	238
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la primera muestra del cuasiexperimento.....	238
FIGURA 77.....	244
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la segunda muestra del cuasiexperimento.....	245
FIGURA 78.....	250
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la tercera muestra del cuasiexperimento.....	251
FIGURA 79.....	258
Frecuencia relativa de éxito y fracaso en los ensayos: (a) primera muestra (10 agentes) -arriba-, (b) segunda muestra (15 agentes) -medio-, (c) tercera muestra (20 agentes) -abajo-.....	258
FIGURA 80.....	262

Histograma de frecuencias: duración de los ensayos -minutos decimales-. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.....	262
FIGURA 81.....	264
Diagrama de dispersión: duración de ensayos -minutos decimales-. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.....	264
FIGURA 82.....	265
Histograma de frecuencias: elementos constructivos fallidos. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo- ..	265
FIGURA 83.....	267
Diagrama de dispersión: elementos constructivos fallidos. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.....	267
FIGURA 84.....	270
(a) Análisis comparativo entre muestras de probabilidad de ensayos fallidos con la distribución binomial -arriba-. (b) Análisis comparativo con la distribución binomial acumulada -abajo-.....	270
FIGURA 85.....	271
(a) Análisis comparativo entre muestras de probabilidad de elementos constructivos fallidos en los ensayos a través de la distribución de Poisson -arriba-. (b) Análisis comparativo con la distribución de Poisson acumulada -abajo-	271

FIGURA 86.....	274
Cantidad de robots fallidos en los ensayos de las tres muestras.	274
FIGURA 87.....	282
Simulador robótico Webots. Las imágenes muestran a una unidad robótica que evita obstáculos a través de sus componentes sensoriales.....	282
FIGURA 88.....	283
Aplicación de los comportamientos del método algorítmico Vehículos de Braitenberg en prototipo físico de unidad robótica.....	283

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	43
Enfoques con mayor recurrencia en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.	43
TABLA 2.	46
Materiales con mayor recurrencia en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.	46
TABLA 3.	48
Medios robóticos recurrentes en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.	48
TABLA 4.	64
Relación de autores del grupo de artículos orientados a la “Construcción Multi Robótica e IC”.....	64
TABLA 5.	100
Taxonomía de procesos de Fabricación Digital (FD)	100
TABLA 6.	121
Métodos algorítmicos de optimización de la Inteligencia Artificial (IA).	121
TABLA 7.	171
Ejemplar personalizado de Vehículo de Braitenberg: componente y características generales.....	171
TABLA 8.	206

Descripción de reactivos del primer nivel de registro de datos: información general de la muestra.....	206
TABLA 9.	207
Descripción de reactivos del segundo nivel de registro de datos: resultados generales del ensayo.	207
TABLA 10.	207
Descripción de reactivos del tercer nivel de registro de datos: detalles del ensayo referidos a la Envolvente Arquitectónica (EA).....	207
TABLA 11.	208
Descripción de reactivos del cuarto nivel de registro de datos: detalles del ensayo referidos al Sistema Robótico (SR).....	208
TABLA 12.	218
Parámetros iniciales establecidos en las variables del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.	218
TABLA 13.	219
Parámetros centrales establecidos en las variables de los motores de simulación del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.....	219
TABLA 14.	219
Parámetros finales establecidos en las variables del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.	219
TABLA 15.	225

Parámetros iniciales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.	226
TABLA 16.	227
Parámetros centrales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.	227
TABLA 17.	228
Parámetros finales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.	228
TABLA 18.	235
Descripción de aspectos que considera la política de desenvolvimiento del sistema Multi-Agente en las simulaciones.	235
TABLA 19.	257
Relación porcentual de la frecuencia relativa de éxito y fracaso en los ensayos de las tres muestras.	257
TABLA 20.	260
Recuento de resultados por muestra en el cuasiexperimento.....	260
TABLA 21.	261
Datos estadísticos: (a) duración de ensayos en minutos decimales -arriba-, (b) robots fallidos (agentes) -medio-, (c) elementos constructivos dispuestos de manera fallida en los ensayos -abajo-.	261
TABLA 22.	269

(a) Datos para el análisis de efectividad de los ensayos en cada muestra -arriba-. (b)	
Datos para el análisis de efectividad en la disposición de elementos constructivos por	
parte de los agentes en cada muestra -abajo-.	269
TABLA 23.	278
Resultados del análisis correlacional lineal de la variable de tiempo sobre la cantidad de	
ensayos.....	278
TABLA 24.	279
Resultados del análisis correlacional lineal de la variable de elementos constructivos	
fallidos sobre la cantidad de ensayos.....	279
TABLA 25.	319
Descripción de simuladores robóticos y sus características.	319

ÍNDICE DE ALGORITMOS

ALGORITMO 1.	124
Algoritmos evolutivo estándar.....	124
ALGORITMO 2.	125
Algoritmo de la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en su versión canónica.	
.....	125
ALGORITMO 3.	136
Algoritmo de movimiento Browniano en el entorno de programación Processing (Java).	
.....	137
ALGORITMO 4.	144
Algoritmo de separación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).	
.....	144
ALGORITMO 5.	147
Algoritmo de alineación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).	
.....	147
ALGORITMO 6.	150
Algoritmo de cohesión desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).	
.....	150
ALGORITMO 7.	179
Algoritmo para el control de robot que evita obstáculos, como ejemplar de Vehículo de Braitenberg, desarrollado en el entorno de programación Arduino IDE (C++)......	179

ALGORITMO 8.	182
Algoritmo de comportamiento de agregación mediante metaheurística Termitas, desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).	182

ÍNDICE DE FÓRMULAS

(1) VELOCIDAD DE PARTÍCULA (PSO)	125
(2) POSICIÓN DE PARTÍCULA (PSO)	125
(3) MODELO DE VICSEK	138
(4) COMPORTAMIENTO DE SEPARACIÓN (INTELIGENCIA DE ENJAMBRE)	143
(5) COMPORTAMIENTO DE ALINEACIÓN (INTELIGENCIA DE ENJAMBRE)	146
(6) COMPORTAMIENTO DE COHESIÓN (INTELIGENCIA DE ENJAMBRE)	149
(7) VELOCIDAD LINEAL Y ANGULAR (ODOMETRÍA DE VEHÍCULOS DE BRAITENBERG)	169
(8) RESTRICCIÓN ADICIONAL (ODOMETRÍA DE VEHÍCULOS DE BRAITENBERG)	170
(9) COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R^2	200
(10) DISTRIBUCIÓN BINOMIAL	201
(11) DISTRIBUCIÓN DE POISSON	201

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ALGORITMOS	XX
ÍNDICE DE FÓRMULAS	XXII
ÍNDICE.....	XXIII
1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	6
1.3. Preguntas de investigación.....	15
1.3.1. Pregunta principal.....	15
1.3.2. Preguntas secundarias.....	15
1.4. Hipótesis.....	15
1.5. Objetivos de investigación.....	16
1.5.1. Objetivo general.....	16
1.5.2. Objetivos particulares.....	16
1.6. Justificación.....	17
1.7. Contextualización del objeto de investigación.....	20

2.	CAPÍTULO II. REVISIÓN SISTEMÁTICA (PRISMA) DEL ESTADO DEL ARTE	22
2.1.	Antecedentes.....	22
2.2.	Método	24
2.2.1.	Criterio de elegibilidad.	25
2.2.2.	Estrategia de búsqueda.....	26
2.2.3.	Selección de estudios.	27
2.2.4.	Proceso de recolección de datos.	28
2.2.5.	Análisis cuantitativo.....	29
2.2.6.	Evaluación de calidad.	29
2.3.	Resultados.....	30
2.3.1.	Selección de estudios.	30
2.3.2.	Características del estudio y resultados.	40
2.4.	Discusión y conclusiones.....	68
3.	CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	78
3.1.	Estrategias computacionales en la Fabricación Digital y la Arquitectura.....	79
3.1.1.	Diseño Computacional en la Arquitectura.	80
3.1.2.	Enfoques teóricos y metodológicos del Diseño Computacional.....	82
3.1.3.	Arquitectura Algorítmica.	95
3.1.4.	Arquitectura Paramétrica.	97
3.2.	Fabricación Digital, Robótica e integración en el Diseño.....	98

3.2.1.	Fabricación Digital como un proceso integrado en el Diseño.	103
3.2.2.	Robótica y Automatización.....	109
3.3.	Los sistemas computacionales y la Arquitectura	112
3.4.	Fabricación Digital e Inteligencia Artificial: Automatización e Inteligencia Colectiva en la Arquitectura.....	115
3.4.1.	Inteligencia Artificial y Colectiva.	117
3.4.2.	Métodos algorítmicos de optimización de la Inteligencia Artificial.	120
3.4.3.	Algoritmos metaheurísticos: evolutivos e Inteligencia Colectiva.	122
4.	CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	127
4.1.	Características de la investigación	127
4.1.1.	Enfoque de investigación.....	128
4.1.2.	Tipo de investigación.....	128
4.1.3.	Periodicidad.....	128
4.1.4.	Criterios de diseño metodológico.....	129
4.2.	Modelo de Inteligencia (Artificial) Colectiva	132
4.2.1.	Diseño del modelo.....	133
4.2.2.	Variables de análisis.....	161
4.2.3.	Estrategias de aplicación.....	164
4.3.	Sistema Multi-Robótico	165
4.3.1.	Diseño del sistema.....	167

4.3.2.	Características.....	170
4.3.3.	Estrategias de aplicación.....	173
4.4.	Ampliación metaheurística del modelo de Inteligencia Colectiva para aplicación al Sistema Multi-Robótico	181
4.5.	Envolvente Arquitectónica	186
4.5.1.	Características y materiales.....	187
4.5.2.	Proceso de construcción.....	188
4.6.	Simulación del modelo de Inteligencia Colectiva.....	190
4.6.1.	Criterios de selección de simuladores robóticos para segunda fase de investigación.....	192
4.7.	Diseño general del cuasiexperimento	194
4.8.	Diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos.....	198
4.8.1.	Estrategia para la validación de desempeño del modelo.	199
4.8.2.	Estrategia general de recolección y análisis de datos.	201
4.8.3.	Recolección de datos.....	203
4.8.4.	Análisis de datos.	210
5.	CAPÍTULO V. CUASIEXPERIMENTO DEL MODELO DE INTELIGENCIA COLECTIVA.....	214
5.1.	Configuración inicial del sistema Multi-Agente para la simulación	215
5.1.1.	Configuración del algoritmo para la optimización topológica estructural con el Método de Elementos Finitos.....	218

5.1.2.	Determinación del entorno virtual de desenvolvimiento de los agentes.....	222
5.1.3.	Configuración del sistema Multi-Agente.....	225
5.1.4.	Simulación del sistema Multi-Agente.....	231
5.1.5.	Política de interacción del sistema Multi-Agente.	235
5.2.	Aplicación del modelo de Inteligencia Colectiva.....	237
5.2.1.	Aplicación del sistema Multi-Agente con diez unidades robóticas.	238
5.2.2.	Aplicación del sistema Multi-Agente con quince unidades robóticas.	244
5.2.3.	Aplicación del sistema Multi-Agente con veinte unidades robóticas.	250
5.3.	Resultados del cuasiexperimento.....	256
5.3.1.	Datos estadísticos.....	261
5.3.2.	Datos de efectividad del sistema.....	269
5.4.	Interpretación de resultados	272
5.4.1.	Análisis de los datos estadísticos.	273
5.4.2.	Análisis de efectividad del sistema.	279
5.5.	Ampliación ciberfísica del modelo de Inteligencia Colectiva.....	281
6.	CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	285
	REFERENCIAS.....	295
	APÉNDICE I	319

1. CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

La estructura del presente trabajo introduce al tema de investigación a través de la exposición del planteamiento del problema. Es así como, mediante la descripción de los antecedentes, preguntas de investigación, hipótesis, objetivos de investigación, justificación, contextualización del objeto de investigación y revisión del Estado del Arte, se consolida un punto de partida para el desarrollo del marco teórico que establecerá las bases para el desarrollo metodológico de la investigación.

1.1. Planteamiento del problema

La innovación en la tecnología computacional, así como en los procedimientos sustractivos y aditivos de Fabricación Digital (FD), han representado una oportunidad para generar nuevas líneas de investigación que aporten a la construcción arquitectónica avanzada (Menges y Knippers, 2020). En este sentido, la FD en la Arquitectura sucede cuando esta disciplina se relaciona con la Automatización (como especialidad), con el objetivo de beneficiar y optimizar los procesos de desarrollo arquitectónico, diseño de materiales, así como procesos de Ingeniería y Construcción.

El modelo típico de Automatización aplicado en la Arquitectura considera una combinación de procesos de Diseño Computacional (DC) y Robótica predominantemente manejados mediante sistemas de Control Numérico Computacional (CNC) y Brazos Robóticos Industriales (BRI). "... El control numérico, que todavía sirve como principio en el trabajo de los sistemas de Control Numérico por Computadora (CNC) se encuentran en el corazón de muchas herramientas de Fabricación Digital que usamos hoy." (Hirschberg, Hovestadt, y Fritz, 2020, p. 408).

Aunque este modelo ha representado ser el responsable de un cambio de paradigma (a nivel global) en las últimas dos décadas del siglo XX, en el cual, sucede un traslado de la producción con un enfoque de estandarización a otro basado en la personalización en masa (Carpo, 2017; Claypool, Jimenez Garcia, Retsin, Soler, y Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2019; Hirschberg et al., 2020); lo cierto es que, en la última década, la literatura ha evidenciado que la mayoría de estos métodos significan una problemática de accesibilidad tecnológica, debido a que los medios robóticos y las herramientas comúnmente utilizadas en la FD, representan un problema de escala para su movilidad, manipulación y mantenimiento (Claypool et al., 2019).

La problemática tiene su origen en la escala en la cual se desenvuelve la Arquitectura que, como consecuencia, implica el uso de medios robóticos de gran escala. Esta situación provoca que dichos medios representen dificultades de transportabilidad en el proceso de automatización de la construcción arquitectónica.

Los medios robóticos más utilizados son las máquinas CNC de dos o tres ejes, así como los BRI de dos, cuatro o seis ejes con aplicaciones de corte, fresado, agregado, rociado, extrusión o estereolitografía (impresión 3D) en gran escala.

Por lo general, los objetos se cortaban en cortes seccionales o marcos para cortar, por ejemplo, utilizando una fresadora CNC de dos o tres ejes ... Hoy en día, el brazo robótico industrial tiene capacidades mucho más allá de la máquina CNC y puede tener hasta seis ejes y un radio de alcance de hasta 1.5 metros. (Claypool et al., 2019, pp. 25, 27).

Estos sistemas de construcción típicamente implican procesos de replicación física automatizada de un modelo 3D digital para la fabricación de un objeto arquitectónico. Dicha

reproducción puede ser realizada tanto por un solo robot, como por múltiples similares o de diferente tipo.

El anterior modelo típico, puede cambiar cuando existe un sistema colaborativo entre diversos robots, ya que el esquema inicial en el que se relacionan las especialidades de Arquitectura y Automatización se ve complementado con los procesos de otra especialidad del mundo computacional llamada Inteligencia Artificial (IA). Los procedimientos de interacción e inteligencia para generar esquemas de comportamiento colectivo son estudiados por esta última disciplina y hace del modelo de FD más robusto y complejo.

En este último modelo se integran tres especialidades en la que solamente dos de ellas tienen una relación formativa estrecha: la Automatización y la IA. Estas disciplinas, del mundo computacional, no son parte de la formación tradicional de la Arquitectura, de tal manera que, al buscar integrarlas, se generan brechas interdisciplinarias que afectan la accesibilidad de estos procesos tecnológicos en la producción arquitectónica.

El anterior conjunto de problemáticas descritas: (1) la escala arquitectónica, (2) la escala del medio de automatización robótica, (3) la consecuente falta transportabilidad, y (4) las brechas interdisciplinarias entre la Arquitectura, la Automatización y la IA, repercuten en la asequibilidad para acceder a estos procesos de FD por parte de las instituciones educativas, la investigación, el desarrollo académico, así como la iniciativa privada.

Esta realidad impacta socialmente la accesibilidad a estos medios tecnológicos, sobre todo en países en vías de desarrollo, donde los procesos de construcción progresiva, la autoconstrucción o la participación ciudadana son importantes para el desarrollo arquitectónico. La falta de acceso a los procesos de automatización e IA posiciona a los países en desarrollo en un estado de rezago con respecto a los avances tecnológicos que tienen el objetivo de optimizar

los procesos de trabajo relacionados con la construcción. Todo este escenario repercute en problemáticas de equilibrio social, económico y sostenible.

Es así como, el contexto disciplinar de la FD en la Arquitectura actualmente se encuentra concentrado en las principales instituciones educativas de Norteamérica y Europa, debido al acceso tecnológico consecuente de su situación económica favorable a nivel mundial, que les permite solventar de mejor manera, las demandas resultantes de las brechas disciplinares, la escala, la transportabilidad, el mantenimiento y la operación de los medios robóticos de tipo industrial.

Por otro lado, a pesar de que fue a través de la Arquitectura, que los procesos de producción se trasladaron hacia esquemas de personalización en masa gracias al acceso comercial global a impresoras 3D y a las máquinas de corte CNC (Carpo, 2017; Claypool et al., 2019); lo cierto es que, la disciplina transmite el conocimiento de estos desarrollos de una manera más lenta que en el ámbito industrial de las empresas transnacionales, que introducen con sus instalaciones, sistemas avanzados de automatización para la producción vanguardista en los países en vías de desarrollo.

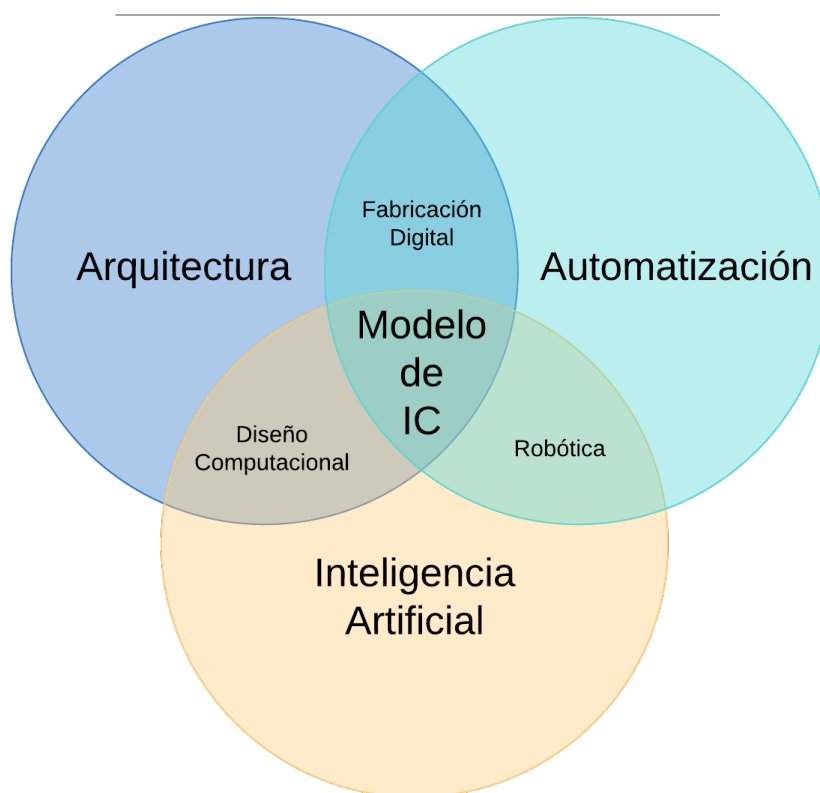
Por tanto, en este trabajo de tesis se estudia la FD dirigida a la Arquitectura, Ingeniería y la Construcción (AIC), bajo un modelo basado en Inteligencia Colectiva (IC), que favorezca la multiplicidad y colaboración robótica, para minimizar su escala al momento de participar en los procesos de construcción de la envolvente arquitectónica (que representa un gran tamaño). Para de esta forma, también contribuir con la transportabilidad de estos medios, y al mismo tiempo facilitar la traducción (o traslado) de los procesos de Automatización e IA a la problemática arquitectónica, con el fin de estrechar las brechas interdisciplinares entre estas especialidades (Figura 1).

En particular, centrar la investigación a este modelo, tiene el potencial de aportar a la problemática de Accesibilidad Tecnológica (AT) mediante un enfoque de reducción (o economía) de escala, y de esta forma, contribuir a la democratización tecnológica de los sistemas de automatización constructiva.

Figura 1.

Relación interdisciplinar del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la fabricación arquitectónica.

Modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la fabricación de la Envolvente Arquitectónica (EA)



Nota: El diagrama muestra al modelo de IC como la intersección interdisciplinar entre la Arquitectura, Automatización e IA. Elaboración propia (2022).

1.2. Antecedentes

Los sistemas de FD han adquirido una fuerte presencia en el desarrollo e investigación del ámbito de la AIC a partir del acelerado avance tecnológico y accesibilidad comercial global de los sistemas computacionales desde 1980 a la actualidad (segunda década del siglo XXI). La influencia de *Sketchpad* abrió paso en 1982 al programa computacional con mayor éxito comercial: *AutoCAD*, programa que hasta la fecha es altamente utilizado en la profesión. Este hecho marcó pauta para proyectar nuevos modelos de trabajo con el uso computacional en varias disciplinas afines al diseño de la AIC.

En la Arquitectura, los sistemas de automatización se encuentran estrechamente vinculados con el Diseño Computacional (DC). Según, Ervin (2018) la disciplina tiene tres distintos modos de interacción con la computación: “1. usando *software* - como herramienta, para la automatización, 2. Programando - como un lenguaje, por algoritmos, 3. Involucrándose con el Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) - como un medio, para el incremento: desde lo estático a lo dinámico e interactivo” (citado en Cantrell y Mekies, 2018, p. 112).

Primeramente, es a partir del segundo modo que la computadora tiene una función más amplia e interactúa como un agente colaborador que puede dar respuesta a problemas complejos de Diseño. Luego, es a través del tercer modo con el que tiene una participación importante con los sistemas de fabricación, producción y difusión arquitectónica.

Wujec (2017) identifica que la relación entre el diseño y la computación, se desarrolla en cuatro eras (Figura 2): (1) la primera deriva de la invención de los programas CAD, los cuales esencialmente imitan la acción de dibujar, (2) la segunda se relaciona con el avance de los programas CAD para producir, visualizar y manipular modelos en tercera dimensión, (3) la tercera corresponde al momento en el que fue posible agregar propiedades físicas a esos modelos

para poder ser usados en simulaciones; nuevos algoritmos permiten la interrelación de los objetos, (4) la cuarta, nace a partir de la cuarta revolución industrial y es la era en el que las máquinas tienen la capacidad de aprender.

Si bien, las cuatro eras anteriores describen el avance del CAD, es hasta la cuarta era cuando realmente se le puede asignar a la computadora la propiedad de asistir al diseño. En las primeras tres eras, las computadoras asisten a representar y documentar. En palabras de Wujec (2017), “el diseño se encontraba, en gran medida, en la imaginación del diseñador. La computadora necesitaba ser instruida para representar la idea de la imaginación a una forma legible en la máquina” (2017, p. 88).

En la cuarta era, la computadora muestra una inteligencia que combina algoritmos que permiten el reconocimiento de patrones y manejo de datos mediante sistemas de IA (Redes Neuronales, *Machine Learning*, etc.) y Computación Distribuida, para realizar un cambio de paradigma a través del uso de los sistemas computacionales y trasladarse de comprenderlos como una herramienta representacional a socios creativos que ayudan a explorar y tomar decisiones de diseño (Wujec, 2017).

Con el fin de describir los momentos clave en los que la tecnología ha cambiado masivamente la forma de producir cosas, Wujec (2017) explica las cuatro revoluciones industriales acontecidas:

La primera nace en el siglo XVIII con la máquina de vapor ... la segunda emerge en la última etapa del siglo XIX ... cuando se impulsa la producción en masa ... Una tercera se apoderó de los años 70, impulsada por las herramientas digitales ... Ahora estamos entrando a una cuarta revolución, la cual no es manejada por una sola fuerza, sino por una combinación de tecnologías, incluyendo sensores, algoritmos y robótica. (2017, p. 30).

Históricamente, la tecnología ha transformado el avance de todos los oficios y profesiones, la Arquitectura no es la excepción, sin embargo, según Carpo (2017) ésta tiende a tardar en adoptar los cambios tecnológicos. Considera que aún en la primera etapa del modernismo, los arquitectos no iban en sintonía con los avances que la humanidad ya había desarrollado, y regresaban al uso de las viejas estructuras de poste y dintel de la antigüedad clásica, a pesar de que la ingeniería Romana ya había generado arcos y bóvedas, y la arquitectura Gótica construido sorprendentes torres y pináculos de gran altura.

La edad de oro del modernismo del siglo XX representó ser el momento en el que los arquitectos van por primera vez al ritmo del mundo industrial. La Arquitectura, adopta o sigue el ejemplo de la tecnología; sin embargo, no la genera hasta el primer giro digital de los años 90. “El traslado del Post-Fordismo en la Arquitectura se caracteriza claramente por este cambio de la estandarización en masa a la personalización en masa de la segunda mitad del siglo XX” (Claypool et al., 2019, p. 24).

Carpo (2017) reconoce que a partir de 1990, surge el *primer giro digital* de la Arquitectura, cuando los arquitectos adoptan los cambios en las herramientas digitales antes que cualquier otra disciplina, y ven en éstas, una oportunidad de generar productos *personalizados* en masa sin generar un costo añadido y no *estandarizados* como hasta entonces era el paradigma de producción y mercado a nivel internacional. “Arquitectos -no todos, pero si los mejores- adoptaron las herramientas digitales y abrazaron el cambio digital antes que cualquier otro negocio, industria o profesión creativa” (Carpo, 2017, p. 3).

De esta forma, se le atribuye a la Arquitectura, antes que cualquier otra disciplina, la idea de abandonar la *producción estandarizada en masa* para trasladarse a la *personalización digital en masa* (Carpo, 2017). En este sentido, los arquitectos que marcaron la pauta para esta

transformación en los procesos de diseño y producción fueron Peter Eisenman (2011) y Greg Lynn (1998). Primeramente, al arquitecto Eisenman (2011) se le atribuye anticipar un cambio cultural y técnico que engendraría un nuevo estilo arquitectónico basado en curvas y superficies suavizadas (Carpo, 2017).

También, es considerado un precursor en el desarrollo de procesos de personalización en masa y heterogeneidad de objetos. “*Eisenman Architects* adoptó las primeras tecnologías de computacional personal accesibles para explorar conceptos extraídos de la biología como la adaptación y la morfogénesis, así como de la filosofía de Gilles Deleuze” (Claypool et al., 2019, p. 24). De hecho, es el mismo arquitecto Eisenman (2011) quien considera que Greg Lynn (1998) propone diagramas arquitectónicos donde el origen formal parte de lógicas computacionales, es decir, de las operaciones propias que tienen lugar en el tiempo a través de un algoritmo informático.

Así, que es posible distinguir a Lynn como el punto de partida en la manipulación de algoritmos en el diseño computacional bajo el discurso de emular organizaciones biológicas y morfologías no estandarizadas, con un origen totalmente digital y sin antecedente o registro de información determinante para el desarrollo de la forma arquitectónica (Eisenman, 2011). Por otro lado, Frampton (2014) considera a Lynn como el principal teórico morfológico de la “figura”, que evoca los principios comunes de la forma animal como medio para fundamentar la prioridad de la curvilinealidad y la metamorfosis digital para favorecer las superficies polimórficas a las que llama *BLOBS* (glóbulos).

Carpo (2017) distingue que, aunque las computadoras de ese tiempo ya trabajaban de manera eficaz, la informática era aplicada bajo la lógica de un suministro limitado de datos (que eran aún considerados artículos costosos). Esta lógica del “*Small Data*” es la que caracterizaba la

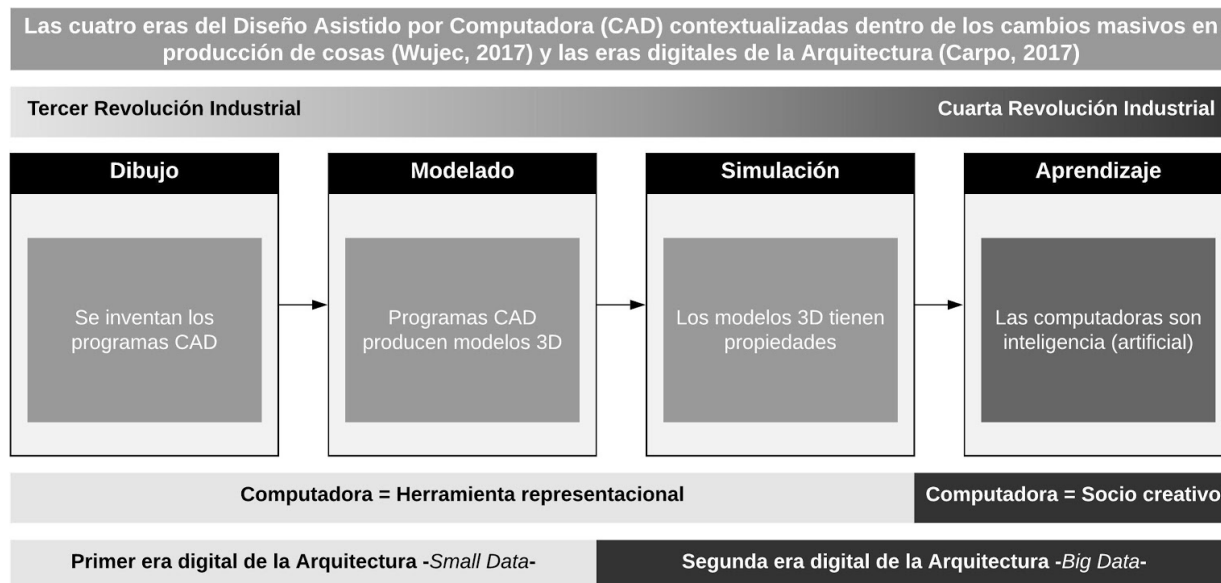
forma de trabajar de esa primera era digital de la Arquitectura. Conforme avanza el tiempo, la tecnología digital también lo hace a un ritmo cada vez más acelerado, y el primer giro digital de la arquitectura termina en el momento que la información comienza a proliferar (gracias al internet), tanto como el acceso de las personas a las computadoras personales, las cuales progresivamente tienen mayor capacidad de almacenamiento.

Esto abre camino al concepto de “*Big Data*” (mencionado por primera vez por Erik Larson en 1989) que se refiere a la capacidad técnica lograda para almacenar y procesar una cantidad creciente de datos a un costo cada vez más bajo. Esta evolución tecnológica, cambia la manera en el que se desenvuelven todas las disciplinas del siglo XXI. En Arquitectura, el cambio sucede a partir del 2010, poco después de que *Gmail* haya forjado en los usuarios un criterio de búsqueda y no de clasificación de información (de los correos electrónicos) como un medio más coherente de desplazamiento en el *Big Data*.

Así, a partir de ese año se da el paso al *segundo giro digital de la Arquitectura* (Carpo, 2017). Este suceso representó una evolución significativa en la Inteligencia Artificial (IA), con repercusión no sólo en la Arquitectura, sino en todas las áreas de conocimiento. Este cambio también promovió un enfoque diferente con respecto a la percepción y uso de los medios computacionales en todas las disciplinas del Diseño.

Figura 2.

Diagrama descriptivo de las cuatro eras de la relación entre diseño y computación.



Nota. Diseño Asistido por Computadora (CAD), contextualizado dentro de las cuatro Revoluciones Industriales según Wujec (2017) y las eras digitales de la Arquitectura según Carpo (2017). Elaboración propia (2019).

Carpo (2017, 2019) sostiene que dicho cambio de enfoque repercute también en el método científico, ya que la ciencia moderna impulsada por la Revolución Industrial y caracterizada por una lógica matemática de carácter causal, que analiza un limitado número de variables o factores (*Small Data*), se traslada a una nueva que permite resolver problemas complejos a través de las iteraciones de operaciones simples con las virtudes de la IA revolucionada por el *Big Data*.

Esta nueva lógica marcó pauta a una metodología de diseño donde las simulaciones computacionales son fundamentales, en vías de solucionar problemas arquitectónicos complejos relacionados con la forma, el espacio y su adaptabilidad con el entorno. Los nuevos métodos, se encuentran en la adopción de un carácter *heurístico* computacional, para dejar atrás el modelo que caracterizó la modernidad de las lógicas *causales* para resolver problemas con poca (y por falta de) información.

Las computadoras pueden trabajar de esa manera, y nosotros no, porque el ser humano no puede ejecutar una gran cantidad de cálculos cualquier cantidad de tiempo práctico. A diferencia de los humanos, la computadora no necesita ciencia para comprimir y acortar sus operaciones basadas en números. (Carpo, 2019, p. 89).

El método *heurístico computacional*, es un conjunto de procesos que implican simulación generativa para la resolución eficiente de problemas (en un corto periodo de tiempo) a través de sistemas algorítmicos de prueba y error. Estos procesos son importantes para la IA y trabajan para permitir reconocer y clasificar los resultados optimizados con una aproximación intuitiva.

Las aportaciones del enfoque algorítmico, la evolución de los sistemas computacionales, la IA, el avance en los medios de producción y la robótica del *segundo giro digital* de la Arquitectura (Carpo, 2017, 2019) o la cuarta era de Diseño Asistido por Computadora (Wujec, 2017), motivan a arquitectos como Achim Menges (2008; 2008, 2015; 2020), Neri Oxman (2015), o Gramazio Kohler (2020) a explorar los horizontes abiertos por estas innovaciones. Mediante la investigación y el Diseño Generativo (DG), desarrollan proyectos avanzados que son ejemplares en la optimización de desempeño de su materialidad y cualidades constructivas, para apuntalar la vanguardia en el diseño, y cambiar el paradigma de los procesos de fabricación y edificación.

Este enfoque performativo es consolidado por metodologías *metaheurísticas* de diseño y simulación computacional, así como por los avances en cuanto el alcance de realización de la tecnología. “El enfoque debe estar en explorar nuevas posibilidades y utilizar los medios de nuestro tiempo para tener en cuenta la complejidad de los aspectos cualitativos y cuantitativos que componen un edificio” (Menges y Knippers, 2020, p. 8).

Automatización en la construcción, biomimética, impresión en tercera dimensión, materiales experimentales, autoorganización o autoensamble, son algunas de las estrategias que se exploran como nuevas metodologías en los procesos de construcción de objetos. En palabras de Menges (2015) el enfoque, tiene como objetivo investigar, “la reciprocidad entre el material y lo computacional en Arquitectura, sus múltiples y profundas interrelaciones con tecnología, biología y cultura” (2015, p. 7).

Por otra parte, la influencia de los últimos desarrollos arquitectónicos, con relación a la tecnología digital, ha motivado a otro grupo de arquitectos a alinearse con la crítica dirigida a los métodos causales de la ciencia moderna, y al sistema político capitalista neoliberal que caracterizaron la segunda mitad del siglo XX y la primera década del siglo XXI, que tuvieron una condición arquitectónica de geometría diferenciada, fluida y ortodoxamente continua, con el predominio formal de la curvilinealidad derivada del uso de geometría basada en las *splines*.

La postura crítica y política, va directamente en contra de las inquietudes escultóricas de los años 90, que evolucionaron hasta llegar a la cúspide parametricista de Schumacher (2009, 2011, 2012). Se posiciona en sintonía con la teoría de Carpo (2017, 2019) relacionada con la *segunda era digital* de la Arquitectura, con un enfoque arquitectónico constituido por elementos separados, sincopados y repetidos seriadamente para generar sistemas complejos generados y ensamblados, también, bajo metodologías metaheurísticas de simulación computacional, sistemas de automatización y robótica.

Este enfoque adopta la denominación de *Discrete* (Retsin, 2019) o “Discreto”, desde su connotación de “separado” o “distinto” según la RAE, a partir de la primera aproximación de Carpo (2017) con el término *Discreteness* (Discreción). “*Discreteness*’ es una noción que

proviene de las ciencias, que se refiere a lo que es individual y separado. Es lo opuesto a lo continuo, a lo que es ininterrumpido y fluido” (Retsin, 2019, p. 8).

Derivado de estos vocablos, Morel (2019) llama a esta visión *Discretism* (Discretismo), con el fin de alinearlo con su contraparte paradigmática *Parametricism*, en el artículo *The Origins of Discretism: Thinking Unthinkable Architecture* de la revista *Architectural Design* 89(2). De esta forma, los arquitectos Gilles Retsin (2019; 2019), Manuel Jiménez García (2019), Philippe Morel (2019) o José Sánchez (2019, 2020) bajo la idea del *Discretismo*, buscan dar respuesta con la tecnología digital más avanzada, la crítica y un enfoque político a la crisis económica del 2008.

Se posicionan en un escenario donde los elementos que conforman el sistema arquitectónico son de repetición serial compleja, bajo una lógica de economía de escala, tanto de elementos que consolidan el sistema constructivo, como los medios tecnológicos que son parte del procedimiento. El objetivo es generar formaciones más oportunas a las necesidades de aprovechamiento de materiales asequibles, más endebles o provenientes de la reutilización o desperdicio.

La investigación de estos exponentes, de las propiedades de los materiales y el desarrollo de metodologías performativas, aportan a cambiar el paradigma de hacer las cosas, para de esta forma, transgredir la *personalización digital en masa* con sistemas de producción automatizada e integración de capacidades de auto organización con propiedades inherentes de auto ensamble en los objetos y materiales.

Es importante destacar que el replanteamiento mencionado anteriormente no tiene la intención de alejarse de la tecnología avanzada. Inclusive, una de las búsquedas de este enfoque es diluir las brechas entre (a) el proceso de diseño, (b) la generación del modelo digital, (c) el

sistema de (d) fabricación y (e) la materialidad misma, al grado de convertir todos estos pasos en un solo proceso de autoproducción efectuado por las propiedades del mismo material diseñado, dentro del marco de la automatización y todo lo que ello implica (tecnología computacional, IA, robótica).

1.3. Preguntas de investigación

En el planteamiento de este trabajo surgen como punto de partida de la investigación las siguientes preguntas:

1.3.1. Pregunta principal.

¿Qué modelo de Inteligencia Artificial (IA) puede ser aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la Fabricación Digital (FD) de la Envolvente Arquitectónica (EA) en contextos donde el uso de medios robóticos industriales es restringido?

1.3.2. Preguntas secundarias.

¿Cuáles son los modelos de IA utilizados en los medios robóticos de la FD para la construcción automatizada de la Arquitectura y qué tan accesibles son?

¿En qué consiste la IC aplicada a un SMR y qué características debe tener para automatizar la construcción de la EA?

¿En qué circunstancias puede ser implementado un modelo de IC para la construcción automatizada de la EA?

1.4. Hipótesis

Con el previo planteamiento del problema, antecedentes y preguntas de investigación, se identifica que los sistemas de automatización en la construcción (FD) pueden ser conducidos a una Accesibilidad Tecnológica (AT) a través de considerar métodos, enfoques y estrategias que giren en torno a solventar problemas transportabilidad, escala, así como del traslado del ámbito

disciplinar de la Automatización y la Inteligencia Artificial a la problemática arquitectónica. En este sentido, es posible formular la siguiente hipótesis:

Un modelo de Inteligencia (Artificial) Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) con unidades de pequeña escala, puede construir de forma automatizada y accesible una Envolvente Arquitectónica (EA) en contextos donde la implementación de medios robóticos de tipo industrial es restringida por escala, transportabilidad y brechas interdisciplinarias.

1.5. Objetivos de investigación

En el planteamiento de este trabajo surgen como directriz, para el desarrollo de este trabajo, los siguientes dos niveles de objetivos de investigación (Figura 3):

1.5.1. Objetivo general.

Elaborar un modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la construcción automatizada de la Envolvente Arquitectónica (EA).

1.5.2. Objetivos particulares.

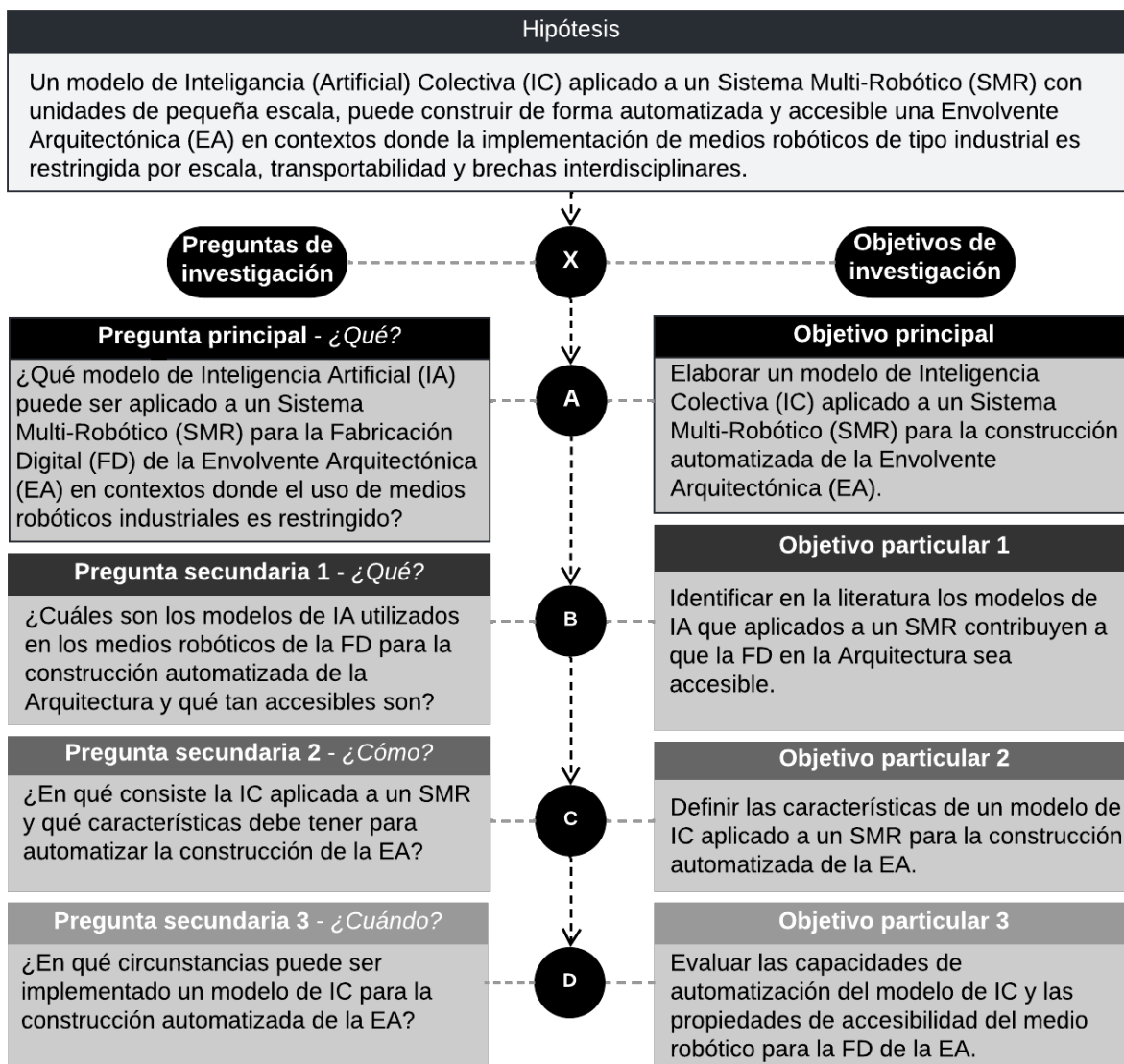
1. Identificar en la literatura los modelos de IA que aplicados a un SMR contribuyen a que la FD en la Arquitectura sea accesible.

2. Definir las características de un modelo de IC aplicado a un SMR para la construcción automatizada de la EA.

3. Evaluar las capacidades de automatización del modelo de IC y las propiedades de accesibilidad del medio robótico para la FD de la EA.

Figura 3.

Estructura de preguntas y objetivos de investigación.



Nota. Elaboración propia (2022).

1.6. Justificación

Ante la problemática de Accesibilidad Tecnológica (AT) generada principalmente por la escala de los medios robóticos de FD para poder solventar el gran tamaño de los procesos de construcción Arquitectónica, la propuesta del presente trabajo de investigación se apoya en el desarrollo de un modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) bajo un enfoque de reducción (o economía) de escala, el cual, tiene como fin abordar los

problemas consecuentes de transportabilidad, mantenimiento, operación y brechas interdisciplinarias entre las especialidades la Robótica, Automatización y Arquitectura.

En este sentido, los objetivos de investigación de este trabajo de tesis se enfocan en buscar un modelo de IC que se adapte a los procesos de FD colaborativa y a las necesidades, que los problemas previamente descritos, desencadenan y que se relacionan con la asequibilidad, el desequilibrio social, económico y sostenible.

Es así como, la reducción del tamaño de los medios robóticos de FD aplicados en la construcción arquitectónica, aporta a que los materiales utilizados para la realización de éstos sean accesibles y transportables. Este enfoque también contribuye a que la programación, operación y mantenimiento de estos medios presenten menor nivel de complejidad. Solventar el problema de AT a través de estas estrategias, beneficia a que las instituciones educativas, de investigación, así como organizaciones de iniciativa privada, se integren a los paradigmas actuales de construcción arquitectónica relacionados con la tecnología computacional y automatización robótica.

Una formación académica y profesional integrada a estos procesos de vanguardia desde una etapa básica contribuirá a que, mediante el desarrollo y transferencia del conocimiento, los medios tecnológicos para la construcción se integren a los contextos donde existe rezago para su aplicación. En México actualmente, los procesos de fabricación y automatización digital en el ámbito de la Arquitectura han sido explorados de manera acotada y con poca profundidad. Aunque hay instituciones en la enseñanza de la Arquitectura donde se instruyen estos procesos, es aún necesario ampliar su investigación e implementar en las metodologías y sistemas de producción. Esta realidad, posiciona su aprendizaje principalmente a investigaciones y prácticas de origen extranjero, donde el tema se encuentra más avanzado.

Aplicar, traducir o contextualizar más estos modelos en México son necesarios para aumentar las alternativas en torno a la investigación y el desarrollo arquitectónico con un acercamiento mayor a los avances tecnológicos relacionados con el DC, la Automatización, la Robótica y la IA orientada al Diseño y la Construcción. El proceso de diseño instruido tradicionalmente en las escuelas de Arquitectura parte de una herencia que conoce ampliamente el uso de herramientas análogas aplicadas en la realización de un objeto arquitectónico. La actualidad demanda una revisión a este paradigma metodológico, en vías de ser consistentes con la realidad contemporánea y conocer los sistemas de Automatización, no solo en la producción arquitectónica, sino también en el comportamiento de una edificación o de un material.

El profesional de la Arquitectura contemporánea requerirá implementar en su conocimiento el dominio de las herramientas computacionales y de robótica avanzadas con el objetivo de dirigir su teoría y práctica acorde a lo que, según Wujec (2017), llama la cuarta revolución industrial: “Nos estamos adentrando a la cuarta revolución industrial. La cual no se encuentra dirigida por una sola fuerza, sino por una combinación de tecnologías, sensores, algoritmos y robótica” (2017, p. 30).

Otro aspecto, no menos importante, con el que los objetivos de investigación de este trabajo dan seguimiento a los problemas de rezago social, desequilibrio económico y sostenible, es la preocupación por el impacto ambiental de la industria de la construcción en el marco de los fenómenos que acontecen mundialmente a causa del cambio climático. Ante este escenario, es necesario que se encuentren en sintonía con las acciones humanas planteadas por la Organización de Naciones Unidas (ONU), en la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, como una oportunidad para mejorar la vida de todos.

Es por ello, que las estrategias metodológicas desarrolladas en esta investigación, con relación a la aplicación de los avances tecnológicos digitales y de robótica en la industria de la Arquitectura y Construcción, se posicionan de manera pertinente con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que son parte de la Agenda. Específicamente como una aportación al objetivo nueve: *Industria, Innovación e Infraestructura*, en la búsqueda de optimización de los métodos de fabricación y construcción hacia una *Producción y Consumo Responsable* planteado por el objetivo doce; de una disciplina con un rol fundamental para cumplir el objetivo once: *Ciudades y Comunidades Sostenibles*.

1.7. Contextualización del objeto de investigación

A nivel mundial existe una comunidad abierta y creativa que proporciona acceso a medios avanzados de FD. Esta comunidad es llamada *FABLAB* y consiste en una red global colaborativa que comenzó como un proyecto de extensión del *Center for Bits and Atoms (CBA)*, del *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. En esta red se desarrollan prototipos de diseños arquitectónicos avanzados, se ofrecen cursos, capacitación y certificaciones para prototipar y acercar a las personas a la producción digital, con el fin de democratizar la tecnología.

Los *FABLAB*, se encuentran asociados con instituciones importantes a nivel internacional y México no es la excepción; actualmente existen diez *FABLAB* en el país, algunos asociados con universidades nacionales como la Universidad Anáhuac o la Universidad de Monterrey. Los *FABLAB* en México se encuentran distribuidos en la zona norte, centro y sur del país, sin embargo, existe rezago en la zona noroeste. Por otro lado, también existe una empresa privada con prestigio internacional, llamada *Kinetica* (Arq. Luis Gabriel Orozco Padilla), que ofrece soluciones de diseño para la realización de partes arquitectónicas personalizadas, y que ha

realizado proyectos para despachos internacionales de Arquitectura como *Zaha Hadid Architects*, *Foster + Partners*, *James Turrell*, *David Chipperfield*, *Tadao Ando*, entre otros.

Paralelo a los *FABLAB*, los principales laboratorios de fabricación digital se encuentran establecidos en las instituciones más importantes de Norteamérica y Europa. Los países en desarrollo y los países del hemisferio sur presentan mayor rezago de acceso a la tecnología de producción digital y automatización para la investigación, experimentación y prototipado en la construcción y desarrollo de materiales.

Las instituciones educativas son un medio importante para la democratización del desarrollo tecnológico y la implementación de herramientas de vanguardia en los procedimientos de diseño y constructivos. México comparte el déficit y acceso limitado a los medios tecnológicos mencionados anteriormente; por tanto, es un contexto adecuado para el desarrollo e implementación del presente modelo de Inteligencia Colectiva (IC) para aplicación a un Sistema Multi-Robótico (SMR) con fines de automatizar procesos arquitectónicos.

Una referencia importante es la manifestada por los exponentes del enfoque de diseño arquitectónico y de fabricación digital llamado *Discretismo* (Claypool et al., 2019; Morel, 2019; Retsin, 2019; Sanchez, 2020), que consideran que la red global colaborativa de los *FABLAB*, no fue un desarrollo suficiente para solventar el objetivo de democratizar y brindar accesibilidad a la tecnología digital para la construcción. El principal problema que identifican se encuentra relacionado con la gran escala de los medios y plataformas de producción automatizada que se requieren para generar construcciones de nivel arquitectónico. Este problema, no solo implica dificultad para trasladar e implementar tecnología a contextos donde la urbanización no se encuentra desarrollada, sino que los medios necesarios para efectuar la producción no son asequibles, ni consistentes con la realidad de los países en vías de desarrollo.

2. CAPÍTULO II. REVISIÓN SISTEMÁTICA (PRISMA) DEL ESTADO DEL ARTE

El presente apartado hace una revisión sistemática del Estado del Arte del tema de FD en la Arquitectura, bajo el método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) con especial atención en la construcción multi-robótica, la automatización en los procesos fabricación y la IA. Así, a través de los siguientes apartados, serán descritas las principales metodologías de FD que los investigadores actualmente desarrollan a nivel internacional con respecto al tema en cuestión. Dicha descripción, sirve para identificar en la literatura, los modelos de IA que aplicados a un SMR contribuyen a que la FD en la Arquitectura sea accesible, como uno de los objetivos particulares del presente trabajo de investigación.

2.1. Antecedentes

El objetivo principal de este trabajo, de elaborar un modelo de Inteligencia Colectiva (IC), busca desarrollar dinámicas de colectividad robótica, para minimizar la escala de cada unidad en el proceso de construcción arquitectónica. Esta colaboración también es conocida como Sistema Multi-Robótico (SMR) y es definido como un conjunto Multi-Agente robótico en donde cada agente es autónomo e interactúa con los demás mediante sensores y objetivos individuales (Dias et al., 2021).

Un Sistema Multi-Agente (SMA), es un modelo *algorítmico metaheurístico poblacional* (Díaz López, Martínez Prieto, y Gálvez Lio, 2016) de Inteligencia Colectiva (IC) que puede integrar un SMR. Los SMA se caracterizan por ser un conjunto de agentes débiles, autónomos y adaptables, con atributos de interacción mutua, que permiten estructurar topologías de trabajo colectivo para resolver problemas que están más allá de sus capacidades individuales (Stieler et al., 2022). Estos algoritmos son descritos por Roland Snooks (2018) como aquellos que

“operan a través de la interacción local de agentes autónomos computacionales, que se autoorganizan para generar comportamientos emergentes a escala global” (p.61).

En el ámbito de la FD dirigida a AIC, autores como Wagner et al. (2020) reconocen la inflexibilidad de transportación de los medios robóticos de gran escala del modelo típico de FD. Su trabajo se apoya en la propuesta de una plataforma flexible y transportable para un SMR constituido por BRI. La investigación, aunque trata una solución para la transportabilidad, éste sigue el criterio de utilizar medios de gran escala incorporados en una estación móvil de construcción.

También, Petersen et al. (2019) realizan un estudio sobre la construcción robótica colectiva. Clasifican los SMR de acuerdo con principios de construcción colectiva natural trasladados al ámbito de la robótica. Concluyen que, aunque la naturaleza provee amplias pruebas para lograr que la construcción colectiva sea robusta, adaptable y escalable, las demostraciones actuales se encuentran limitadas a ensamblajes pequeños de materiales simulantes, con pocos robots y ejecutados en ambientes controlados.

Melenbrink et al. (2020) desarrollan una revisión de literatura basada en la construcción robótica autónoma en sitio. Los autores evidencian los límites de efectividad que los medios maduros de construcción tienen con su gran escala, y destacan que los esfuerzos actuales por automatizar totalmente la construcción no han logrado el objetivo en ningún ámbito. Consideran que una ruta prometedora puede ser la comunicación distribuida, la IC, y los materiales-robot (integración codependiente de la máquina, el material y el método de construcción). Así mismo, Dias et al. (2021), con su revisión, estructura una guía de proyectos, simuladores y plataformas para el desarrollo del modelo de IC llamado Inteligencia de Enjambre. Este trabajo se encuentra enfocado en la robótica, y no distingue aplicaciones específicas para la AIC.

Todas las anteriores revisiones de literatura no muestran una metodología sistemática que evidencie trazabilidad de procesos y condiciones de búsqueda bibliográfica, bases de datos fuente, criterios de selección y omisión, así como métricas, visualización o análisis bibliométrico de resultados. Sin embargo, Stielor et al. (2022) realizan una revisión sistemática centrada en estrategias de Modelado Basado en Agentes (MBAs) con aplicación en la Arquitectura. En este estudio, los autores clasifican los MBAs de acuerdo con su aplicación en el ámbito de la AIC y los atributos de comportamiento de los agentes. Consideran que los SMR (como agentes manipuladores) son una estrategia emergente y prometedora en la automatización de la construcción.

Así, el presente trabajo de Revisión Sistemática (RS) se encuentra enfocado en estudiar el Estado del Arte de la automatización en la AIC, mediante una búsqueda de recursos literarios, en las bases de datos reconocidas por tener grandes repositorios. También, busca contribuir con la automatización, la robótica e IA como temas de investigación. Esta revisión tiene los siguientes objetivos: (1) identificar los medios robóticos de automatización utilizados en los procedimientos de FD. (2) Clasificar los modelos, metodologías y estrategias que contribuyen a que los medios robóticos de automatización sean accesibles. (3) Analizar la aportación de la IC y los SMR en la accesibilidad de los medios de automatización. (4) Identificar brechas de investigación en la literatura.

2.2. Método

Esta Revisión Sistemática (RS) siguió las directrices del método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*), la cual, es una declaración (s/f) para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis (Urrútia y Bonfill, 2010)

propuesta por Liberati et al. (2009) y actualizada por Page et al. (2021). La revisión fue realizada desde febrero del 2022 a febrero del 2023.

2.2.1. Criterio de elegibilidad.

Como parte de las directrices a seguir por esta RS, fue necesario estructurar un criterio de inclusión y exclusión de recursos literarios diseñado con un carácter incremental. Esto significa que, a través de los criterios de inclusión fue identificado el conjunto de registros en las bases de datos para ser examinados y recuperados. Posteriormente, fue evaluado si alguno de los artículos es rechazado por alguno de los criterios de exclusión; en caso de ser así, ya no pasaría por alguna otra verificación o criterio de exclusión adicional.

2.2.1.1. Criterios de inclusión (CI).

CI-1: El artículo presenta el siguiente término en el título, resumen o palabras clave de autor: “*Digital Fabrication*” (búsqueda principal), “*Collective Robots*” e “*Artificial Intelligence*” (búsqueda secundaria 1), “*Fabrication*” y “*Swarm Intelligence*” o “*Multi-Agent*” (búsqueda secundaria 2). **CI-2:** Debe ser un artículo de investigación, de conferencia o sección de libro. **CI-3:** El artículo debe estar escrito en inglés o español. **CI-4:** El artículo debe ser del periodo 2018-2023.

2.2.1.2. Criterios de exclusión (CE).

CE-1: El artículo no se encuentra disponible (sin acceso abierto). **CE-2:** El artículo no se relaciona con “*Robótica*” o “*Robots Colectivos*”. **CE-3:** El artículo no se relaciona con “*Inteligencia Artificial*” o con “*Inteligencia Colectiva*” **CE-4:** El artículo no contribuye a la Arquitectura, la Construcción robótica o al diseño de un robot. **CE-5:** El tema del artículo no se centra en un Sistema Robótico, AI o Robots Colectivos (sólo para informes de texto completo).

2.2.2. Estrategia de búsqueda.

La estrategia fue desarrollada mediante tres capas de búsqueda; la primera, tuvo un carácter intuitivo, y no siguió un proceso sistemático. Esta primera revisión funcionó para hacer un reconocimiento general de los medios robóticos de automatización que se investigan en el marco de la FD aplicados a la Arquitectura. Los resultados de esta primera búsqueda, fueron recuperados de la red social académica *ResearchGate* (2023). Después fue realizada la búsqueda principal de este trabajo, bajo los lineamientos sistemáticos del método PRISMA, y a través de la recuperación de registros con el término de búsqueda “*Digital Fabrication*” (CI-1) en las bases de datos *Scopus* y *Web of Science*.

Estas dos bases de datos son reconocidas por tener un amplio repertorio de publicaciones de alta calidad, así como redes de conexión con repositorios y asociaciones de publicaciones científicas. Posteriormente, fueron realizadas dos búsquedas secundarias en las mismas bases de datos (con la misma metodología) para obtener una mayor robusticidad de resultados.

En la búsqueda principal, fue introducida la siguiente cadena en las base de datos correspondiente: TITLE-ABS-KEY ("*digital fabrication*"). Fueron filtrados automáticamente aquellos artículos resultantes de FD que incluían “*robotics*” con los operadores lógicos booleanos AND para agregar y OR para encontrar equivalencias. Así, la cadena de búsqueda fue: TITLE-ABS-KEY ("*digital fabrication*" AND "*robotics*" OR "*robot*" OR "*robotic building*" OR "*multi-robot systems*" OR "*multi-robot construction*" OR "*multi-robotic building*" OR "*collaborative robot construction*").

Para la búsqueda secundaria 1 fue introducida la siguiente cadena: TITLE-ABS-KEY ("*collaborative robots*" AND "*artificial intelligence*"); y para la búsqueda secundaria 2 se introdujo: TITLE-ABS-KEY ("*fabrication*" AND "*swarm intelligence*" OR "*multi-agent*").

2.2.3. Selección de estudios.

Primeramente, fueron recuperados automáticamente los artículos que incluían los términos anteriores en sus títulos, resúmenes y palabras clave a través de los motores de búsqueda de las bases de datos de acuerdo con el Criterio de Inclusión (CI). También, se aprovecharon estos motores para recuperar artículos que pasaron los filtros automáticos de disponibilidad de acceso, idioma inglés y español, el periodo 2018 a 2023, así como ser artículo de investigación, de conferencia o sección de libro.

Los registros recuperados fueron descargados de cada motor de búsqueda en los formatos RIS, BibTex y TXT para poder ser importados a diferentes plataformas de procesamiento, análisis y visualización bibliométrica. El formato RIS fue utilizado para ser importado al gestor de referencias bibliográficas *Zotero* (s/f), el cual, permitió procesar los registros y borrar los elementos duplicados. Después, fueron exportados los registros depurados de *Zotero* en formato RIS e importadas a la plataforma *SysRev* (Bozada et al., 2021) para realizar el proceso de curación bibliográfica. Con esta plataforma, fue posible aplicar los pasos de filtro de los CE, establecer etiquetas, y hacer revisión por varias personas para incluir y excluir recursos.

Esta fase de inclusión y exclusión involucró la lectura de títulos, palabras clave y resúmenes mediante dos investigadores y un auxiliar que, de manera independiente y ciega, realizaron la revisión. Este proceso de revisiones fue a distancia, con conexión a una sola base de datos en línea (*SysRev*). Cuando no hubo consenso con respecto a un artículo, éste fue registrado en la plataforma y etiquetado como retenido para un análisis cuidadoso en la fase de lectura completa de texto.

2.2.4. Proceso de recolección de datos.

La estrategia de extracción de datos también fue configurada en la plataforma *SysRev*, con el fin de centralizar en ésta, la estructura de datos para revisión y con posibilidad de ser exportado en hojas de cálculo para su análisis. Al momento de trasladar los artículos depurados de *Zotero* a *Sysrev*, fueron incorporados automáticamente los siguientes datos básicos: tipo de publicación, año, palabras clave, país de origen, así como nombre de la revista de publicación. También, la plataforma desarrolla un análisis de los términos más utilizados en los artículos recuperados. Posteriormente, fueron generadas (de manera manual) las etiquetas que caracterizarían el contenido de cada artículo recuperado para de esta forma realizar una clasificación. Las etiquetas fueron agrupadas en el siguiente orden: (1) *Enfoque de FD*, (2) *Material de FD* utilizado.

Los datos del primer grupo fueron para clasificar si el *enfoque de los estudios* con respecto a la FD es de: (1.1) Impresión 3D, (1.2) Materiales 4D, (1.3) Robótica, (1.4) Robots Colaborativos, (1.5) Realidad Aumentada, (1.6) IA, (1.7) Ensamblaje y Objetos Discretos, (1.7) Tejido, (1.8) Economía de Escala, (1.9) Simulación y Optimización, (1.10) Diseño Computacional, (1.11) Educativa, (1.12) FD en América Latina, (1.13) Teoría, (1.14) Estrategias de FD, (1.15) Sensores y Captación de Datos, (1.15) Corte CNC, (1.16) Ambiental y Sustentable, (1.17) Revisión y Estado del Arte, (1.18) Médico, (1.19) Patrimonio Cultural.

El segundo grupo fue para clasificar el *material constructivo* utilizado en el proceso de FD de cada estudio a través de las siguientes etiquetas: (2.1) Concreto, (2.2) Madera, (2.3) Polímero, (2.4) Acero o Metal, (2.5) Mampostería o Piedra, (2.6) Mixto o Variable, (2.7) Compuesto, (2.8) Textil, (2.8) Tierra (adobe, tapial, rústico), (2.9) Cerámica, (2.10) Vidrio o Cristal.

2.2.5. Análisis cuantitativo.

Esta fase inicio con el análisis del año, el tipo de publicación, y los autores que realizaron cada estudio. Posteriormente, fueron estudiados los datos extraídos mediante dos estrategias de análisis: (1) *análisis de visualización de redes* y (2) *análisis bibliométrico*.

Los mismos registros depurados en formato RIS, exportados de *Zotero*, fueron útiles para importarlos al programa *VOSviewer* (van Eck y Waltman, 2010), y así obtener una configuración inicial de dos topologías de red: (1) coocurrencia de palabras clave, y (2) coautoría de realización de los artículos. Estas dos redes iniciales, fueron exportadas de *VOSviewer* en formato GML, para posteriormente ser importadas a *Gephi* (Bastian, Heymann, y Jacomy, 2009), y así, realizar un *análisis de visualización de redes* de mayor profundidad. En este análisis fue evaluado la calidad de modularidad de las comunidades existentes en cada red, los índices de diversidad y equitatividad de cada comunidad, la cohesión estructural y conectividad de la red.

También, con los registros previamente exportados en formato BibTex y TXT, se importaron los recursos a la plataforma *Bibliometrix R-Tool* (Aria y Cuccurullo, 2017) para realizar un *análisis bibliométrico* con mayor amplitud, y de esta forma, medir los temas, autores, países, e instituciones de mayor impacto en el desarrollo e investigación de la FD.

2.2.6. Evaluación de calidad.

Los informes que cumplieron con todos los CI y que pasaron los filtros de CE, fueron conducidos a lectura de texto completo. La evaluación de calidad de estos textos fue administrada de acuerdo con dos enfoques: (1) *calidad por tipo de publicación*, y (2) *calidad por contenido y temática del artículo*.

El primer enfoque se encuentra relacionado con evaluar si el artículo es publicado en una revista, en una sección de libro o en una conferencia. El segundo enfoque analiza la metodología

y estrategia de FD, las características del medio robótico y si estas contribuyen con la accesibilidad tecnológica. Fueron asignados puntuaciones para cada rubro, los cuales, se promediaron para clasificar y jerarquizar la importancia de los estudios para esta RS. Así, las publicaciones de revista o sección de libro de investigación fueron calificadas con tres puntos, los artículos completos publicados en conferencia se les asignaron dos puntos, y los artículos cortos (también de conferencia) fueron calificados con un punto.

Con respecto al enfoque de calidad de contenido, aquellos estudios que trataban sobre estrategias de SMR, IC, sistemas de IE, o Robótica Colectiva aplicados en la Arquitectura y Construcción fueron calificados con tres puntos. Los artículos que se referían a procesos de Robótica, Automatización e IA, que no implicaban estrategias de multiplicidad o IC y que, sin embargo, aportaban a la accesibilidad tecnológica en la FD fueron calificados con dos puntos. Los artículos relacionados con temas de Diseño de un Robot, sin aplicación arquitectónica-constructiva, o que trataban temas generales de Robótica, IA, FD, o Educativos fueron calificados con un punto.

2.3. Resultados

2.3.1. Selección de estudios.

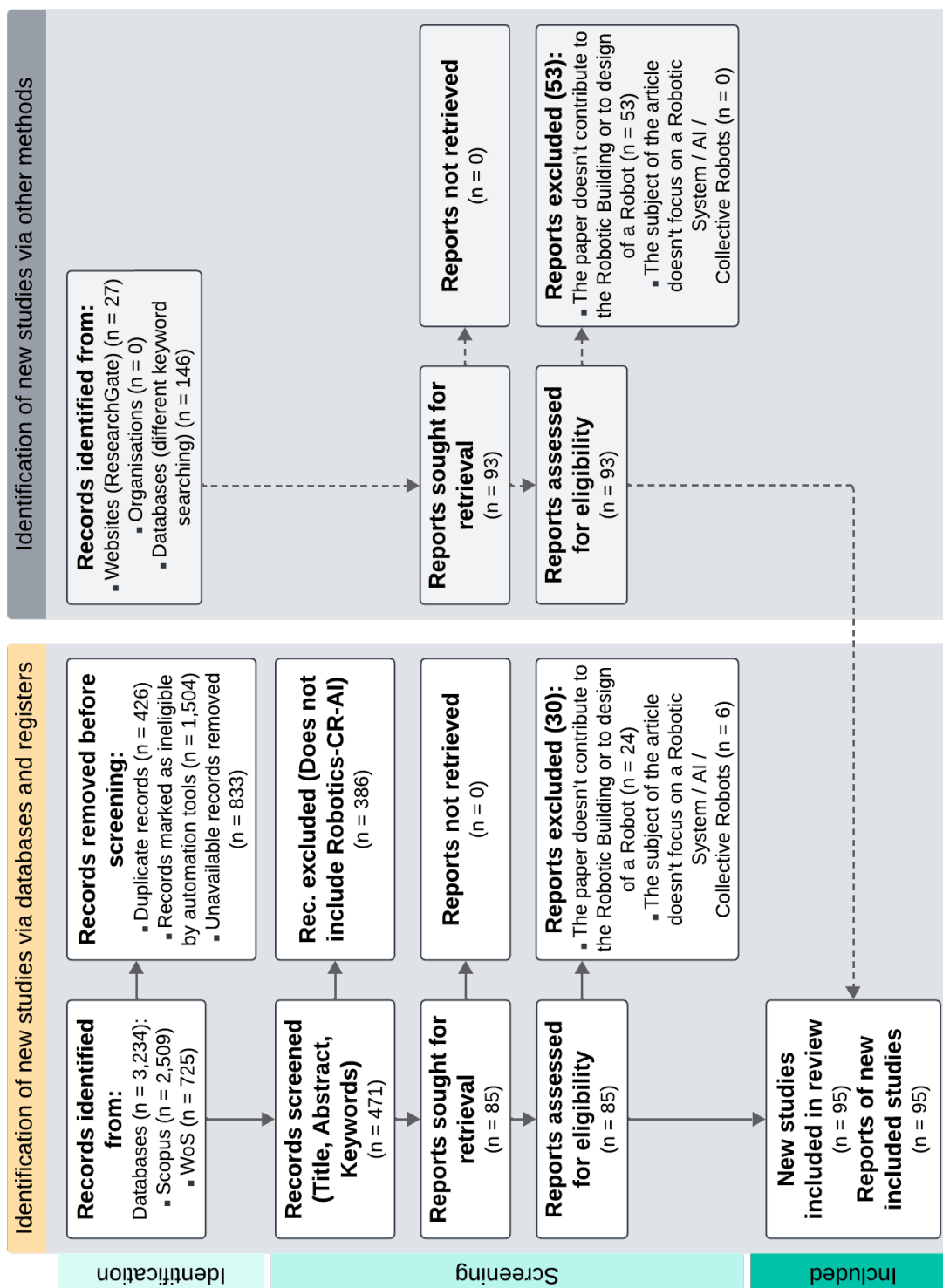
La selección de estudios continuó con los lineamientos propuestos por el método PRISMA (Liberati et al., 2009; Page et al., 2021). Los resultados obtenidos directamente en las bases de datos de la búsqueda principal fueron de 3,234 registros (Scopus n=2,509, WoS n=725), de los cuales, fueron descartados 1,504 registros por los filtros automáticos aplicados en los motores de búsqueda. También, fueron eliminados 833 registros sin acceso abierto, así como otros 426 por ser duplicados.

De esta manera, restaron 471 registros únicos para ser examinados en la segunda fase del proceso con la lectura del título, resumen y palabras clave. En esta fase, 386 artículos fueron excluidos por no incluir los temas de “Robótica”, “Robots Colectivos” e “IA”. Así, restaron 85 elementos en calidad de informes recuperados para lectura completa. En este sentido, 30 artículos fueron descartados por no dirigirse a la construcción arquitectónica mediante robots o al diseño robótico en su temática, a pesar de que, en el título, resumen o palabras clave si incluían los términos. El resultado final de esta evaluación arrojó una cantidad de 55 informes de importancia para realizar estudios.

Por otro lado, en las búsquedas secundarias (1 y 2) se identificó un total de 146 registros únicos examinados, así como otros 27 provenientes de la primera búsqueda intuitiva. De ese total, 93 informes fueron analizados con lectura completa, sin embargo, 53 elementos fueron excluidos por no contribuir a la construcción robótica (arquitectónica), o al diseño de robots. Después de todo este proceso (Figura 4), un total 95 informes fueron incluidos para realizar estudios en esta revisión.

Figura 4.

Diagrama de flujo basado en el método PRISMA (Liberati et al., 2009; Page et al., 2021) para el desarrollo de la RS.



Nota. Elaboración propia (2023).

Los primeros registros recuperados para revisión (471 artículos), fueron considerados como el primer universo de análisis de la revisión. Este primer análisis corresponde a una visión

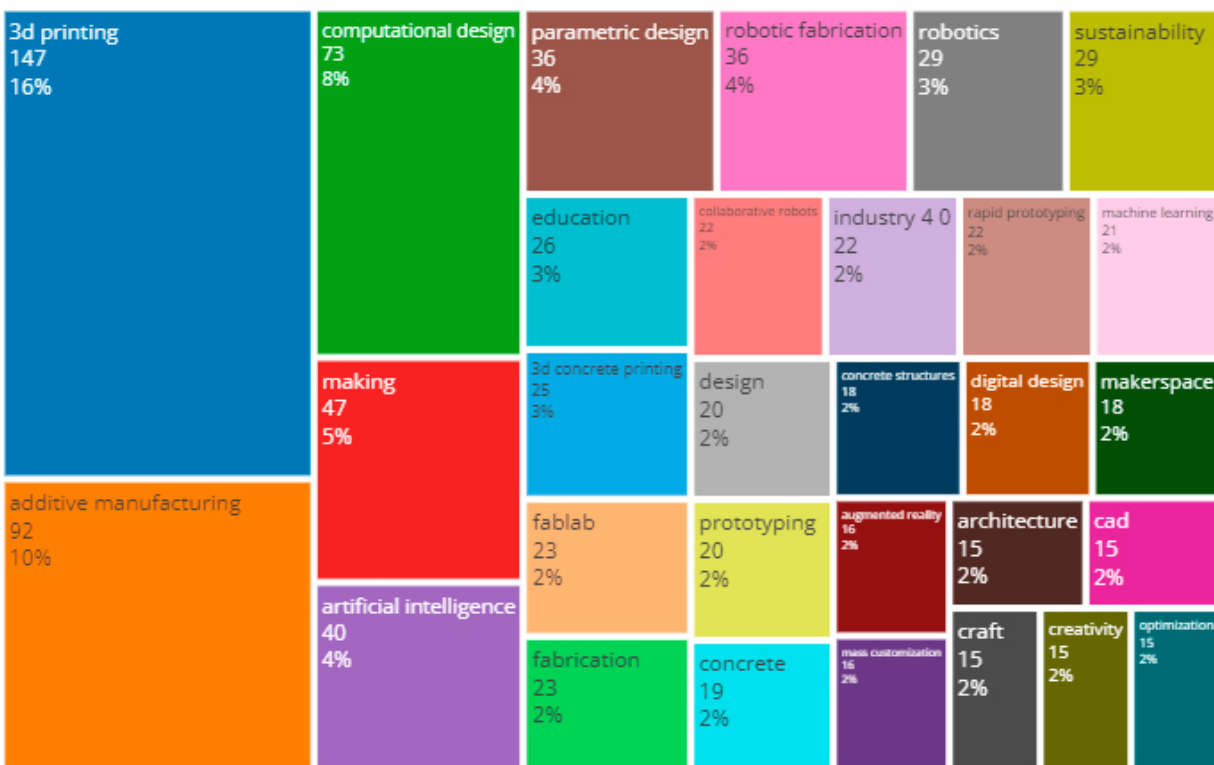
general de resultados, el cual, fue importante para conocer el contexto de los *tópicos, países y autores* de mayor impacto en la investigación de la Fabricación Digital (FD). El término con mayor recurrencia en la investigación fue la misma “FD” como palabra clave más representativa, con un valor de 673 sobre el universo completo de registros recuperados. Después de este término, el porcentaje de aparición de las palabras clave se encuentra distribuido dosificadamente.

Así, al quitar el término FD en el análisis, fueron obtenidos los siguientes resultados: “impresión 3D” es el término de mayor relevancia con 147 ocurrencias (2% con respecto a la totalidad de palabras clave), seguido por la “fabricación aditiva” con una recurrencia de 92 (1%), “diseño computacional” con 73 (1%), “*making*” con 47 (1%), “IA” con 40 (1%), “diseño paramétrico” con 36 (1%) y “fabricación robótica” con 36 (1%). Cabe mencionar, que términos como “impresión 3D con concreto” tiene una representación de 25 (0.38%), y “robots colaborativos” con 22 (0.33%). A continuación, se muestra una relación palabras clave más utilizadas en los resultados de búsqueda de la revisión (Figura 5).

Figura 5.

Relación de palabras clave más utilizadas: arriba diagrama “TreeMap” con representación de 30 palabras clave, abajo diagrama “WordCloud” con muestra de 100 palabras clave más investigadas en la FD.

Tree



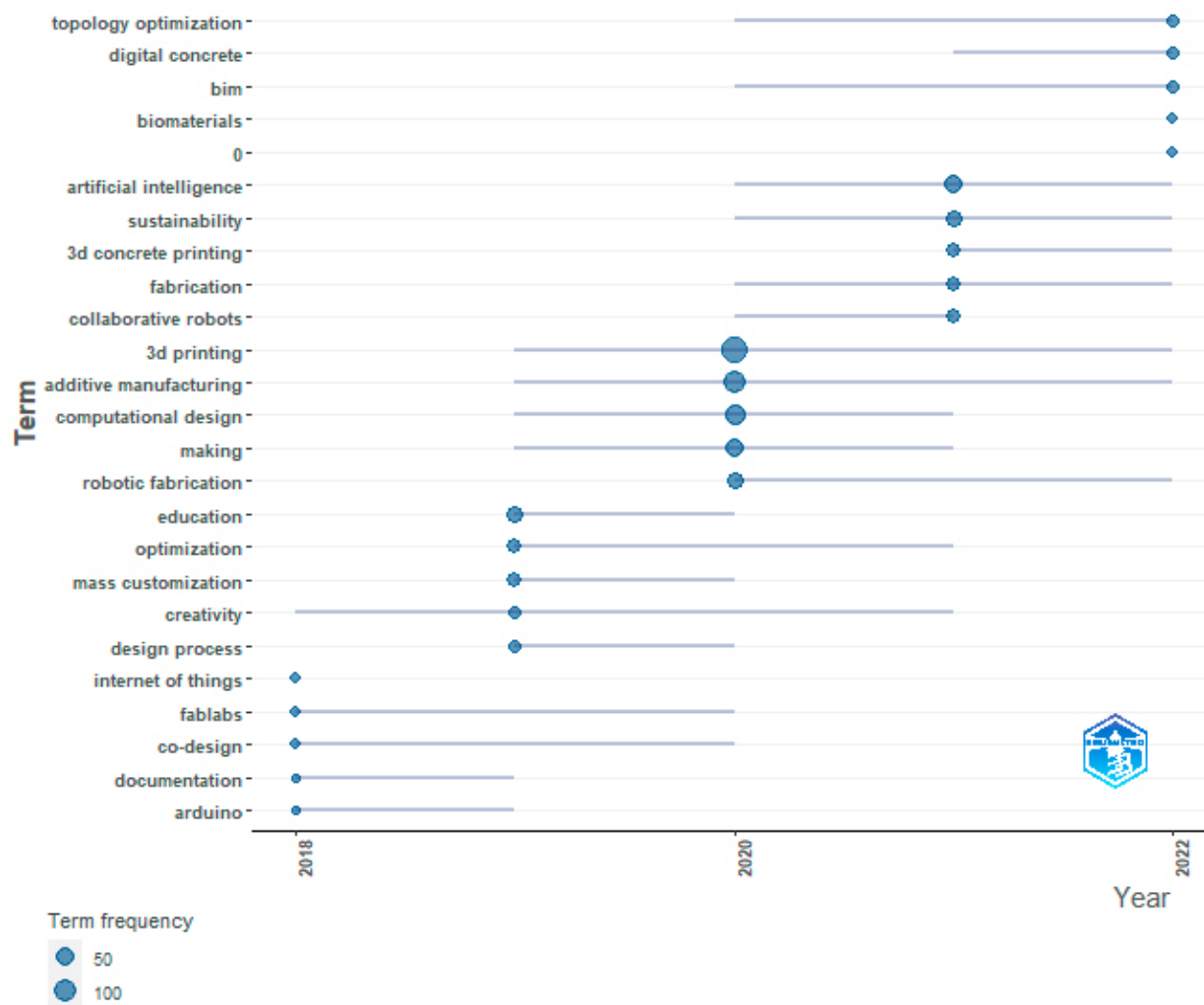
Nota. Los porcentajes mostrados son en función de la cantidad de palabras clave. Diagrama realizado a través de *Bibliometrix R-Tool* (Aria y Cuccurullo, 2017). Elaboración propia (2023).

También es mostrada la tendencia de tópicos con respecto al tiempo, en la cual, es posible verificar que el término “*Internet of Things (IoT)*” tiene una mayor frecuencia (8) en el año 2018,

“educación” en el 2019 (26), “impresión 3D” en el 2020 (147), “IA” en el año 2021 (40), y “optimización topológica” con una mayor frecuencia (14) en el año 2023 (Figura 6). El término “robots colectivos” comienza a ser frecuente en el periodo 2020 a 2021, con un valor de 22 ocurrencias y sin seguimiento de tendencia en el año 2023.

Figura 6.

Tendencia de tópicos más investigadas en la FD con relación al tiempo.

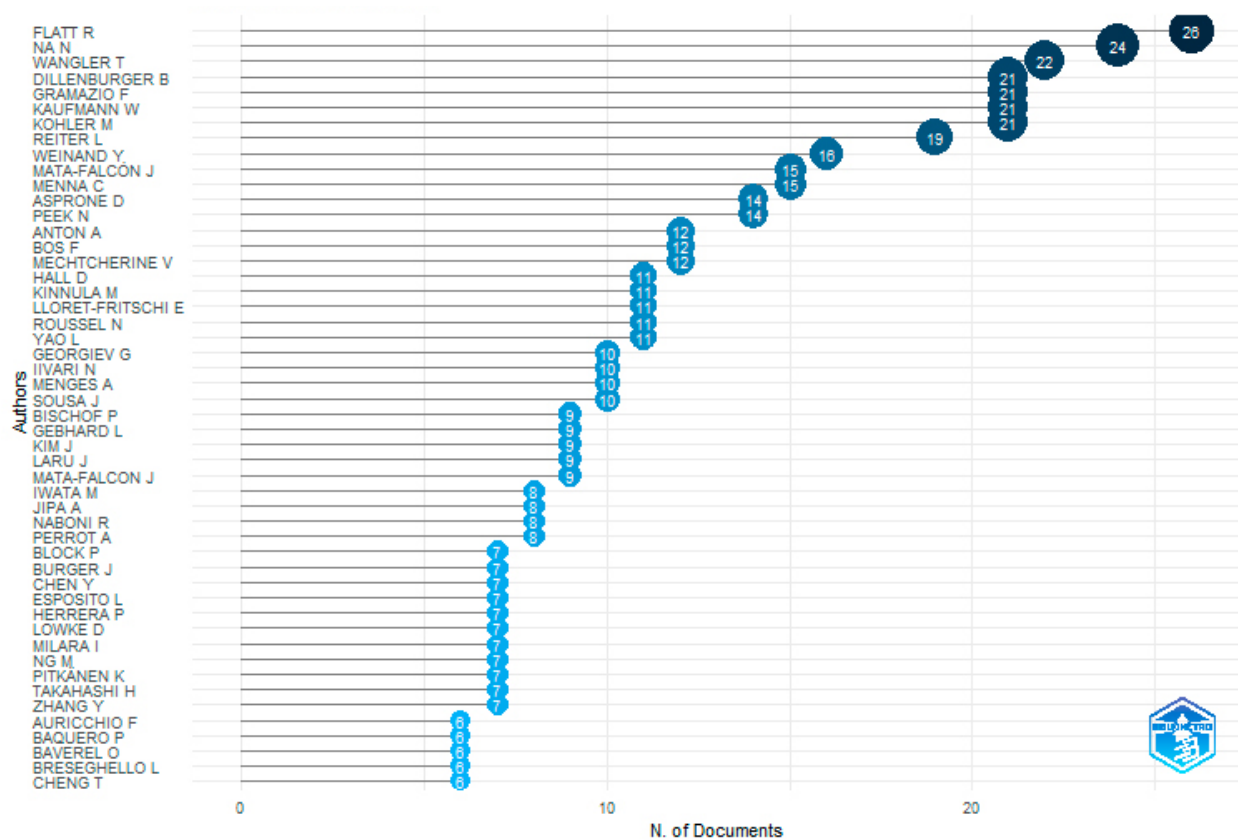


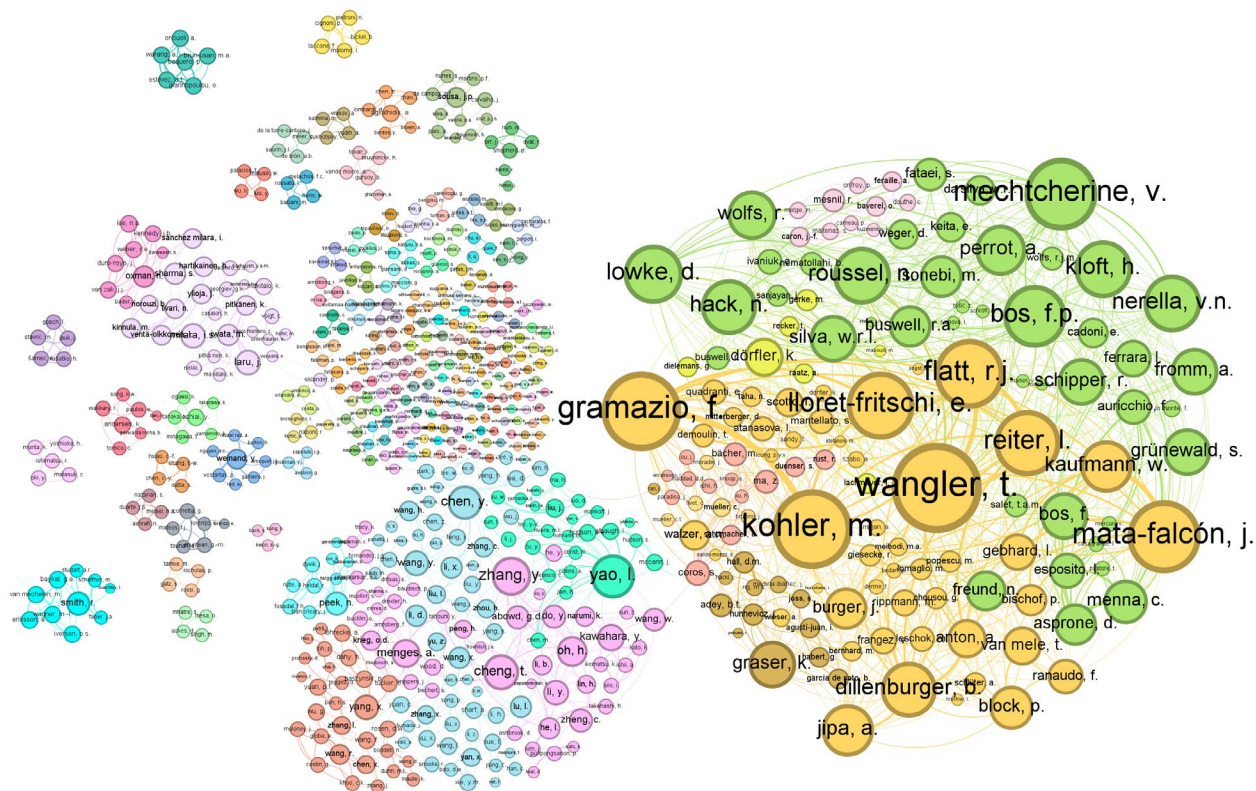
Nota. Gráfica realizada a través de *Bibliometrix R-Tool* (Aria y Cuccurullo, 2017). Elaboración propia (2023).

En cuanto a autores de mayor relevancia en la investigación de la FD, se encuentran: (1) Flatt, R. con 26 documentos relacionados, (2) Na, N. con 24, (3) Wangler, T. con 22, (4) Dillenburger B. con 21, (5) Gramazio, F. con 21, (6) Kaufmann W. con 21, (7) Kohler M. con 21, (8) Reiter, L. con 21, (9) Weinand, Y. con 19, y (10) Mata-Falcón, J. con 16, por mencionar a los primeros 10 de una lista de 50 (Figura 7a). Todos estos autores, se encuentran relacionados en una red de investigación consolidada y afiliada a la Escuela Politécnica Federal de Zurich (ETH) de Suiza, a excepción de Na, N. y Weinand, Y. (Figura 7b).

Figura 7.

(a) Lista de autores (50) de mayor relevancia -arriba- y (b) redes de colaboración investigativa en la producción científica de la FD -abajo-.





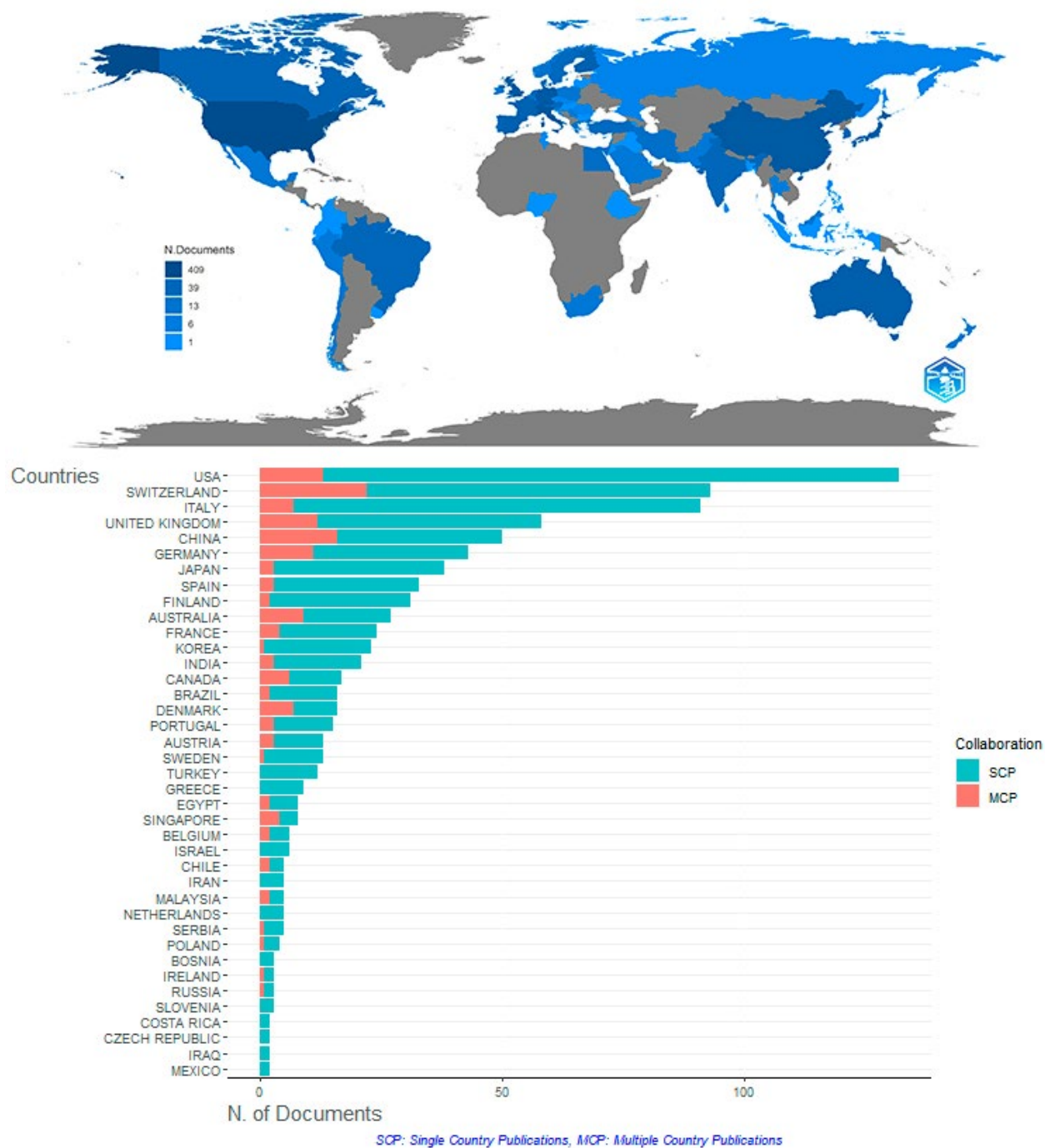
Nota. Arriba: gráfica realizada a través de *Bibliometrix R-Tool* (Aria y Cuccurullo, 2017). Abajo: análisis de red realizada a través de *Gephi* (Bastian et al., 2009). Recuperado de *Ecosystem Visualization and Diversity Analysis of the Fourth Digital Age in Architecture* (p.1192), por Onchi-Rascón et al. (2023), *SIGraDi 2023 Accelerated Landscapes*.

Así, con respecto a los diez países que más contribuyen con publicaciones relacionadas con el tema, y que corresponden con los autores de mayor impacto, se encuentran: (1) Estados Unidos, (2) Suiza, (3) Italia, (4) Reino Unido, (5) China, (6) Alemania, (7) Japón, (8) España, (9) Finlandia, y (10) Australia. De esta manera, Suiza, China, Estados Unidos, Reino Unido y Alemania (consecutivamente) son los países de mayor colaboración internacional, a través de publicaciones realizadas en cooperación con investigadores de múltiples afiliaciones y naciones. Es importante destacar que, dentro de los primeros 40 países enlistados, Brasil, Chile, Costa Rica

y México, corresponden a Latinoamérica con posiciones que se encuentran desde la parte media, hasta la última (Figura 8).

Figura 8.

Lista de países (40) con mayor contribución en la producción científica de la FD.

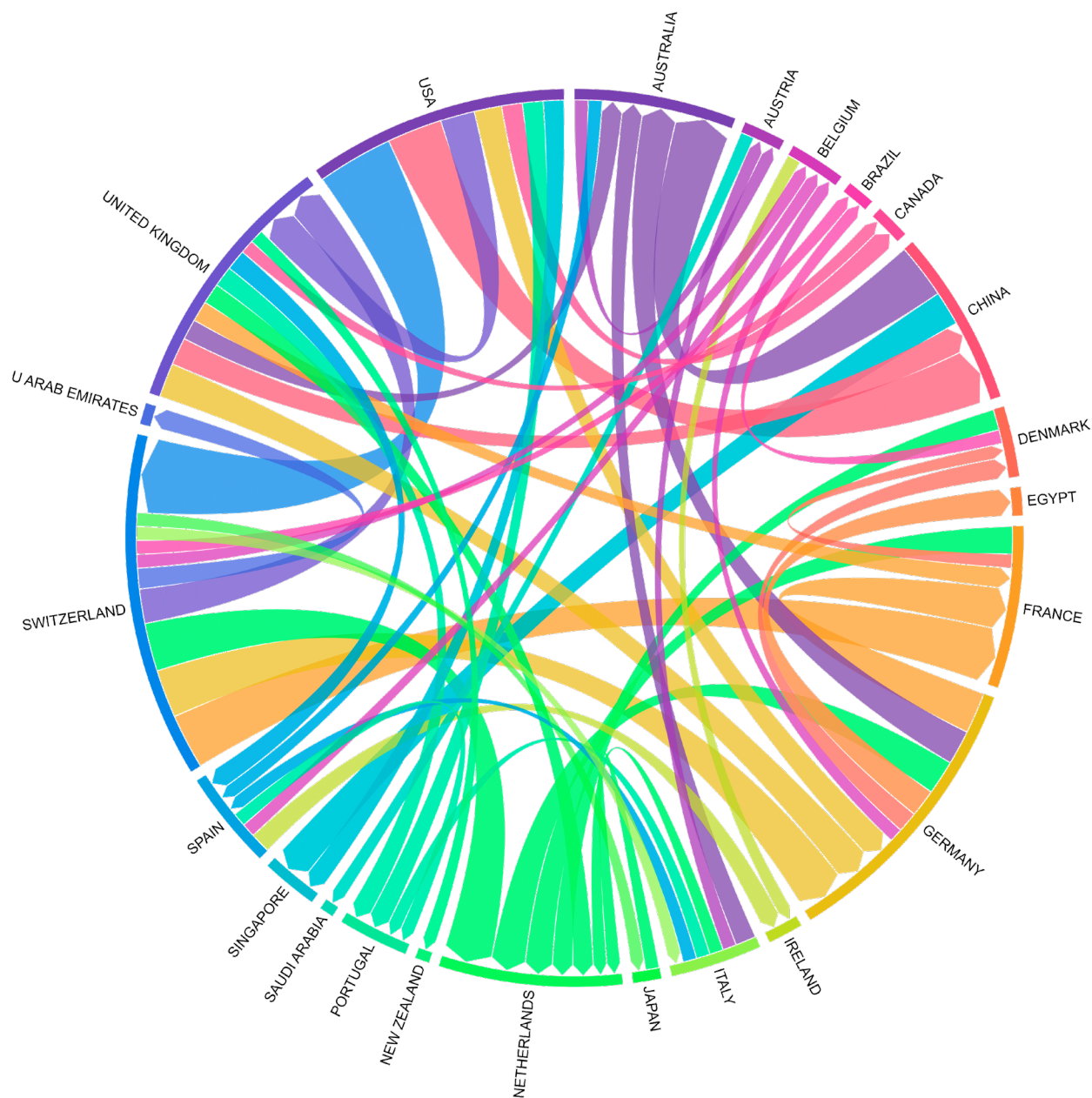


Nota. Gráfica realizada a través de *Bibliometrix R-Tool* (Aria y Cuccurullo, 2017). Elaboración propia (2023).

Con respecto a las redes colaborativas entre países (Figura 9), las publicaciones de (1) Suiza, principalmente se vinculan con autores de Francia, Alemania y Países Bajos. Así mismo, (2) China con Australia y Singapur. (3) Estados Unidos, se relaciona principalmente con Suiza y China, en menor medida, con Reino Unido y Alemania. (4) Reino Unido con Alemania, China y Australia. Finalmente, (5) Alemania con Francia, Australia y Países Bajos.

Figura 9.

Redes colaborativas entre los principales países (50) con mayor contribución en la producción científica de la FD.



Nota. Realizado a partir *D3 | Observable, Chord Diagram* (Bostock, 2024a). Elaboración propia (2023).

2.3.2. Características del estudio y resultados.

A continuación, es presentada una síntesis de las características extraídas de los resultados mediante los *enfoques de evaluación* de los artículos seleccionados (95), para realizar

informes a partir de su lectura completa, con el fin de dirigirla a resolver los cuatro objetivos iniciales de la presente Revisión Sistemática (RS).

2.3.2.1. Evaluación de calidad.

A partir de los *dos enfoques*, con los que se realizó la *evaluación de calidad de documentos* filtrados para lectura completa, fue obtenido como resultado lo siguiente (Figura 10): con respecto a la *calidad de tipo de publicación*, 60 trabajos (57%) de los 95, corresponden a artículos de revista de investigación o a sección de libro, 32 a artículos completos de conferencia (30.4%), y tres a artículos de conferencia cortos (7.6%). Existe, por tanto, una mayor cantidad de artículos de investigación y secciones de libro, los cuales, por sus cualidades de extensión y detalle informativo, obtuvieron predilección y mayor valor calificativo (180 puntos en conjunto) sobre los demás.

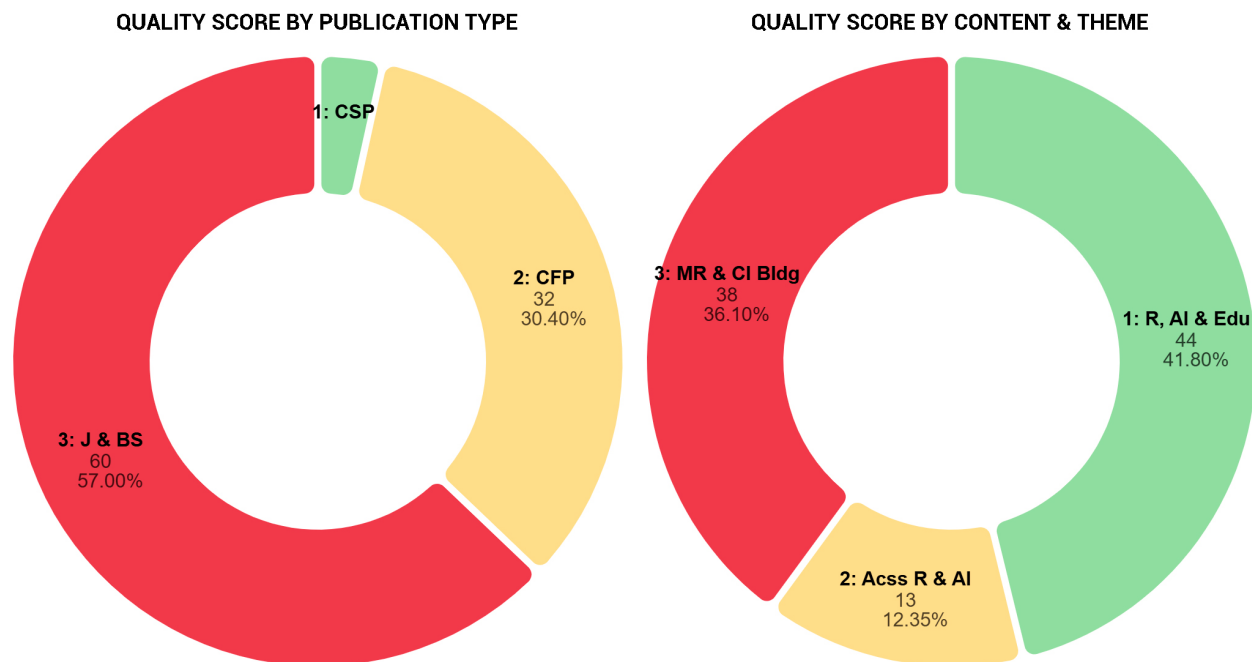
De la misma manera, con relación a la *calidad por tema y contenido*, el resultado fue una cantidad de 44 artículos que abordan temas generales de “Robótica, IA y Educación” (44.8%), seguido por 38 publicaciones con temas relacionados con “Construcción Multi Robótica e IC” (36.1%), y finalmente, una cantidad de 13 trabajos tratan temas de “Robótica e IA accesible” (12.35%). Así, aunque el conjunto de artículos que se centran en temas generales de robótica, IA y educación tienen una puntuación menor (44 puntos en total), en cuanto a cantidad son los dominantes de la selección para realizar los informes de lectura completa.

Sin embargo, los artículos con mayor valoración (114 puntos en conjunto) que se refieren a la construcción multi robótica e IC, por cantidad, casi alcanza al rubro dominante. Este resultado es importante, ya que serán los artículos a los que se les prestará mayor atención para su análisis. Por otro lado, también existe un grupo de artículos que presentan otras estrategias y metodologías para contribuir a la accesibilidad de medios robóticos en la FD, el estudio de éstos

también es importante para los objetivos de la presente RS, sin embargo, obtuvieron la última posición con 26 puntos en total.

Figura 10.

Resultados de la evaluación de calidad de documentos seleccionados para lectura completa.



Nota. Gráfica realizada a partir *D3 | Observable, Donut Chart* (Bostock, 2024b). Elaboración propia (2023).

2.3.2.2. Enfoques de fabricación digital.

De acuerdo con proceso de agrupamiento de artículos realizado en esta RS (previamente mostrado) y el análisis correspondiente a los 95 trabajos que fueron seleccionados, la clasificación de *enfoques* con la que se desenvuelve la investigación de la FD arrojó las siguientes relaciones (Tabla 1) de acuerdo con la evaluación de calidad por contenido y tema:

Para la cantidad de artículos calificados con tres puntos (38), correspondientes a *Construcción Multi Robótica e IC*, el tema de “robots colaborativos” es el que presentó mayor cantidad de ocurrencias (28) con un porcentaje del 13.3% de toda la recurrencia (211). Los

tópicos de “robótica”, así como “simulación y optimización”, presentaron la misma posición con 27 apariciones (12.8%), seguido por “IA” con 25 ocurrencias (11.8%). En quinto lugar, se encuentra “diseño computacional” con una recurrencia de 19 (9%).

Por otro lado, en el caso de trabajos evaluados con dos puntos (*Robótica e IA accesible*) hubo una reiteración total de 67. En primer lugar, se encuentra “robótica” con 12 (17.9%); después, “simulación y optimización” presentó ocho ocurrencias (11.9%). Tanto “impresión 3D”, como el tema de “ensamblaje y objetos discretos”, tuvieron la misma cantidad de recurrencia (siete, 10.4%). Finalmente, “estrategias de FD” apareció seis veces (9%).

En el conjunto de artículos que obtuvieron un punto (*Robótica, IA y Educación*), las ocurrencias totales fueron 139 y los temas dominantes se enlistan de la siguiente manera: “robótica” en primer lugar con una cantidad de 43 reiteraciones (30.9%), “simulación y optimización” presentó 18 ocurrencias (12.9%). También, los temas “ensamblaje y objetos discretos”, así como “diseño computacional”, tuvieron una recurrencia de 14 (10.1%), en quinto lugar, “impresión 3D” apareció 13 veces (9.4%).

Tabla 1.

Enfoques con mayor recurrencia en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.

3: MR & CI Bldg			2: Acss R & AI			1: R, AI & Edu		
Enfoque	Recurrencia	%	Enfoque	Recurrencia	%	Enfoque	Recurrencia	%
CoRo	28	13.3	Ro	12	17.9	Ro	43	30.9
Ro	27	12.8	S&O	8	11.9	S&O	18	12.9
S&O	27	12.8	3DP	7	10.4	A&DO	14	10.1
AI	25	11.8	A&DO	7	10.4	CD	14	10.1
CD	19	9.0	DFS	6	9.0	3DP	13	9.4
Otros	85	40.3	Otros	27	40.3	Otros	37	26.6

Nota. CoRo: robots colaborativos; Ro: robótica; S&O: simulación y optimización; AI:

inteligencia artificial; CD: diseño computacional; 3DP: impresión 3D; A&DO: ensamblaje y objetos discretos; DFS: estrategias de fabricación digital. Elaboración propia (2023).

La relación temática anterior, muestra un sesgo natural hacia la “robótica” por el procedimiento de búsqueda en esta RS. Sin embargo, existen otras relaciones importantes que este análisis comparativo permite apreciar con respecto a la FD. Por ejemplo, en el grupo de artículos calificados con tres puntos, encabeza la lista “robots colaborativos” en lugar de “robótica”, temática que se encuentra en primera posición de los otros grupos.

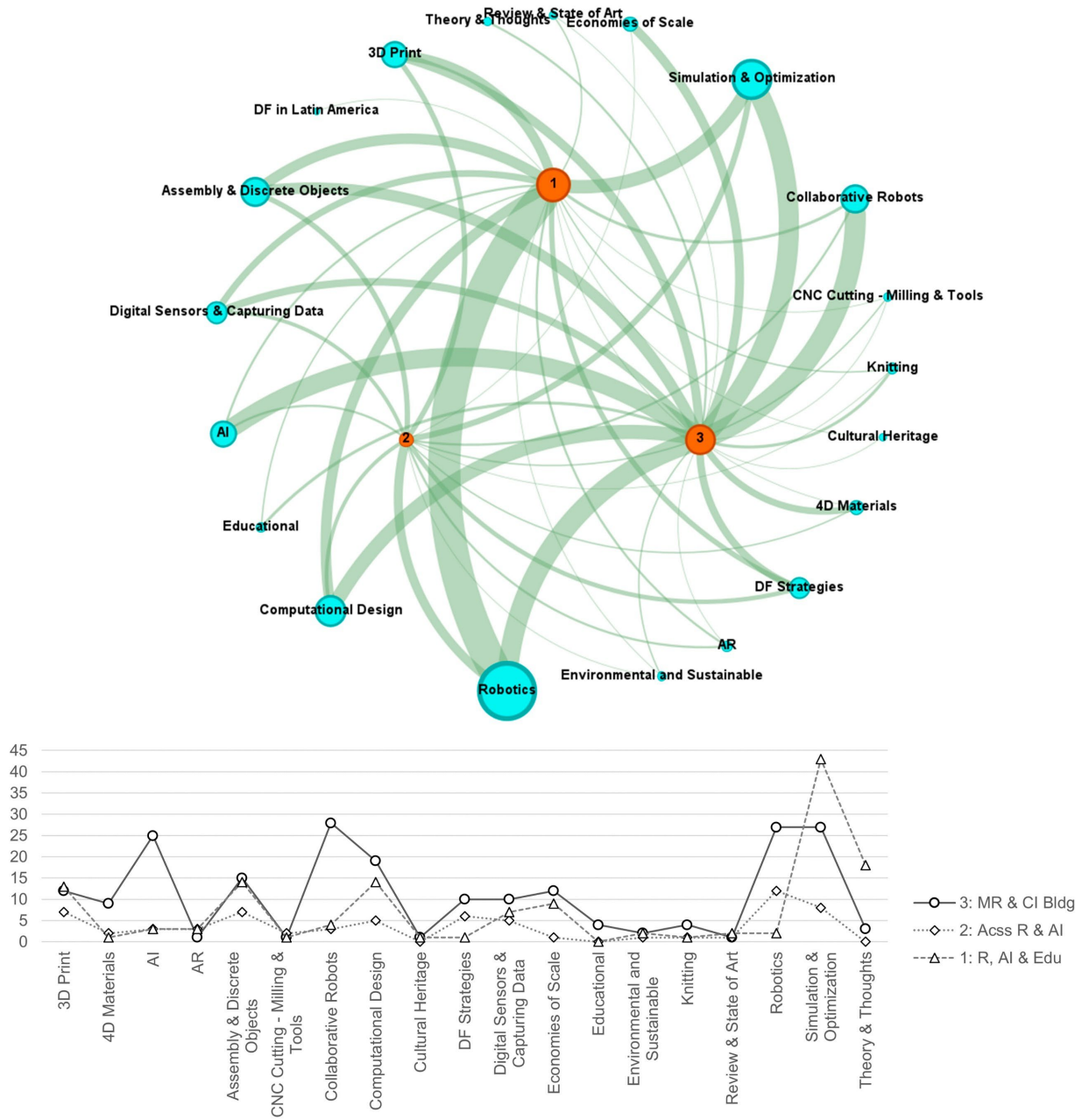
Por otro lado, es posible apreciar que el tópico “simulación y optimización”, de carácter virtual, se encuentra presente en los primeros lugares de los tres rubros como mecanismo utilizado de manera recurrente en la FD. En los grupos que obtuvieron dos y un punto, existe una mayor inclinación hacia métodos y tecnologías operativas de fabricación como “impresión 3D”, “ensamblaje y objetos discretos”, “estrategias de FD” o “sensores digitales y recolección de datos”.

A continuación (Figura 11) es mostrada la relación total de enfoques clasificados en esta RS. En esta comparativa, también puede distinguirse que los dos primeros grupos mejor calificados, incorporan con mayor frecuencia estrategias alternativas en los procesos de FD como la “IA” o los “materiales 4D”.

La primera, puede contribuir con el sistema de interacción del medio robótico; mientras que la segunda, trata sobre elementos constructivos que son actuantes o se adaptan de manera responsiva a estímulos externos (Chang, Huang, y Datta, 2019), y así, facilitar el trabajo del robot en la solución de tareas. También, bajo esta estrategia, el robot puede desempeñar el papel del material con características programadas para la construcción (Claypool, 2019; Leder et al., 2022).

Figura 11.

Relación de enfoques en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.



Nota. Gráfica realizada a través de Gephi (Bastian et al., 2009). Elaboración propia (2023).

2.3.2.3. *Materiales constructivos.*

Otro aspecto importante considerado en esta RS es la relación de materiales utilizados en los procesos de FD (Tabla 2) bajo los enfoques previamente descritos. En este sentido, los artículos mejor calificados (tres puntos) tuvieron 52 ocurrencias de materiales, entre las cuales, los *polímeros* fueron el material más usado con 13 apariciones (25%), seguido por la *madera* con una cantidad de 10 apariciones (19.2%). El tercer puesto correspondió a *materiales mixtos o variables* con siete ocurrencias (13.5%). En cuanto grupo puntuado con dos de calificación, las ocurrencias totales fueron de 18 con la *madera* como el material más utilizado una recurrencia de cinco (27.8%), Seguido por *polímeros* con cuatro apariciones (22.2%). Después, aparecieron *materiales compuestos* con tres ocurrencias (16.7%).

Finalmente, los documentos con menos puntuación tuvieron una totalidad de 59 reiteraciones. Contrario a las relaciones anteriores, el resultado mostró un claro dominio del *concreto* como material más utilizado en las investigaciones con 16 apariciones (27.1%). El segundo puesto, correspondió a los *polímeros* con 10 ocurrencias (16.9%); en tercer lugar, fueron investigaciones que no aplicaban algún material en sus procesos.

Tabla 2.

Materiales con mayor recurrencia en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.

3: MR & CI Bldg			2: Acss R & AI			1: R, AI & Edu		
Material	Recurrencia	%	Material	Recurrencia	%	Material	Recurrencia	%
Polímero	13	25.0	Madera	5	27.8	Concreto	16	36.4
Madera	10	19.2	Polímero	4	22.2	Polímero	10	22.7
Variable	7	13.5	Compuesto	3	16.7	NA	7	15.9
Otros	22	42.3	Otros	6	33.3	Otros	26	44.1

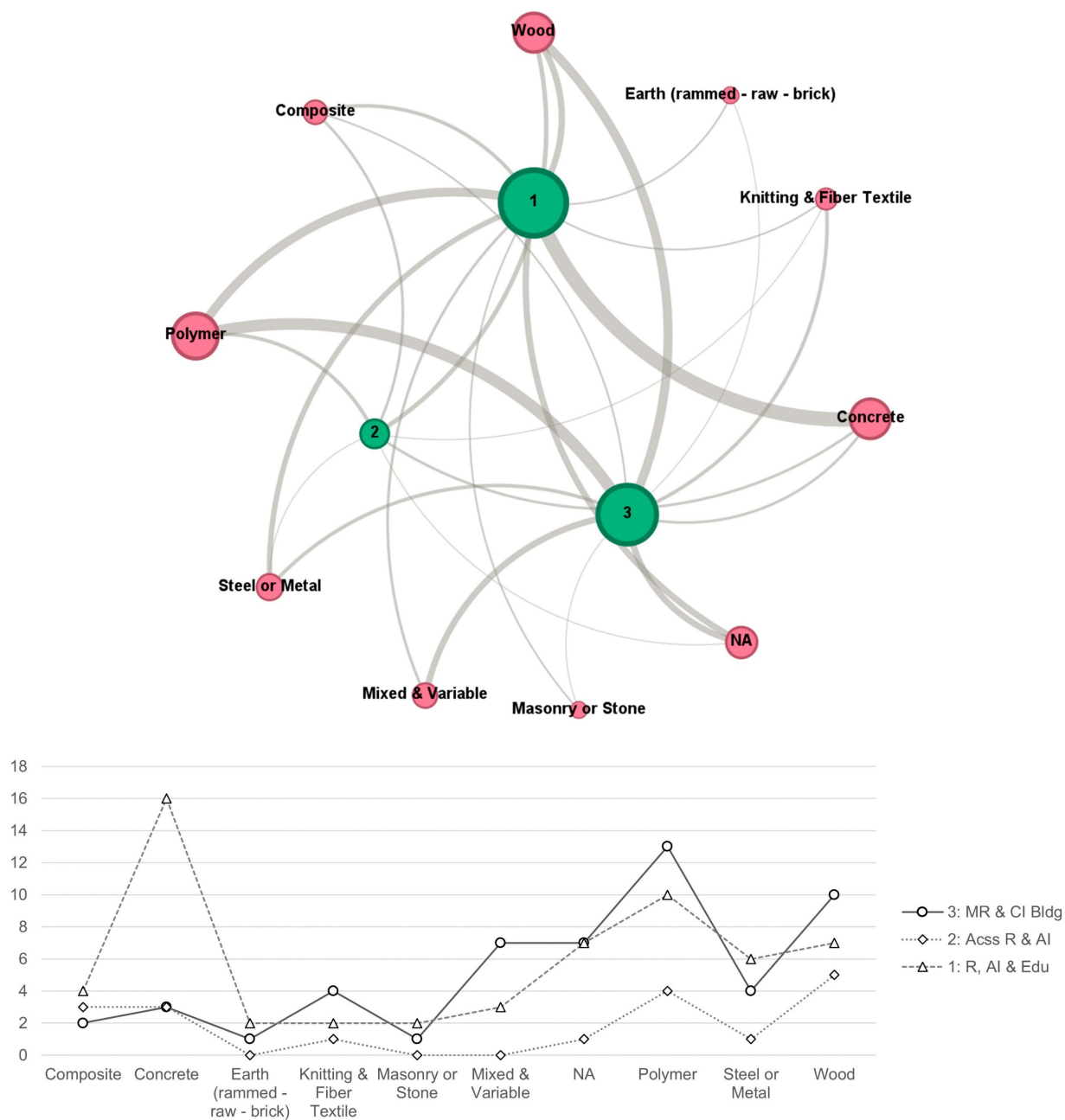
Nota. Elaboración propia (2023).

A diferencia de los trabajos evaluados con menos calificación, en los dos primeros grupos, la *madera* se encuentra en las primeras posiciones. También, es posible verificar que los *polímeros* son los materiales con los que más se experimenta en todos los artículos analizados,

por tanto, es uno de los materiales que más se ha adaptado a los procesos de FD. A continuación, es mostrada la relación completa de materiales distinguidos en la revisión (Figura 12).

Figura 12.

Relación de materiales utilizados en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.



Nota. Gráfica realizada a través de *Gephi* (Bastian et al., 2009). Elaboración propia (2024).

2.3.2.4. Medios robóticos.

También, el análisis de los medios robóticos utilizados en las investigaciones sobre la FD es un elemento importante para estudiar (Tabla 3). Así, los resultados arrojaron para los artículos mejor calificados un total de 117 repeticiones, donde “sistemas multi-robóticos” con 24 incidencias (20.5% del total) representa el mayor uso. Después, “AMR” (siglas en inglés de “robot móvil autónomo”) y “robots de pequeña escala” presentaron 17 ocurrencias (14.5%). En el caso de los artículos agrupados con dos puntos de calificación, una totalidad de 29 ocurrencias son distribuidas entre los siguientes sistemas robóticos utilizados: “brazo robótico” encabeza la lista de incidencias con ocho (27.6%), “extrusor robótico” obtuvo el segundo lugar con una reiteración de cinco (17.2%), seguido por “máquina CNC” con 4 ocurrencias (13.8%).

Por último, con respecto a los trabajos con menor calificación, el total de recurrencias fue del 93, en las que “brazo robótico” tuvo una recurrencia de 35 (37.6%); en segunda posición, “componente robótico personalizado” alcanzó un total de 18 apariciones (19.4%); en tercer lugar, “extrusor robótico” tuvo una frecuencia de 9 (9.7%).

Tabla 3.

Medios robóticos recurrentes en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.

3: MR & CI Bldg			2: Acss R & AI			1: R, AI & Edu		
Medio	Recurrencia	%	Medio	Recurrencia	%	Medio	Recurrencia	%
MRS	24	20.5	RArm	8	27.6	RArm	35	37.6
AMR	17	14.5	REx	5	17.2	CRC	18	19.4
SSR	17	14.5	CNC	4	13.8	REx	9	9.7
Otros	59	50.4	Otros	12	41.4	Otros	31	33.3

Nota. MRS: sistema multi-robótico; AMR: robot móvil autónomo; SSR: robot de pequeña

escala; RArm: Brazo robótico; REx: extrusor robótico; CNC: máquina CNC; CRC: componente robótico personalizado. Elaboración propia (2023).

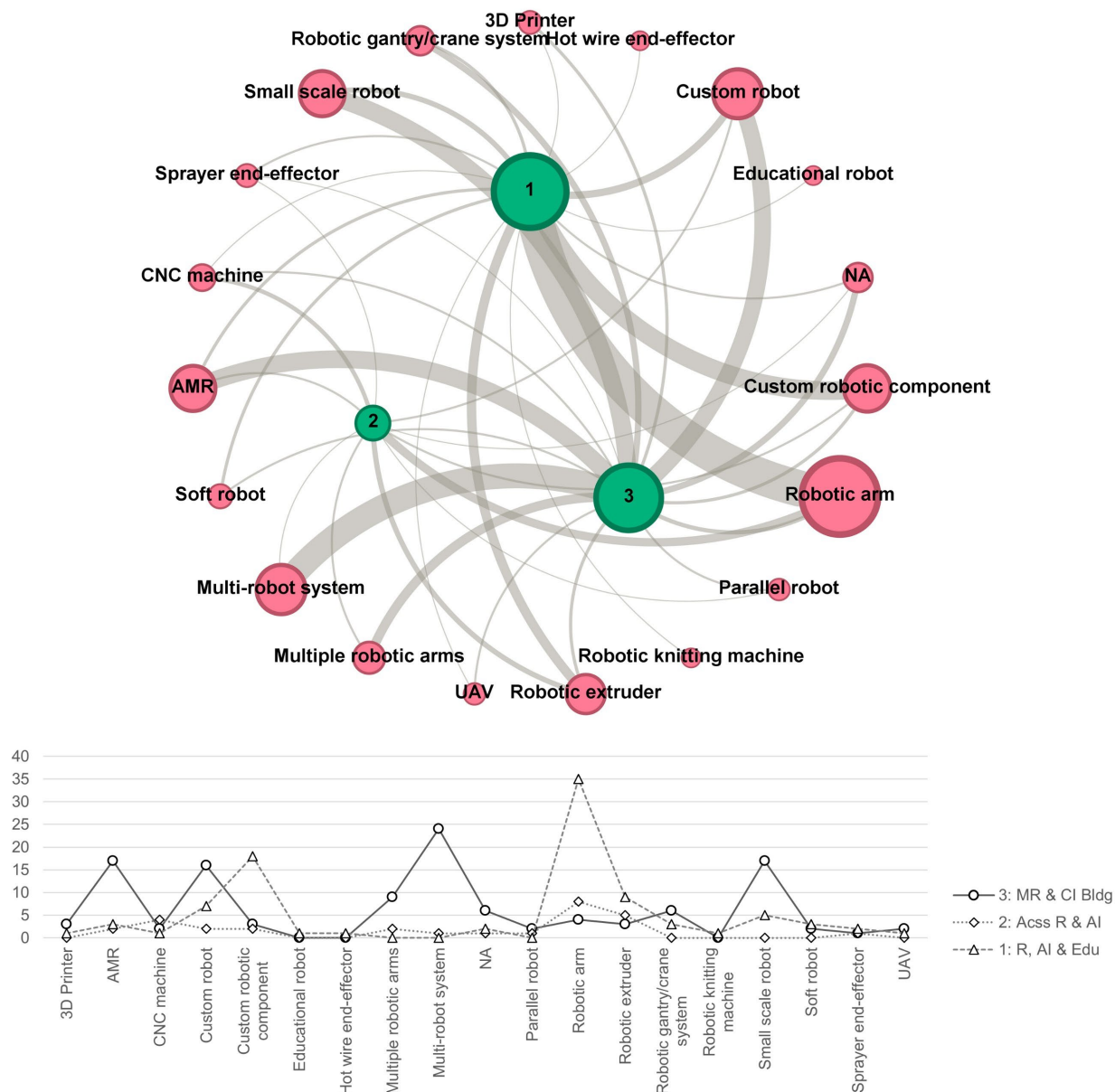
La relación resultante de medios robóticos utilizados en la investigación de la FD muestra un claro dominio del “brazo robótico” como el sistema predilecto para los procesos de automatización de la AIC. Los grupos de artículos que corresponden a la calificación de dos y un punto presentan este sistema en primer lugar de la lista. Es importante mencionar que, el uso de este medio en los grupos principalmente se encuentra dirigido a la “impresión 3D” o a la construcción con *concreto*. En este sentido, el uso de “extrusores robóticos” como efector final del brazo es uno de los métodos más requeridos por estos trabajos.

De la misma manera, “componentes robóticos personalizados” son diseñados para realizar elementos arquitectónicos y estructurales especiales con concreto, también como efectores finales para rociar concreto, soldar (o doblar) acero, ensamblar elementos de madera, o para montar el brazo robótico industrial y así lograr alcances de fabricación específicos y personalizados.

Por otro lado, diferente es el caso de los trabajos evaluados con tres puntos, donde los “sistemas multi-robóticos” encabezan la lista. En este sentido, las estrategias requeridas para la automatización en los procesos de fabricación se dirigen a “robots móviles autónomos” (AMR), o a la personalización del sistema robótico con fines de disminuir su escala, o generar estrategias de interacción colectiva. Otras investigaciones, se centran en desarrollar métodos de FD a través de “múltiples brazos robóticos” que pueden ser estacionarios o móviles mediante grúas o marcos que permitan un traslado programado. En el siguiente apartado, serán referenciados los artículos que corresponden a estas estrategias. A continuación, es mostrada la relación completa de los medios robóticos recurrentes en los artículos evaluados para su agrupamiento en esta RS (Figura 13).

Figura 13.

Relación de medios robóticos utilizados en la FD: recurrencia (cantidad de ocurrencias) en los artículos agrupados por calidad de tema y contenido.



Nota. Gráfica realizada a través de Gephi (Bastian et al., 2009). Elaboración propia (2024).

2.3.2.5. Contribución a la accesibilidad de medios robóticos en la Arquitectura.

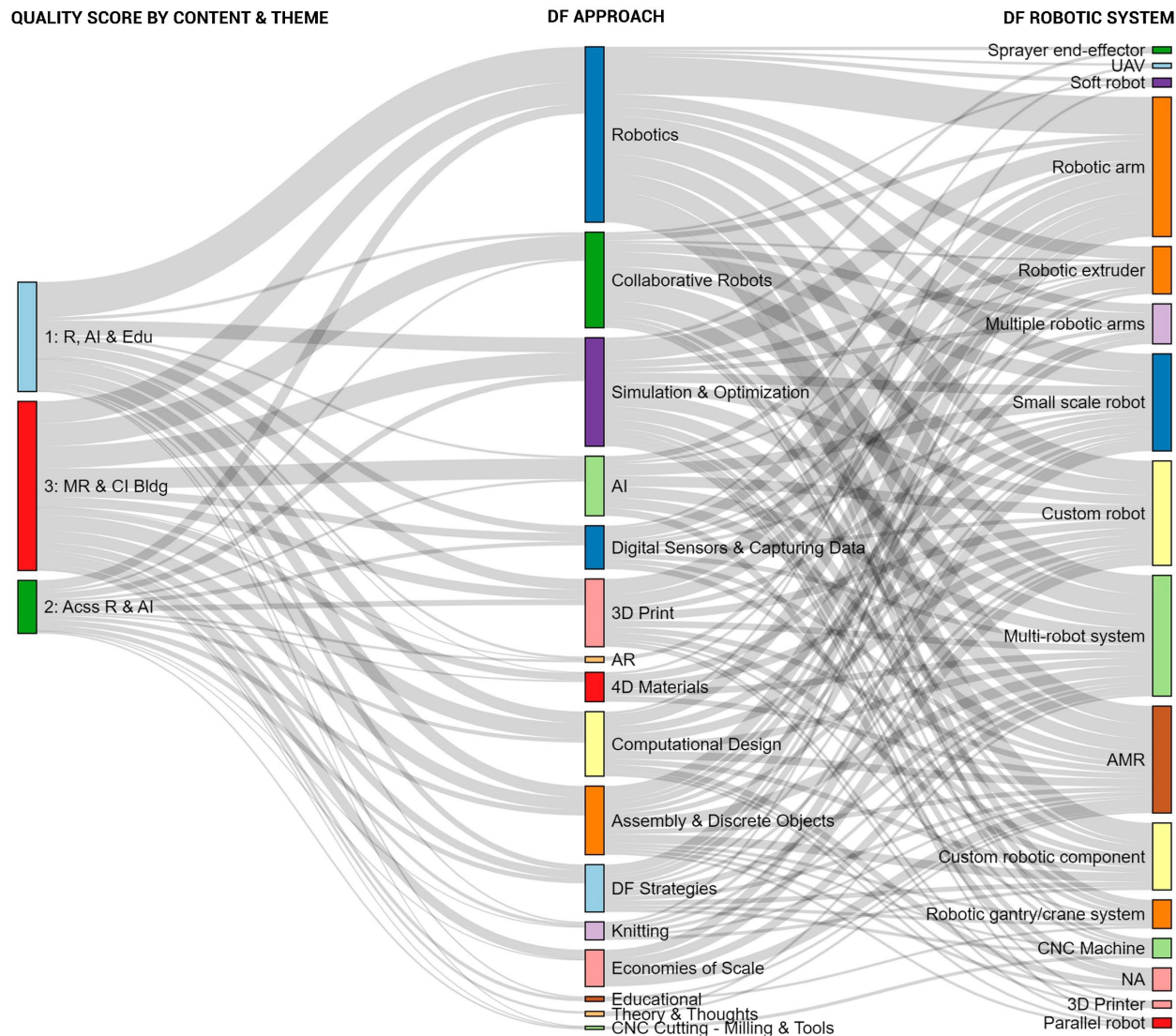
En los resultados obtenidos con las relaciones anteriores (Figura 14), fue posible verificar que existe una diferencia de objetivos entre los grupos. El grupo mejor calificado, que

corresponde a “Construcción Multi Robótica e IC”, dirige sus estudios hacia la reducción de escala del medio robótico. Para lograrlo, apuestan por el diseño de robots o componentes personalizados asequibles y herramientas de IC, con un uso de polímeros y madera como materiales de construcción dominantes. Diferente es el caso de los otros dos grupos (“Robótica e IA accesible” y “Robótica, IA y Educación”), que generan estrategias de FD emergentes dirigidas a la construcción con madera, polímeros o compuestos, o enfocan sus investigaciones al uso del concreto mediante avances tecnológicos de impresión 3D, rociado o vaciado automatizado; todos éstos, con un apoyo importante en los medios de gran escala y capacidad industrial.

Por tanto, este contraste de visión sobre la escala entre los grupos fomenta que los trabajos orientados a la reducción de medios robóticos contribuyan con el desarrollo de metodologías de FD que permitan la implementación de tecnologías accesibles en su transportación, operatividad y mantenimiento. Por lo que, el presente análisis, centra su atención a mostrar con mayor amplitud los informes de los 38 artículos que corresponden al grupo mejor calificado, y que privilegia la reducción del medio de fabricación.

Figura 14.

Interrelación del contenido de los artículos revisados, los enfoques y los medios robóticos utilizados en el proceso de FD.



Nota. Realizado a partir D3 | *Observable, Sankey Diagram* (Bostock, 2024c). Elaboración propia (2023).

Aun así, los trabajos que destacaron del conjunto con temáticas de “Robótica, IA y Educación”, son los que exploraron con diversas estrategias la construcción automatizada con concreto. Algunos trabajos se centraron en diseñar métodos de encofrado adaptable para la construcción automatizada de elementos arquitectónicos con forma personalizada, con el desarrollo de pórticos o grúas para montar una mezcladora especial para el vaciado del concreto, mientras un brazo robótico industrial (BRI) posiciona de forma dinámica la cimbra, o la imprime

en tercera dimensión (Burger et al., 2020; Lloret-Fritschi et al., 2019; Szabo et al., 2019). El pórtico, también puede producir un encofrado que varía su forma, de acuerdo con el torcimiento automatizado realizado por un BRI mientras es vaciado el concreto manualmente (Yang, Loh, y Leggett, 2019).

A diferencia de lo anterior, algunos estudios experimentaron con el diseño de encofrados estáticos, ya sea con la fabricación automática y personalizada de moldes con piezas de poliestireno (Martins, Nunes, de Campos, y Sousa, 2019) o con el armado de mallas de acero que retienen el concreto mientras es vaciado (Hack et al., 2020). Otros trabajos, realizaron investigación sobre las rutas de aplicación automatizada del concreto (mezclado con fibra de vidrio) mediante mecanismos de rociado inteligente realizado por el BRI y la optimización computacional (Nuh, Oval, Orr, y Shepherd, 2022; Taha et al., 2019).

Algunas investigaciones, que se centraron en la impresión 3D con concreto, diseñaron el medio robótico para permitir el armado con acero mientras se ejecuta la ruta de disposición del concreto (Classen, Ungermann, y Sharma, 2020). O realizaron trabajos de restauración, con piezas únicas faltantes en edificaciones de patrimonio cultural (Codarin, 2020). También, hicieron modificaciones en el extrusor para que la impresión 3D se ejecute a través de disparar a presión municiones de concreto (Ming, Mirjan, Medina Ibáñez, Gramazio, y Kohler, 2022); o realizaron revisiones del estado del arte en contextos Latinoamericanos (García-Alvarado, Martínez, González, y Auat, 2020).

La impresión 3D también fue explorada con la aplicación de otros materiales, como la propuesta de un componente personalizado para la extrusión de tierra con un BRI (Gomaa, Jabi, Veliz Reyes, y Soebarto, 2021), o la utilización de metal a manera de soldadura para el ensamble

o impresión de elementos arquitectónicos (Ariza et al., 2018; Ma et al., 2020; Müller, Müller, Kloft, y Hensel, 2022).

En el mismo grupo, también destacaron artículos que tienen un enfoque diferente, basado en el ensamblaje de elementos discretos con diversos materiales. Varios trabajos experimentaron con metodologías para el ensamblaje con madera y desarrollaron estrategias para la fabricación, manipulación y conexión automática con BRIs de elementos que funcionan como estructura y envolvente arquitectónica (Brugnaró, Figliola, y Dubor, 2019; Rogeau, Latteur, y Weinand, 2021; Tan, Mills, Papadonikolaki, Li, y Huang, 2022; Vestartas, Rad, y Weinand, 2021). Algunas investigaciones, centraron su atención en generar un componente robótico personalizado y un protocolo de ensamblaje auxiliar en el proceso de unión entre los elementos (Huang et al., 2021; Leung, Apolinarska, Tanadini, Gramazio, y Kohler, 2021).

También, otros autores investigaron estos procesos con otros materiales como los polímeros, mediante métodos inteligentes de reconocimiento del material por parte del BRI con sensores (Chancharoen y Sithiwichankit, 2019, 2020); el diseño de conexiones estructurales especiales de polímeros con concreto (Born et al., 2021); o el uso de sistemas de optimización computacional para el desarrollo de carcassas arquitectónicas autoportantes con el ensamble de segmentos de plástico (Giannopoulou et al., 2019).

Por otro lado, el grupo de trabajos que enfocaron sus temas a la “Robótica e IA accesible” mostraron estrategias de FD que buscan lograr accesibilidad a los medios tecnológicos utilizados en el proceso de automatización. Sin embargo, las propuestas aún se encuentran dirigidas al uso de robots de gran escala, o apuestan por interfaces virtuales que asisten en el proceso manual de construcción. En este sentido, algunas investigaciones reconocen problemas de accesibilidad, sobre todo por el transporte y la operatividad.

Con respecto a la impresión 3D en la construcción, fueron exploradas estrategias para que el medio robótico tenga gran alcance en el proceso de impresión con polímeros. Estos métodos pueden enfocarse en el diseño del medio robótico, o en estrategias algorítmicas de optimización computacional (D.W. Bao, Yan, Snooks, y Xie, 2019; Yuan, Beh, Yang, Zhang, y Gao, 2022). También fue abordado el proceso de localización de robots móviles autónomos (AMR) complementados con un BRI para la impresión 3D con barro o concreto (Lachmayer, Recker, Dielemans, Dörfler, y Raatz, 2022), o se realizó un análisis comparativo de costo y tiempo de la fabricación aditiva con muros de forma compleja (García de Soto et al., 2018).

Algunas investigaciones, diseñaron materiales compuestos (metamateriales) que tienen capacidades reactivas especiales a estímulos externos y funcionan como materiales 4D (Cheng et al., 2021; Panagiotidou et al., 2022). Otros trabajos, crearon interfaces virtuales para que, con Realidad Aumentada (RA), se generen procesos interactivos y colectivos entre humano – máquina en la construcción. Las estrategias buscan auxiliar en el proceso de fabricación y facilitar la operatividad del medio robótico (Kyjanek, Al Bahar, Vasey, Wannemacher, y Menges, 2019; Mitterberger et al., 2022; Wu, Dimopoulou, Hsieh, y Chatzakis, 2019).

Estudios con un enfoque diferente a los anteriores, también generaron estrategias para contribuir a la accesibilidad de medios tecnológicos en la FD, como aquellos dirigidos a la construcción con materiales granulares (conjunto de partículas que ejercen poca fuerza de repulsión entre sí) para aminorar la escala del material constructivo (Dierichs, Kyjánek, Loučka, y Menges, 2019); los que desarrollan conceptos de conexión reversible entre barrotes de madera de pequeña escala (Hansen, Kunic, y Naboni, 2021); o herramientas para la fabricación asequible de máquinas de corte CNC (Fossdal et al., 2020) . También, esfuerzos para desarrollar unidades

móviles de BRI colaborativos, como estaciones transportables de construcción para el sitio (Wagner et al., 2020).

Finalmente, los artículos con enfoques de “Construcción Multi Robótica e IC” se caracterizan por integrar la robótica e IC (como herramienta computacional utilizada por la IA), lo cual, puede contribuir a reducir la escala del medio robótico, mejorar su transportabilidad y facilitar su operatividad. Así, en este grupo existieron investigaciones que no se enfocaron en estrategias de FD para la construcción y orientaron sus trabajos a diseñar sistemas multi-robóticos personalizados y/o software para su manipulación.

Dhameliya et al. (2018) presentaron el desarrollo de una plataforma para la simulación de un sistema robótico de enjambre con unidades de pequeña escala. El objetivo es el análisis de efectividad al realizar aplicaciones de búsqueda básica y evasión de obstáculos. Hua et al (2019) muestran un sistema robótico colectivo minimalista y económico llamado TERMES, con capacidad de construir estructuras de 2.5 dimensiones. La construcción es realizada con ladrillos de diseño especializado y un algoritmo descentralizado. Mesa et al. (2020; 2019) diseñaron robots ambulatorios de pequeña escala basados en estructuras de origami y cinemática. Cada robot funciona con actuadores mínimos producidos por pequeños motores sobre una morfología laminada y plegada. La simulación robótica fue realizada con *Solidworks* y el complemento de *Grasshopper* llamado *Kangaroo*.

Globa et al. (2019) documentaron el diseño y la fabricación de un sistema cinético de fachada híbrida. El diseño trata un componente rotativo autónomo hexagonal que es controlado remotamente y que combina IA, robótica, simulación digital y calibración física. La simulación y conexión física-virtual fue realizada con *Unity3D*. Fue utilizada la implementación remota *Bee Explorer* para el control de la fachada mediante RV. Chang et al. (2019) reportaron el diseño y

fabricación de un componente modular que, bajo el enfoque de un material 4D, cambia su forma a través de un estímulo externo para una envolvente arquitectónica. El prototipo no incluye un protocolo de comunicación entre los componentes.

Nisser et al. (2021) desarrollaron una plataforma que usa electro-magnetos programables para el prototipado interactivo de robots asequibles, de pequeñas dimensiones, con un carácter dinámico. El sistema es multi-robótico y se apoyó en interfaces de Inteligencia de Enjambre (IE). La simulación fue realizada con el uso de *React*, *TypeScript* y *Three.JS*. Shaked y Degani (2021) presentaron el diseño de una herramienta algorítmica como complemento de *Grasshopper* llamada *Shepherd*. Se encuentra dirigida a la simulación y control de sistemas multi-robóticos terrestres móviles, y permite generar planeación de rutas robóticas y el control de múltiples plataformas móviles ROS (*Robot Operating System*). Puede establecer conexión en tiempo real con el simulador robótico *Gazebo* y acepta el control con *Python*.

Otros estudios, enfocaron sus investigaciones al ensamblaje a detalle de pequeños elementos discretos de madera con estrategias de IA, o con robótica colectiva. Rossi y Nicholas (2019) desarrollaron una herramienta para *Grasshopper* que utiliza una Red Neuronal para la visualización geométrica de los movimientos de un BRI de tipo Cobot, y permitir verificar errores en el desplazamiento para corregirlos. Kunic et al. (2021) exploraron un concepto de construcción circular con madera mediante un proceso robótico colectivo para automatizar la reconfiguración de estructuras con madera. El proceso es de tipo ciber-físico, y se basa en la retroalimentación visual del sistema robótico para el montaje, desmontaje y reensamble de los elementos. Ambos experimentos, no se han puesto a prueba en un contexto de construcción arquitectónica.

También, existieron trabajos orientados al ensamblaje con múltiples BRI de gran escala. Tavakoli et al. (2018) mostraron un sistema multi-robótico para el movimiento simultáneo de agentes robóticos sobre una estructura de rieles que son modulares y pueden utilizarse como andamios en 2D o 3D (horizontales y verticales). La investigación contrastó tres prototipos de unidad robótica con características de autonomía, movilidad rápida, sencillez y escalabilidad. Este sistema se encuentra dirigido a la industria y no a la construcción.

Thoma et al. (2019) validaron la construcción automatizada con barros, remaches de madera y dos BRI montados sobre un pórtico grúa. Fueron realizados tres experimentos que incluyen la fabricación de una pérgola. Vasey et al. (2020) mostraron de manera detallada un SMR en el proceso de FD dirigido a la Arquitectura. El sistema combinó drones (UAV) con BRI para colaborar en entretejer con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP); y es demostrado con la construcción de una cubierta de largo claro. De una manera similar, Momeni et al. (2022) investigaron un sistema robótico colaborativo para la construcción personalizada de castillos estructurales de acero con tres BRI montados en un pórtico grúa. Fue utilizado el simulador robótico CoppeliaSim y desarrollaron algoritmos de planeación de ruta para la transportación y amarre de varillas.

Por otro lado, algunos trabajos profundizaron en proponer estrategias de FD particulares, con énfasis en las contribuciones que, la robótica colectiva o las herramientas de IA, pueden ofrecer en los procesos de automatización. Andreen et al. (2019) propusieron un enfoque teórico alternativo para la construcción automatizada con impresión 3D y barro con un entorno híbrido que permite comunicación retroalimentativa entre lo virtual (simulación de agentes) y lo físico (robótica de enjambre). La investigación se basa en modelos de *estigmergia* (comunicación local

indirecta entre los agentes y su entorno) y en un sistema de impresión que dispone el material a manera de elementos discretos, con un desplazamiento no secuencial.

Claypool (2019) realizaron un análisis de los antecedentes filosóficos y teóricos de diseño del enfoque del Discretismo para la fabricación de viviendas. El enfoque se centró en el uso de materiales que llama “digitales”, los cuales, tienen un carácter discreto y son ensamblables de manera reversible en un conjunto de posiciones relativas. Kuzmenko et al. (2019) realizaron una evaluación ambiental de una construcción innovativa edificada con procesos robóticos colaborativos. El análisis tomó como caso de estudio la construcción de una estructura de madera abovedada (con topología nexorada). El estudio incluyó la evaluación de ciclo de vida de la fase de construcción.

Vieira y Schulz (2019) presentaron un método basado en simulación multi-agente y *Cloud Computing* como estrategia de diseño y FD. También incluyó la combinación de analíticas de *Big Data* y IoT. El objetivo fue integrar técnicas de construcción, materiales y fabricación en un marco paramétrico organizacional, con el fin de optimizar decisiones de diseño y procesos de fabricación. En el proceso, fue realizado un Análisis de Elementos Finitos (FEA) para la evaluación estructural.

Knippers et al. (2021) describieron el funcionamiento y la metodología de carácter interdisciplinar del grupo IntCDC de la Universidad de Stuttgart. La organización se apoya en métodos de diseño colaborativo de ingeniería, fabricación y construcción. También, incluyó métodos para el desarrollo de sistemas constructivos y materiales con estrategias computacionales y robótica colectiva. Rust et al. (2021) presentaron una metodología para el estudio de la relación entre estructuras de superficie difusa y su desempeño acústico mediante

ciencia de datos. Fue utilizado un proceso con BRI colaborativos equipados con micrófono y bocinas para medir las respuestas de los impulsos sonoros.

Otras investigaciones desarrollaron estrategias computacionales basadas en herramientas que utiliza la IA para el diseño de prototipos arquitectónicos y la FD. Castriotto et al. (2019) mostraron el diseño de una estructura con estrategias computacionales bio inspiradas. La estructura siguió la estrategia estructural de marcos recíprocos (marcos nexorados). La estrategia computacional se basó en el método de IC de Modelado Basado en Agentes (MBA) bajo el modelo de IE. Para la simulación se requirieron los complementos de *Grasshopper* llamados *Culebra*, *Kangaroo*, *Pufferfish* y *Weaverbird*.

Bouayad (2019) recuperó patrones tradicionales japoneses como plantilla inicial para desplegar un proceso generativo multi-agente. Los patrones fueron llamados Katagami y la propuesta trasladó su carácter bidimensional a estructuras tridimensionales. El objetivo fue que las estructuras emergentes funcionen como cerramiento de espacios. El método estudió y simuló los comportamientos de la IE. Fue utilizada la librería para el diseño arquitectónico generativo IGeo del entorno de programación *Processing*, para posteriormente ser vinculados los resultados a *Grasshopper*.

También, del Campo et al. (2021) abordaron aplicaciones avanzadas de métodos (*Hallucinations*, *Dreaming*, *Style Transfer* y *Vision*) de IA con Redes Neuronales aplicados en el diseño arquitectónico, y con el fin de trasladar la clasificación y generación de imágenes en 2D a respuestas en 3D para la Arquitectura. El proyecto exploró las fronteras de la colaboración humano-máquina. Lye y Andrasek (2021) aplicaron *Machine Learning* (ML) para la simulación de sistemas de agregación arquitectónica de elementos discretos de madera. Analizaron modelos

de ML basados en algoritmos de aprendizaje PPO y GAIL incluidos en *Unity Learning Agent* para aprender lógicas de ensamblaje.

Algunos de estos estudios, integran mecanismos de IA con estrategias algorítmicas de IC. Wang y Snooks (2021) propusieron un enfoque heurístico que hibrida procesos ascendentes evolutivos de *Reinforcement Learning* (RL) con mecanismos descendentes generativos emergentes (IE múltiple). El experimento estableció un campo topológico con consciencia intuitiva global para el diseño de un pabellón. Bao et al. (2022) sugirieron una integración entre estrategias de optimización topológica y Diseño Generativo (DG), a través de mezclar los métodos *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO) y algoritmos multi-agente de IE.

Por otro lado, existieron investigaciones que se enfocaron en la impresión 3D con esquemas de robótica colaborativa o algoritmos de IC. Naboni et al. (2019; 2020) presentaron la realización de un pabellón autoportante diseñado y optimizado para impresión 3D, el cual, fue armado por el ensamble de diversos componentes impresos. La estrategia de fabricación fue multi-escala mediante del método de impresión *Fused Filament Fabrication* (FFF). Utilizó un sistema multi robótico (granja de impresoras 3D tipo delta) para la construcción paralela de partes (distribuida). Fueron utilizadas diferentes estrategias algorítmicas de optimización computacional para el diseño del pabellón y su proceso de fabricación. El concepto de diseño siguió una lógica bio-inspirada en la densidad estructural de los huesos.

Stuart-Smith et al. (2020) propusieron un método de diseño para la Fabricación Aditiva (FA) de elementos estructurales arquitectónicos. La investigación se basó en programas de simulación y optimización basados en agentes. Los autores desarrollaron tres programas personalizados para ejecutar diferentes tareas en el método. El primer programa es un sistema

multi-agente evolucionario para la generación de diseños topológicos. El segundo, es un generador de rutas para el BRI adaptable y basado en agentes para la disposición del material. El tercero, es un entorno de simulación de físicas para mostrar el efecto del material durante el proceso de fabricación. Los programas se conectan a *Grasshopper* con rutinas de programación en *Python*.

Por último, en este grupo, existieron trabajos que no sólo integraron la robótica colaborativa, la IC y un enfoque de reducir la escala y complejidad del medio robótico, sino que también, implementaron estrategias de diseño, simulación y optimización computacional para el ensamblaje de elementos discretos con el objetivo de disminuir también la escala del material constructivo. Inclusive, estos trabajos visualizan al sistema robótico como un material 4D, que es responsivo y codependiente de la construcción arquitectónica.

Kayser et al. (2018) apostaron por la IC como modelo de interacción para un sistema multi-robótico. El objetivo fue que el modelo pueda construir de manera automática en el sitio y busca contribuir con el desarrollo de estructuras arquitectónicas asequibles y portantes. Fueron utilizados filamentos de fibra de vidrio para la construcción de tubos estructurales que fueron embobinados, de manera paralela, por las unidades robóticas con resina foto curable. Cada robot, fue constituido por una membrana de silicón inflable que extruye y determina el grosor del tubo. Fue desarrollada una interfaz de programación personalizada, basada en los algoritmos de comportamiento de la IC, para interactuar con cada robot y determinar su trayectoria.

Hosmer y Tigas (2019) presentaron el diseño de una Arquitectura autónoma definida por tres propiedades: (1) agencia situada y encarnada, (2) variación e (3) inteligencia. Aplicaron *Deep Reinforcement Learning (DRL)* de *Unity's ML-agents* para entrenar comportamientos adaptables de movilidad, auto estructuración, autobalance y reconfiguración espacial de un

sistema multi-robótico. Las unidades robóticas del sistema siguieron reglas topológicas de tensegridad para realizar ensambles actuantes. Las unidades fueron llamadas *Autonomous Robotic Tensegrity* (ART) y diseñadas en *Unity3D*. Las secuencias entrenadas fueron guardadas en el simulador y enviadas como instrucciones a cada robot.

Leder et al. (2022; 2019) se enfocaron en la construcción automatizada con robótica colectiva específica y co-diseñada para un sistema arquitectónico. Combinaron dos enfoques existentes de robótica colectiva: (1) los robots son usados como materiales de construcción, (2) consideran a los robots como manipuladores para construir. De esta manera, integraron la Robótica, la Ciencia Computacional y la Arquitectura. Las tareas que ejecutó el sistema fueron locomoción, encadenamiento cinemático dinámico y transportación, con elementos pasivos de madera que funcionaron como ejes de rotación para las unidades robóticas personalizadas que fueron móviles. La propuesta fue desarrollada con un MBA como herramienta de DG y fue trasladado a una interfaz personalizada en *Unity3D* para la simulación robótica. El artículo probó que el sistema es adaptable, escalable y reusable.

Yablonina y Menges (2019) describieron los avances de trabajo relacionado con sistemas multi-robóticos que desempeñan tareas distribuidas. Los avances tuvieron un enfoque de reducción de escala de los robots móviles para realizar tareas específicas. Esta visión, apuesta por evitar el diseño orientado a la robótica centralizada, para dirigirse hacia una estrategia de diseño en el que, el proceso, el objetivo y la maquina son codependientes.

Hou y Loh (2021) propusieron un método de diseño y construcción colectiva inspirado en la inteligencia y robótica de enjambre con un alcance de escala urbana. El sistema robótico utiliza una tecnología de excavado a manera de topo, para de esta manera, generar múltiples túneles para vaciar concreto en los huecos resultantes. Propusieron que la interacción colectiva y

local de los robots sea mediante de sensores. La simulación multi-agente fue con el complemento de *Grasshopper* llamado *Quelea*. Su idea, es que cada robot envíe información periódica de localización desde tarjetas microcontroladoras y reciba instrucciones de tareas a ejecutar desde la computadora de control.

Tucker et al. (2022) presentaron un sistema multi-robótico colaborativo para la fabricación distribuida de un espacio tejido que sigue una lógica de fabricación paralelizada inspirada en métodos de producción textil. Consistió en un sistema ciberfísico de robots móviles que colectivamente, superan limitaciones de tamaño y flexibilidad de la maquinaria industrial. Con la ejecución paralela de tareas y retroalimentación de sensores en tiempo real pueden coordinar múltiples agentes. Incluyó la creación personalizada de hardware y comportamientos robóticos, así como la generación de tareas, coordinación y protocolos de comunicación multi-agente. El puente entre el diseño y fabricación fue mediante una estructura de datos basada en gráficos (*Directed Acyclic Graph*) y formateados en JSON. El protocolo de comunicación es transmitido con WiFi entre el controlador, el entorno *Grasshopper* y los robots.

A continuación, es mostrada la relación de autores que corresponden a este grupo de artículos, el año de publicación, título cada trabajo, enfoque de FD, material constructivo utilizado, así como el medio robótico utilizado en el proceso (Tabla 4).

Tabla 4.

Relación de autores del grupo de artículos orientados a la “Construcción Multi Robótica e IC”.

Autores / Año	Título	Enfoque	Material	Medio robótico
Kayser et al. (2018)	<i>Design of a multi-agent, fiber composite digital fabrication system</i>	4DM; AI; A&DO; CoRo; CD; EoS; Knt; Ro; S&O	Tejido y Fibras Textiles; Polímero	AMR; CRo; MRS; SSR

Autores / Año	Título	Enfoque	Material	Medio robótico
Tavakoli et al. (2018)	<i>SCALA: Scalable Modular Rail based Multi-agent Robotic System for Fine Manipulation over Large Workspaces</i>	AI; CoRo; Ro	NA	AMR; CRo; MRS; RoG; SSR
Dhameliya et al. (2018)	<i>Prototyping and simulated analysis of autonomous swarm-bots</i>	AI; CoRo; Ro; S&O	NA	AMR; CRo; MRS; SSR
Rossi y Nicholas (a) (2019)	<i>Haptic Learning Towards Neural-Network-based adaptive Cobot Path-Planning for unstructured spaces</i>	AI; CoRo; DFS; S&D; Ro	NA	RArm
Naboni et al. (a) (2019)	<i>Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion</i>	A&DO; CoRo; CD; S&O; 3DP	Polímero	3DP; MRS; PRo
Kuzmenko et al. (2019)	<i>Improving Construction Efficiency with Digital Fabrication. An Environmental Insight</i>	A&DO; CoRo; DFS; E&S; Ro	Madera	CNC; MRS; MRA
Globa et al. (2019)	<i>Hybrid Environmental-Media Facade Full-Scale Prototype Panel Fabrication</i>	4DM; AI; CoRo; E&S; Ro	Acero o Metal	CRo; MRS; SSR
Mesa et al. (a) (2019)	<i>CREASE Synchronized Gait Through Folded Geometry</i>	CoRo; CD; S&D; EoS; Edu; Ro; S&O	Polímero	AMR; CRo; SSR; SRo
Chang et al. (2019)	<i>Design and fabrication of a responsive carrier component envelope</i>	4DM; A&DO; S&D; Ro; 3DP	Polímero	CRo; SSR
Castriotto et al. (2019)	<i>Biomimetic Reciprocal Frames A design investigation on bird's nests and spatial structures</i>	AI; A&DO; CD; Edu	Madera	NA
Rossi y Nicholas (b) (2019)	<i>Haptic Learning Towards Neural-Network-based adaptive Cobot Path-Planning for unstructured spaces</i>	AI; CoRo; DFS; S&D; Ro	Madera	RArm
Andreen et al. (2019)	<i>Swarm materialization through discrete, nonsequential additive fabrication</i>	AI; CD; S&O; 3DP	Tierra (tapial - adobe - rústico)	3DP
Hua et al. (2019)	<i>Robots building bridges, not walls</i>	AI; A&DO; CoRo; EoS; Ro; S&O	Mixto o Variable; Polímero	AMR; CRo; MRS; SSR
Vieira y Schulz (2019)	<i>Design Method Aided by MABS and Cloud Computing Framework integrating: construction techniques, materials, and fabrication</i>	AI; CNC; DFS; S&O	Madera	CNC
Bouayad (2019)	<i>Three-dimensional translation of Japanese Katagami patterns</i>	AI; CD; CH; S&O	NA	NA

Autores / Año	Título	Enfoque	Material	Medio robótico
Hosmer y Tigas (2019)	<i>Deep Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Tensegrity (ART)</i>	4DM; AI; CoRo; CD; Ro; S&O	Mixto o Variable	AMR; CRo; MRS; SSR
Yablonina y Menges (2019)	<i>Distributed Fabrication: Cooperative making with larger groups of smaller machines</i>	4DM; AI; CoRo; DFS; S&D; EoS; Knt; Ro; T&T; 3DP	Tejido y Fibras Textiles; Mixto o Variable; Polímero	AMR; CRo; CRC; MRS; SSR; RArm
Thoma et al. (2019)	<i>Cooperative Robotic Fabrication of Timber Dowel Assemblies</i>	A&DO; CoRo; DFS; Edu; Ro; S&O	Madera	MRS; MRA; RoG
Claypool (2019)	<i>Our Automated Future: A Discrete Framework for the Production of Housing</i>	4DM; AI; A&DO; CoRo; DFS; EoS; Rev; Ro; T&T	Mixto o Variable; NA	AMR; MRS; MRA
Leder et al. (b) (2019)	<i>Distributed Robotic Timber Construction: Designing of in-situ timber construction system with robot-material collaboration</i>	4DM; AI; A&DO; CoRo; CD; EoS; Ro; S&O; 3DP	Polímero; Acero o Metal; Madera	AMR; CRo; MRS; SSR
Mesa et al. (b) (2020)	<i>CREASE: Synchronous gait by minimizing actuation through folded geometry</i>	CoRo; CD; S&D; EoS; Ro; S&O	Polímero	AMR; CRo; SSR; SRo
Naboni et al. (b) (2020)	<i>Computational design, engineering and manufacturing of a material-efficient 3D printed lattice structure</i>	A&DO; CoRo; CD; S&O; 3DP	Polímero	3DP; MRS; PRo
Stuart-Smith et al. (2020)	<i>Topological and material formation</i>	AI; CD; S&O; 3DP	Mixto o Variable; Polímero	REx; RArm
Vasey et al. (2020)	<i>Physically distributed multi-robot coordination and collaboration in construction: A case study in long span coreless filament winding for fiber composites</i>	A&DO; CoRo; S&D; Knt; Ro; S&O	Tejido y Fibras Textiles	CRC; MRS; MRA; UAV
Rust et al. (2021)	<i>A data acquisition setup for data driven acoustic design</i>	CoRo; CD; S&D; Ro; S&O; 3DP	Compuesto; Polímero; Madera	MRS; MRA; RoG
Nisser et al. (2021)	<i>Programmable Polarities: Actuating Interactive Prototypes with Programmable Electromagnets</i>	4DM; AI; CoRo; EoS; Ro	Mixto o Variable	AMR; CRo; MRS; SSR
Hou y Loh (2021)	<i>Towards swarm construction</i>	AI; CoRo; CD; EoS; Ro; S&O; 3DP	Concreto	AMR; CRo; MRS; SSR

Autores / Año	Título	Enfoque	Material	Medio robótico
Shaked y Degani (2021)	<i>Shepherd: A fabrication-oriented tool for simulation and control of mobile robotic platforms for collaborative earthworks</i>	AI; CoRo; Ro; S&O	Mampostería o Piedra	AMR; MRS; SSR
Wang y Snooks (2021)	<i>Intuitive behavior: The operation of reinforcement learning in generative design processes</i>	AI; CD; S&O	NA	NA
del Campo et al. (2021)	<i>Towards Hallucinating Machines - Designing with computational vision</i>	AI; CD; S&O	NA	NA
Knippers et al. (2021)	<i>Integrative computational design and construction: Rethinking architecture digitally</i>	AR; A&DO; CoRo; DFS; S&D; Edu; Ro; S&O; T&T	Mixto o Variable	AMR; MRS; MRA; REx; RoG; SEnd; UAV
Kunic et al. (2021)	<i>Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture: Closing the circular loop in wood architecture</i>	A&DO; CoRo; DFS; S&D; Ro; S&O	Madera	CRC; MRS; MRA
Lye y Andrasek (2021)	<i>Machine Learning Combinatorial Frameworks for Architecture</i>	AI; A&DO; CD; S&O	Madera	NA
Momeni et al. (2022)	<i>Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell</i>	CoRo; Ro	Acero o Metal; Concreto	MRS; MRA; RoG
Dörfler et al. (2022)	<i>Additive Manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction</i>	CoRo; DFS; EoS; Ro; S&O; 3DP	Compuesto; Concreto	AMR; CRo; MRS; MRA; REx; RoG; SSR
Tucker et al. (2022)	<i>A Collaborative Multi-Robot Platform for the Distributed Fabrication of Three-dimensional Fibrous Networks (Spatial Lacing)</i>	AI; CoRo; CD; EoS; Knt; Ro; S&O	Tejido y Fibras Textiles	AMR; CRo; MRS; SSR
Bao et al. (2022)	<i>Encoding topological optimisation logical structure rules into multi-agent system for architectural design and robotic fabrication</i>	AI; CD; S&O; 3DP	Polímero	NA
Leder et al. (a) (2022)	<i>Leveraging Building Material as Part of the In-Plane Robotic Kinematic System for Collective Construction</i>	4DM; AI; A&DO; CoRo; CD; EoS; Ro; S&O; 3DP	Polímero; Acero o Metal; Madera	AMR; CRo; MRS; SSR

Nota. 4DM: materiales 4D; AI: inteligencia artificial; A&DO: ensamblaje y objetos discretos;

CoRo: robots colaborativos; CD: diseño computacional; EoS: economía de escala; Knt: tejido;

Ro: robótica; S&O: simulación y optimización; DFS: estrategias de FD; S&D: sensores digitales y recolección de datos; E&S: ambiente y sustentabilidad; Edu: educacional; 3DP: impresión 3D / impresora 3D; CNC; corte CNC – fresado y herramientas / máquina CNC; CH: patrimonio cultural; T&T: teoría y pensamientos; Rev: revisión y estado del arte; CRo: robot personalizado; MRS: sistema multi-robótico; SSR: robot de pequeña escala; RoG: sistema robótico de grúa; RArm: brazo robótico; PRo: robot paralelo; MRA: múltiples brazos robóticos; SRo: robot blando; CRC: componente robótico personalizado; REx: extrusor robótico; SEnd: efector final rociador. Elaboración propia (2023).

2.4. Discusión y conclusiones

El conjunto de artículos filtrados para lectura completa, así como para realizar los informes correspondientes, mostraron contrastes en los medios robóticos utilizados de acuerdo con el enfoque que los distinguió. El grupo de trabajos con enfoque de “Robótica, IA y Educación” centraron su trabajo al uso del BRI de gran escala, sobre todo destinado a la aplicación del concreto y los polímeros, como material constructivo en el desarrollo arquitectónico. Innovación en la fabricación y manipulación del encofrado (dinámico o estático), diseños personalizados de componentes para la automatización del vaciado, o de las rutas de aplicación mediante mecanismos de rociado inteligente, así como estrategias de impresión 3D de gran escala, son los principales objetivos que tienen las investigaciones de este grupo.

Los trabajos con enfoque de “Robótica e IA accesible”, aunque identificaron el problema de accesibilidad que implican los BRI por su escala, y experimentaron diversas estrategias de FD para contrarrestar esta dificultad, siguen bajo la dependencia de medios robóticos de gran escala con operatividad centralizada de producción. Destacaron trabajos que se relacionaron con materiales granulares para buscar disminuir el tamaño del material constructivo (Dierichs et al.,

2019) o estrategias de RA dirigidas a asistir en el proceso de fabricación (Kyjanek et al., 2019; Mitterberger et al., 2022; Wu et al., 2019).

Con respecto a los estudios que, con un enfoque de “Construcción Multi Robótica e IC”, buscaron reducir la escala del medio robótico para facilitar su transportabilidad y operatividad; existieron algunas investigaciones que ingeniaron sistemas para ensamblar elementos discretos de material con tamaño disminuido, pero que aún dependen de un BRI de mediana o gran escala (Kunic et al., 2021; Rossi y Nicholas, 2019). De la misma manera, otros trabajos utilizaron varios robots que trabajan colaborativamente para facilitar el proceso de fabricación (Tavakoli et al., 2018), sobre todo de elementos constructivos personalizados y de forma compleja (Thoma et al., 2019; Vasey et al., 2020), o para automatizar el armado con acero de elementos estructurales (Momeni et al., 2022). Sin embargo, el medio robótico aún es de gran escala y para controlar su movilidad requirieron de pórticos grúa de gran tamaño.

De los trabajos que propusieron esquemas bajo este enfoque, destaca la investigación de Vasey et al. (2020) que, para el proceso colaborativo de fabricación de un elemento arquitectónico complejo, aparte de utilizar dos BRIs implementa un UAV que tiene una escala significativamente reducida. Aun así, todas estas propuestas, a pesar de que implicaron procesos robóticos colaborativos, su operatividad fue compleja y su disposición requirió de una infraestructura especializada y altamente controlada.

Algunas investigaciones, realizaron discusiones sobre estrategias de FD que pueden contribuir a cambiar paradigmas con respecto a los mecanismos de automatización, la escala y la accesibilidad del medio tecnológico en la construcción, con una visión a futuro en la que destacan metodologías para la interdisciplinaridad, la colectividad robótica, co-dependencia entre

el medio robótico y los materiales constructivos, así como reversibilidad en la construcción arquitectónica (Claypool, 2019; Knippers et al., 2021).

También, en esta visión, otros trabajos visualizaron la aplicación de modelos de IC con MBAs para optimizar paramétricamente el sistema organizacional del proceso de fabricación (Vieira y Schulz, 2019), o para implementar un sistema bio-inspirado de impresión 3D alternativo y no secuencial (Andreen et al., 2019). Desafortunadamente, todos estos artículos que plantearon esquemas particulares de FD, tienen un alcance únicamente teórico y no profundizan sobre las metodologías específicas de aplicación del medio robótico y sus sistemas de inteligencia computacional para su operatividad.

Varias investigaciones de este grupo de artículos desarrollaron diseños robóticos con características que les permiten operar colectivamente, tener pequeña escala (o ser multi-escalares), trabajar de manera descentralizada bajo modelos bio-inspirados de IC, con una lógica para operar de superficie plegable tipo origami (Mesa et al., 2020, 2019), con electro magnetos programables (Nisser et al., 2021), o con los comportamientos básicos de atracción, repulsión y alineación que fundamentan la IE (Dhameliya et al., 2018). Sin embargo, ninguno de estos trabajos se dirigió a la Arquitectura, de tal forma que, las unidades robóticas no se encuentran diseñadas para manipular materiales.

Diferente es el caso de Hua et al. (2019) que generaron un sistema robótico colectivo, económico y minimalista que tiene capacidad de manipular ladrillos para construir de manera descentralizada estructuras en 2.5 dimensiones. A pesar de esto, el desarrollo se encuentra en una fase conceptual y experimental, y cada robot solo puede trabajar con un diseño específico del ladrillo, destinado a construcciones de dimensiones limitadas y sin integridad estructural. También, Shaked y Degani (2021) desarrollaron una herramienta algorítmica para la simulación

y control de sistemas multi-robóticos terrestres con fines de construcción, que puede establecer conexión con simuladores robóticos. Desafortunadamente, el trabajo se encuentra en progreso y la herramienta no está disponible al público.

Otros trabajos, diseñaron prototipos robóticos para funcionar como múltiples elementos interactivos para la envolvente arquitectónica que puede ser manipulada remotamente (Globo et al., 2019), o dinámicamente ejercer transformaciones a través de la reacción a estímulos externos (Chang et al., 2019). Estos proyectos, reportan el proceso de diseño y fabricación de los prototipos, pero no contribuyen a metodologías de FD que permitan hacer más accesible el medio robótico y requieren de múltiples equipos tecnológicos para su prototipado.

También en este grupo, fueron exploradas metodologías de FD dirigidas a la impresión 3D. Naboni et al. (2019, 2020) documenta un diseño y construcción con carácter multi-escala, que permite optimizar y disminuir las partes de una envolvente arquitectónica para su impresión paralela y colectiva. El diseño de la envolvente sigue una lógica estructural bio-inspirada en la densidad estructural de los huesos. Sin embargo, este método requiere de múltiples impresoras 3D estacionarias de mediana escala y alto costo, que utilizan como insumo, un tipo especial de biopolímero que no aportan a que el sistema sea accesible.

El anterior enfoque de diseño estructural, basado en la diferenciación de densidad programada de material, es una referencia importante para el diseño de estructuras arquitectónicas que son constituidas por elementos endebles de pequeña escala y es oportuna para enfoques de FD distribuida, realizada con unidades robóticas de escala reducida.

Con respecto a la impresión 3D, también Stuart-Smith et al. (2020) propusieron un método de FA para la construcción de elementos estructurales con la utilización de tres programas (desarrollados por los autores) que aplican estrategias computacionales de

optimización multi-agente para generar diseños topológicos y simular la fabricación del elemento. Desafortunadamente, la propuesta se encuentra dirigida a un BRI y el método visualiza un esquema de escalabilidad del medio robótico.

Otros estudios exploraron estrategias computacionales que se apoyan en algoritmos que utiliza la IA para la resolución de problemas específicos. Estos métodos son explorados por los autores para aplicaciones arquitectónicas, con el fin de concebir procesos digitales generativos para el desarrollo de modelos virtuales que funcionan como base para crear realidades espaciales y constructivas, que pudieran ser trasladadas a lógicas de FD.

Por ejemplo, Castriotto et al. (2019) exploraron topologías que contribuyen a la creación de estructuras autoportantes con la utilización de barotes de dimensiones reducidas, Bouayad (2019) recuperó patrones bidimensionales tradicionales japoneses como recurso inicial para generar, con procesos generativos multi-agente, estructuras tridimensionales. También, del Campo et al. (2021) buscaron trasladar la generación de imágenes en 2D, realizadas por aplicaciones avanzadas de IA, a 3D para desarrollo arquitectónico.

También, tanto Wang y Snooks (2021) como Bao et al. (2022) realizaron integraciones de estrategias algorítmicas que utiliza la IA para el DG y la optimización de estructuras arquitectónicas. Todos estos ejemplos, muestran estrategias computacionales que son referencia importante, como metodologías digitales, para realizar desarrollos en torno a modelos de IC que pueden ser aplicados en sistemas multi-robóticos en el objetivo de automatizar la fabricación arquitectónica. Sin embargo, los artículos sólo orientan estos avances de producción digital al diseño computacional generativo y no al desarrollo de modelos de inteligencia que condicione el comportamiento de medios robóticos colaborativos.

De todos los autores que conforman este último grupo de artículos, destacan aquellos que, integraron en un solo proyecto de investigación, las estrategias previamente mencionadas (Figura 15). Por ende, mediante un enfoque de disminuir el tamaño del medio robótico y del material constructivo, de apostar por una lógica de multiplicidad de las unidades robóticas, de integrar estrategias de diseño computacional, así como desarrollar y aplicar modelos de IC para la interacción entre robots, logran consolidar sistemas de FD con cualidades para contribuir a la accesibilidad del medio tecnológico.

Por ejemplo, Hou y Loh (2021) que propusieron un método de construcción colectiva con un sistema multi-robótico, que está diseñado para excavar a manera de topo y vaciar concreto en los túneles resultantes, implicó el diseño del sistema, las unidades robóticas y el mecanismo de inteligencia para la interacción y comportamiento de éstas. Sin embargo, en el caso de este artículo, la propuesta se limitó a plantear sus implicaciones a nivel arquitectónico y urbano y se mantuvo en un alcance teórico con respecto a los detalles del sistema robótico y la proyección del MBA utilizado como modelo de IC.

Sin embargo, Kayser et al. (2018), investigación de la cual tomó referencia el trabajo anterior, mostraron el modelo de IC que es el fundamento para condicionar el comportamiento e interacción entre unidades del sistema multi-robótico. También, realizaron los prototipos robóticos de manera asequible en laboratorio y los pusieron a prueba en un experimento demostrador que construye estructuras arquitectónicas portantes con fibra de vidrio estabilizado mediante resina foto-curable.

Cada robot, con una lógica de fabricación aditiva, acumula filamentos de fibra de vidrio y extruye de forma tubular los elementos. El comportamiento de las unidades robóticas es distribuido y dirigido por una interfaz de programación realizada por los autores, a través de la

cual, se habilita el modelo de IC, que sigue los lineamientos Multi-Agente de la IE. Este proyecto de investigación es una de las referencias más importantes en el objetivo de discernir modelos de FD e IC que contribuyan a la accesibilidad del medio tecnológico; sin embargo, el artículo no presentó detalles del programa, el modelo algorítmico de la inteligencia o la lógica de diseño del prototipo robótico.

Bajo una lógica similar, Leder et al. (2022, 2019) desarrollaron un sistema de robótica colectiva específica y co-diseñada para un sistema arquitectónico. También siguió una lógica de fabricación aditiva, pero a diferencia del proyecto anterior, este trabajo se basó en el ensamblaje de elementos discretos de madera de dimensiones reducidas, que son manipulados por unidades robóticas móviles que tienen la capacidad, con rotación, de realizar encadenamientos cinemáticos y disponer los elementos constructivos. Los elementos fueron realizados con impresión 3D, elementos metálicos en laboratorio, con soluciones mínimas de hardware y software.

El trabajo documentó la lógica matemática de odometría e indicó la aplicación de un MBA (realizado por los autores) como herramienta de DG, así como la utilización de una interfaz personalizada realizada en *Unity3D*. Esta investigación, también es una referencia importante para los objetivos de esta revisión, sobre todo por el objetivo que tuvieron de reducir el material constructivo bajo una lógica de ensamblaje y simplificar el sistema robótico. A pesar de ello, el trabajo se encuentra en una fase experimental y no muestra el detalle del funcionamiento del MBA que utilizaron, así como el protocolo de comunicación existente entre lo virtual y lo físico.

También, Yablonina y Menges (2019) describieron sus trabajos y avances con respecto a sistemas multi-robóticos que desempeñan tareas de manera distribuida. En este caso, las

unidades robóticas, que también son de tamaño reducido, asequibles y realizadas en laboratorio, tienen la misión de manipular filamentos de fibras de polímero para, a través de un sistema de tejido, generar sistemas y espacios arquitectónicos. El artículo manifiesta el enfoque de los autores por evitar el diseño orientado a una robótica centralizada; desafortunadamente, el escrito tiene un carácter descriptivo y teórico, de tal manera que no muestra detalle de las metodologías y estrategias aplicadas en los proyectos ejemplares.

Con respecto a trabajos que, bajo un enfoque de fabricación textil mediante el tejido automatizado de fibras de polímero, Tucker et al. (2022) expusieron el diseño de una plataforma *ciberfísica* para la fabricación de un espacio tejido con un sistema multi-robótico, bajo una lógica de fabricación paralelizada. Al igual que los proyectos anteriores, y específicamente con referencias a los trabajos de Kayser et al. (2018), Yaboblina y Menges (2019) y Vasey et al. (2020), los robots móviles buscan superar las limitaciones de tamaño y flexibilidad de la maquinaria industrial.

La investigación incluyó la creación personalizada del hardware robótico, así como el sistema de IC para su comportamiento. También el esquema de generación de tareas y los protocolos de comunicación multi-agente. De esta manera, mostró detalle del diseño y el proceso teórico de la fabricación robótica; sin embargo, sólo demuestra el funcionamiento del sistema multi-robótico, la comunicación *ciberfísica* y su comportamiento, y no el proceso de fabricación y entretejido. También, los protocolos de comunicación *ciberfísica* son altamente complejos y no son accesibles para personas no especializadas.

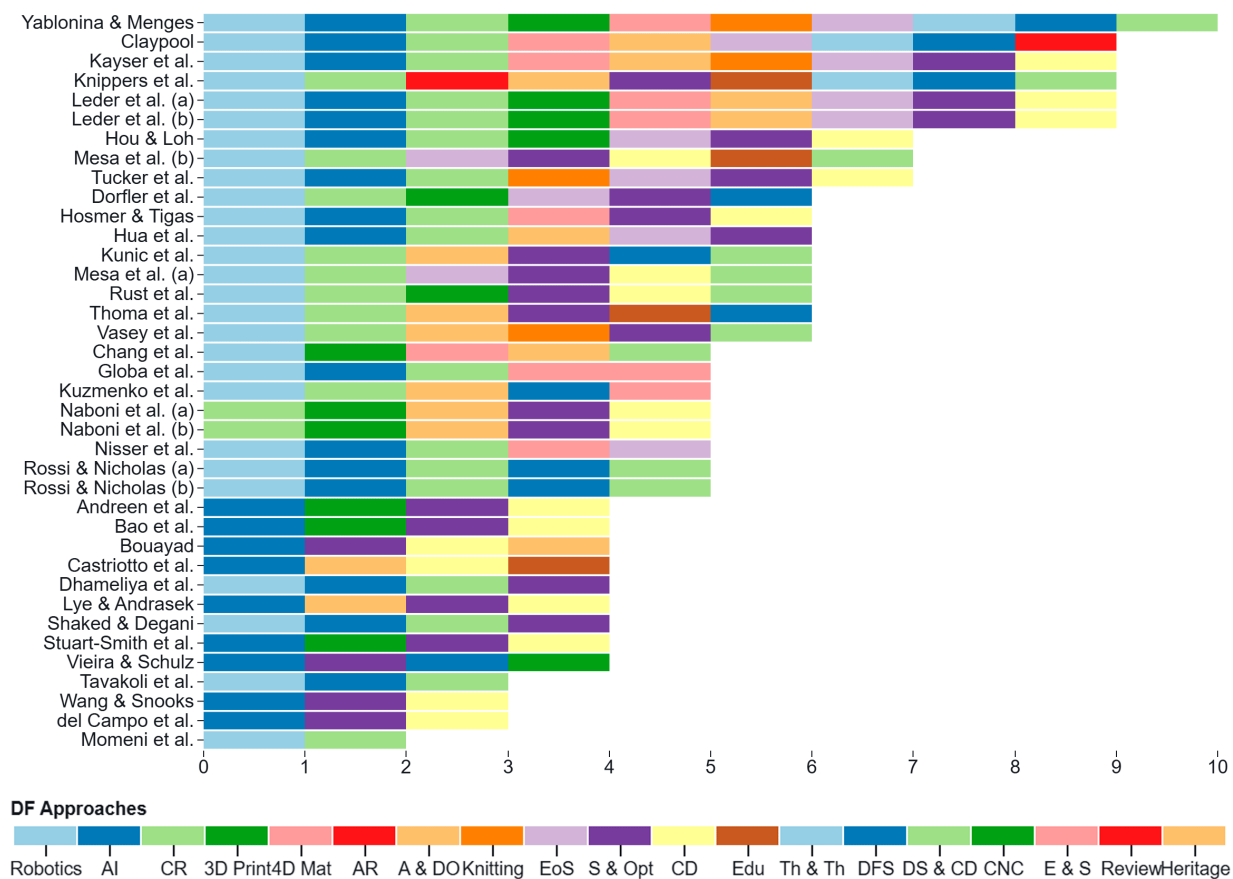
Finalmente, Hosmer y Tigas (2019) también presentaron un sistema multi-agente y multi-robótico, en el que cada unidad robótica (por sí sola) constituyó el material constructivo de la estructura arquitectónica. Esta lógica, se orientó a que cada unidad funciona como un material

4D que es reactivo a estímulos preprogramados, de tal forma que, con su movilidad genera esquemas de auto-estructuración, auto-balance y reconfiguración espacial.

Aparte, esta propuesta se diferencia de las anteriores, porque el comportamiento del sistema fue determinado por el entrenamiento de las unidades robóticas mediante *Deep Reinforcement Learning* (DRL), como herramienta de IA avanzada. En el caso de este artículo, los resultados se obtuvieron principalmente por simulación computacional, esto implicó que la dinámica simulada sea inexacta con respecto a la real. También, en este caso, implementar una gran cantidad de agentes complica la cooperación Multi-Agente con respecto a la tarea de auto-balance.

Figura 15.

Enfoques de autores del grupo de artículos orientados a la “Construcción Multi Robótica e IC”.



Nota. AI: inteligencia artificial; CR: robots colaborativos; 4DMat: materiales 4D; AR: realidad aumentada; A&DO: ensamblaje y objetos discretos; EoS: economía de escala; S&Opt; simulación y optimización; CD: diseño computacional; Edu: educacional; Th&Th: teoría y pensamientos; DFS: estrategias de FD; DS&CD; sensores digitales y recolección de datos; CNC: corte CNC – fresado y herramientas; E&S: ambiente y sustentabilidad. Elaboración propia (2023).

3. CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

Ante el objetivo principal de desarrollar un modelo accesible de Inteligencia Colectiva para la fabricación automatizada de la Envolvente Arquitectónica, la posición de la presente investigación es utilizar los medios tecnológicos – digitales en el proceso de producción arquitectónica a manera de involucrarse con el Internet de las Cosas (IoT) (Ervin citado por Cantrell y Mekies, 2018).

Por otro lado, la previa revisión del Estado del Arte expone una interrelación de enfoques de FD, que sirven como antecedentes para el presente Marco Teórico (MT) y que permiten estructurar los modelos, metodologías y estrategias que se desenvuelven a partir de las aportaciones de información obtenidas (Figura 16). Destacan las contribuciones expuestas por Knippers et al. (2021) por describir las principales áreas de estudio que en la FD se interrelacionan para generar un esquema integral de aplicación en la construcción automatizada.

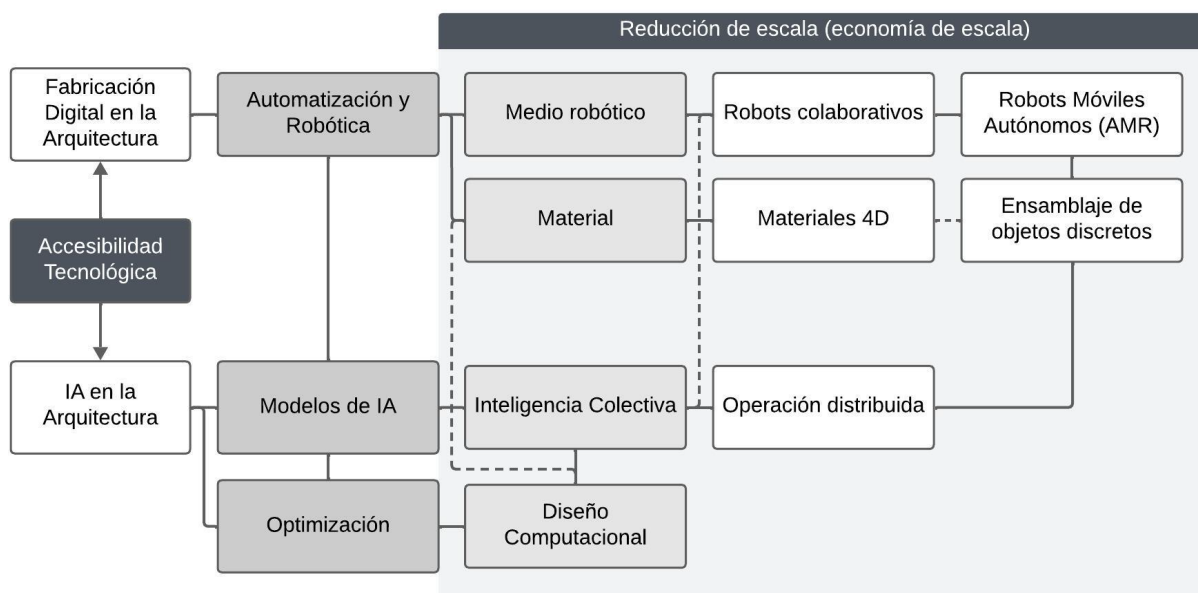
De esta forma, estas aportaciones giran en torno a los principales enfoques de FD que se identificaron como oportunos para contribuir con la Accesibilidad Tecnológica (AT) como: (a) los *robots colaborativos*; (b) *la economía de escala* o reducción del tamaño de la unidad robótica y el material, con estrategias de optimización por medio de métodos de (c) *Diseño Computacional*; la innovación en el desarrollo de materiales como (d) los *materiales 4D*, por sus cualidades dinámicas de interacción con el entorno arquitectónico y el ambiente, así como los procesos de fabricación aditiva como (e) el *ensamblaje de objetos discretos*.

También, al considerar que el objetivo de investigación del presente trabajo implica el desarrollo de un modelo computacional de inteligencia para ser aplicado en un SMR, abordar los modelos que utiliza (f) la *IA* como herramienta es un aspecto importante para considerar en este trabajo. De esta manera, las áreas de estudio que se desarrollarán en los siguientes subapartados

son: (1) *Estrategias computacionales en la Fabricación Digital y la Arquitectura*, (2) *Fabricación Digital, Robótica e integración en el Diseño*, (3) *Los sistemas computacionales y la Arquitectura*, así como la (3) *Fabricación Digital e Inteligencia Artificial: Automatización e Inteligencia Colectiva en la Arquitectura*.

Figura 16.

Diagrama para la estructuración del Marco Teórico. Se toma como antecedente importante, las referencias metodológicas analizadas en la revisión del Estado del Arte.



Nota. Elaboración propia (2022).

3.1. Estrategias computacionales en la Fabricación Digital y la Arquitectura

Actualmente, la computadora es un representante fundamental, como medio tecnológico, para las actividades académicas y profesionales de la Arquitectura y el Diseño en general. En la Arquitectura, los sistemas de automatización se encuentran estrechamente vinculados con el *Diseño Computacional (DC)*. Éste, hace referencia al conjunto de métodos, estrategias y herramientas computacionales (de carácter algorítmico y paramétrico) utilizadas con fines de resolución de problemas en el diseño; una perspectiva diferente a entender a la computadora

como una herramienta representacional que imita el acto de dibujar (digitalmente) (Fraile Narvaez, 2022).

Esta relación existente, entre los sistemas de automatización y el DC, inicia con el surgimiento de los programas de tipo “Diseño Asistido por Computadora” (*Computer Aided Design*; CAD) (Bernstein, 2022; Chaillou, 2022; Tedeschi, 2014). El programa llamado *Sketchpad* (1963), considerado uno de los programas CAD pioneros, abrió paso en 1982 al programa computacional con mayor éxito comercial: *AutoCAD*, programa que hasta la fecha es altamente utilizado en la profesión (Chaillou, 2022; Tedeschi, 2014).

Este hecho contribuyó a proyectar nuevos modelos de trabajo en varias disciplinas afines al Diseño. Así, las disciplinas computacionales y la Arquitectura, han mantenido una relación de contribución mutua, que ha promovido a que esta última, se le atribuya antes que cualquier otra, la idea de abandonar la *producción estandarizada en masa* para trasladarse a la *personalización digital en masa* (Carpo, 2017). A continuación, se hace un recuento histórico del DC y como ha influenciado los mecanismos, sistemas, metodologías e investigación en torno a la Fabricación Digital.

3.1.1. Diseño Computacional en la Arquitectura.

Existen referencias importantes que han sido determinantes en la visión de generar proyectos con el uso de los sistemas computacionales como medio para el desarrollo arquitectónico. En el marco del desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, el británico matemático y científico, Alan Turing, establece la fundación de la computadora moderna en el año 1937 en su artículo seminal de “Números Computables”. El hecho de que una máquina tuviera la facultad de completar una tarea humana en el menor tiempo posible significó para sus contemporáneos un concepto totalmente nuevo (Cantrell y Mekies, 2018).

Otro suceso importante en torno al uso computacional en la arquitectura fue la invención, primero del programa PRONTO de Patrick Hanratty en 1959 (Chaillou, 2022), y luego, del *Sketchpad* en 1963 por el científico en computación americano Ivan Sutherland, entendida como la primera máquina de comunicación gráfica y el primer programa interactivo *Computer Aided Design (CAD)* (Tedeschi, 2014).

Posteriormente, el ingeniero francés Pierre Bézier, desarrolla en 1966 el primer programa CAD que genera curvas complejas, a través de una clase de elemento llamado *B-splines* (Chaillou, 2022; Wujec, 2017). Este programa corría en computadoras centrales y fue principalmente utilizado en la industria automotriz. También, esta innovación permitió dar el salto al modelado en tercera dimensión.

El avance tecnológico en torno a los sistemas computacionales, así como la accesibilidad comercial de los mismos, comenzaron a tener una presencia más fuerte en la sociedad a nivel global. La influencia de *Sketchpad* abre paso en 1982 al programa computacional con mayor éxito comercial: *AutoCAD*, programa que hasta la fecha es altamente utilizado en la profesión. Éste hecho marcó pauta para proyectar nuevos modelos de trabajo con el uso computacional en varias disciplinas afines al diseño arquitectónico, ingeniería y construcción.

Wujec (2017) identifica que la relación entre el diseño y la computación, se desarrolla en cuatro eras (Figura 17): (1) la primera deriva de la invención de los programas CAD, los cuales esencialmente imitan la acción de dibujar, (2) la segunda se relaciona con el avance de los programas CAD para producir, visualizar y manipular modelos en tercera dimensión, (3) la tercera corresponde al momento en el que fue posible agregar propiedades físicas a esos modelos para poder ser usados en simulaciones; nuevos algoritmos permiten la interrelación de los

objetos, (4) la cuarta era nace a partir de la cuarta revolución industrial y es la era en el que las máquinas tienen la capacidad de aprender.

Si bien, las cuatro eras anteriores describen el avance de los programas CAD, es hasta la cuarta era cuando realmente se le puede asignar a la computadora la propiedad de asistir al diseño. En las primeras tres eras, las computadoras asisten a representar y documentar. En palabras de Wujec (2017), “el diseño se encontraba, en gran medida, en la imaginación del diseñador. La computadora necesitaba ser instruida para representar la idea de la imaginación a una forma legible en la máquina” (2017, p. 88).

En la cuarta era, la computadora muestra una inteligencia que combina algoritmos que permiten el reconocimiento de patrones y manejo de datos con sistemas de IA (Redes Neuronales, *Machine Learning*, etc.) y Computación Distribuida, para realizar un cambio de paradigma con el uso de los sistemas computacionales y trasladarse de comprenderlos como una herramienta representacional a socios creativos que ayudan a explorar y tomar decisiones de diseño (Wujec, 2017).

3.1.2. Enfoques teóricos y metodológicos del Diseño Computacional.

Es posible posicionar el uso computacional a nivel internacional en la Arquitectura, a partir de la caracterización taxonómica que Frampton (2014) propone sobre la arquitectura en la era de la globalización como *Morfológica* (1980 al año 2010). La manifestación de un grupo de arquitectos a finales del siglo XX en la escena europea como: Zaha Hadid, Ben van Berkel, Wolf D. Prix, Hani Rashid, así como en la norteamericana: Frank Gehry, Eric Owen Moss, Thom Mayne, Greg Lynn; tienden a emular la estructura de la forma biológica gracias a los avances en la tecnología computacional, que permitieron explorar esas inquietudes con programas CAD como medio para el desarrollo formal de sus proyectos.

Sin embargo, los arquitectos mencionados anteriormente partían de métodos y diagramas analógicos que después eran trasladados y trabajados digitalmente, con el objetivo de reproducir sus formas (Eisenman, 2011). Es Greg Lynn (1998) quien desarrolla un discurso en torno al algoritmo informático a favor de un enfoque bio-mórfico en la arquitectura (con un origen totalmente digital).

Cabe mencionar, que en todos estos casos tiene un mayor peso las transformaciones de la forma del producto a diseñar que las variables determinantes en la configuración de un proyecto, como lo son el clima, la topografía, los materiales, el programa arquitectónico y la función. La manera, por tanto, tiene un enfoque principalmente *escultórico* al momento de desarrollar una obra de arquitectura.

Carpo (2017) reconoce el momento explicado anteriormente como el *primer giro digital de la Arquitectura*, específicamente a partir de 1990, cuando los arquitectos adoptan los cambios en las herramientas digitales antes que cualquier otra disciplina y ven en ellas una oportunidad de generar productos *personalizados* en masa sin generar un costo añadido, y no *estandarizados* como hasta entonces era el paradigma de producción y mercado a nivel internacional (Figura 17). “Arquitectos -no todos, pero si los mejores- adoptaron las herramientas digitales y abrazaron el cambio digital antes que cualquier otro negocio, industria o profesión creativa” (Carpo, 2017, p. 3).

Posteriormente, ya en siglo XXI, Patrik Schumacher (2011, 2012) -socio principal en *Zaha Hadid Architects*- busca posicionar la arquitectura computacional (paramétrica) en un nivel estilístico o paradigmático, mediante el manifiesto hecho en el 2008 para la Bienal de Venecia llamado *Parametricism as Style* (2009) donde hace una descripción de las cualidades y características formales que los productos arquitectónicos deberían poseer, con el uso de técnicas

de diseño paramétrico, como el camino hacia la gestación de un nuevo estilo al cual llama “Parametricismo”.

Schumacher (2009, 2011, 2012) considera al *Parametricismo* como el sucesor del movimiento moderno, y agradece su génesis a los nuevos avances en la tecnología digital, que le dan la capacidad de desarrollar una estética de fluidez, continuidad, diferenciación y complejidad, con una mayor sintonía a la encontrada en la naturaleza, en donde no encontramos líneas rectas.

Si bien, su visión reconoce las estrategias paramétricas como un mecanismo importante en el uso computacional para el diseño de objetos arquitectónicos, su manifiesto tiene un fuerte apego a la búsqueda de la novedad en la estética del producto.

Con respecto a este enfoque *Morfológico y Esculturalista* de aplicar los sistemas computacionales en la Arquitectura, primeramente, al arquitecto Peter Eisenman (2011) se le atribuye anticipar un cambio cultural y técnico que engendrará un nuevo estilo arquitectónico basado en curvas y superficies suavizadas (Carpo, 2017). También, es considerado un precursor en el desarrollo de procesos de personalización en masa y heterogeneidad de objetos. “*Eisenman Architects* adoptó las primeras tecnologías de computacional personal accesibles para explorar conceptos extraídos de la biología como la adaptación y la morfogénesis, así como de la filosofía de Gilles Deleuze” (Claypool et al., 2019, p. 24). También, es el mismo arquitecto Eisenman (2011) quien considera que Greg Lynn (1998) propone diagramas arquitectónicos donde el origen formal parte de lógicas computacionales.

De esta manera, es posible distinguir a Lynn como pionero con respecto la manipulación de algoritmos en el diseño computacional bajo el discurso de emular organizaciones biológicas con un origen totalmente digital y sin antecedente o registro de información determinante para el desarrollo de la forma arquitectónica (Eisenman, 2011).

Por otro lado, Frampton (2014) considera a Lynn como el principal teórico morfológico de la “figura”, que evoca los principios comunes de la forma animal como medio para fundamentar la prioridad de la curvilinealidad y la metamorfosis digital para favorecer las superficies polimórficas a las que llama *BLOBS* (glóbulos). Así, Greg Lynn (1998) desarrolló un planteamiento inexplorado y diferente a las manifestaciones arquitectónicas pertenecientes a las última década del siglo XX, donde el uso computacional como auxiliar en el diseño era únicamente representacional a través del dibujo digital.

Los estudios a profundidad de los recursos computacionales aplicados en el desarrollo arquitectónico, así como los diagramas arquitectónicos de Lynn en torno al *BLOB*, constituyen una de las principales directrices del *primer giro digital en la Arquitectura*. Después, en el 2002, Frank Gehry funda la empresa *Gehry Technologies* con el fin de desarrollar avances tecnológicos en torno a los primeros programas paramétricos de edificación llamados *Building Information Modeling* (BIM), que permitieron un progreso en el ámbito de proyecto colaborativo interdisciplinario,

Ya iniciado el siglo XXI, ante la influencia latente de las teorías y metodologías de Lynn, paralelamente son exploradas las plataformas algorítmicas y de programación computacional en la arquitectura de una manera más amplia. Sin embargo, es hasta el 2008 cuando el diseño paramétrico es discutido en el medio arquitectónico internacional con el manifiesto de Patrik Schumacher (2009, 2011, 2012) *Parametricism as Style*, y es allí cuando se cuestiona si el *Parametricismo* establecería el inicio de una nueva manera de hacer y transmitir Arquitectura.

Schumacher es uno de los exponentes más importantes de la arquitectura computacional en la segunda década del siglo XXI, ya que fue quien planteó un primer escenario sólido en torno al diseño con el parámetro digital como medio relevante para la generación morfológica de un

sistema arquitectónico. Su visión obedece a las principales preocupaciones de la era digital en la primera década del siglo XXI, poner a prueba todos los alcances computacionales para desarrollar sistemas complejos con geometría curvilínea, fluida, de continuidad y diferenciación constante, en la búsqueda de un nuevo paradigma mediante una naciente estética.

Esta postura, a diferencia de Lynn, sí toma en cuenta información relacionada con la problemática arquitectónica, como los parámetros que alimentarán la generación de un sistema formal y espacial que moldeara un objeto arquitectónico, y que no es producto del desarrollo autónomo de un algoritmo computacional aislado.

Paralelo a la visión de Schumacher, el siglo actual muestra una discusión nutrida y diversa con relación al diseño arquitectónico paramétrico. En contraste al enfoque estilístico del *Parametricismo*, surgen discursos que consideran más importante la aportación *tecnológica* de los sistemas computacionales y sus herramientas que los objetivos morfológicos en el diseño arquitectónico. Este enfoque aprovecha el acelerado avance tecnológico de los recursos digitales, y los ve como un medio de transformación en los sistemas culturales, creativos y de producción.

Estas inquietudes arquitectónicas morfológicas, contribuyeron a que la Arquitectura, antes que cualquier otra disciplina, abandonara la *producción estandarizada en masa* para trasladarse a la *personalización digital en masa* (Carpo, 2017). “El traslado del Post-Fordismo en la Arquitectura se caracteriza claramente por este cambio de la estandarización en masa a la personalización en masa de la segunda mitad del siglo XX” (Claypool et al., 2019, p. 24)

Por otro lado, Kostas Terzidis (2006) parte de revisar las raíces etimológicas de la palabra diseño, para así cuestionar la existencia de la novedad y si ésta tuviera que ser el espíritu de las manifestaciones de Arquitectura Paramétrica (AP). Apoyado en la filosofía pre-Socrática, menciona que todo conocimiento, proceso o producto generado tiene precedente o raíz, y por

tanto lo entiende como emergente en vez de novedoso. A través de esta idea destaca la importancia algorítmica de las definiciones paramétricas y el carácter difuso que comparte con el proceso de diseño en busca de respuestas hacia lo desconocido (o lo todavía no encontrado). Así, Terzidis no posiciona la arquitectura paramétrica como un paradigma o estilo, sino como una metodología de enfoque Algorítmico que aplica la tecnología digital en el quehacer arquitectónico.

Carpo (2017) distingue que, aunque las computadoras de ese tiempo ya trabajaban de manera eficaz, la informática era aplicada bajo la lógica de un suministro limitado de datos, debido a que eran aún considerados artículos costosos. Esta lógica, que fue llamada “*Small Data*”, es la que caracterizaba la forma de trabajar de esa *primera era digital* de la Arquitectura.

Conforme avanza el tiempo, la tecnología digital también lo hace a un ritmo cada vez más acelerado, y el *primer giro digital* de la arquitectura termina en el momento que la información comienza a proliferar (gracias al internet), tanto como el acceso de las personas a las computadoras personales, las cuales progresivamente tienen mayor capacidad de almacenamiento. Esto abre camino al concepto de “*Big Data*” (mencionado por primera vez por Erik Larson en 1989) que se refiere a la capacidad técnica lograda para almacenar y procesar una cantidad creciente de datos a un costo cada vez más bajo. El *Big Data*, proviene del término inglés que describe a los macrodatos o inteligencia de datos, es decir, al conjunto de datos de gran escala, que son tan grandes y complejos, que no pueden ser procesados con métodos tradicionales que no sean informáticos.

Esta evolución tecnológica, está en proceso de cambiar los procesos de producción y la manera en el que se desenvuelven todas las disciplinas del siglo XXI. En Arquitectura el cambio sucede a partir del 2010; poco después de que *Gmail*, como motor de información, dejará de ser

una versión *beta* y haya forjado en los usuarios un criterio de búsqueda, y no de clasificación de información, como un medio más coherente de desplazamiento en el *Big Data*.

Así, a partir de ese año se da el paso al *segundo giro digital de la Arquitectura* (Carpo, 2017, 2019). Este suceso representó una evolución significativa en la IA, con repercusión no sólo en la Arquitectura, sino en todas las áreas de conocimiento. Carpo sostiene que dicha repercusión ha cambiado la manera con la que se utilizan los medios tecnológicos en el método científico y que existe un traslado de una lógica causal, requerida cuando se tiene un número limitado de datos (*Small Data*), a una nueva que aprovecha las virtudes de la IA revolucionada por el *Big Data* y que permite resolver problemas complejos mediante operaciones computacionales en un periodo corto de tiempo (Figura 17).

Esta nueva lógica marca pauta a una metodología de diseño donde las simulaciones digitales son fundamentales, en vías de solucionar problemas arquitectónicos complejos relacionados con la forma, el espacio y su adaptabilidad con el entorno. En otras palabras, los nuevos métodos adoptan un carácter *heurístico* computacional, para dejar atrás el de lógica *causal* producto de la necesidad de ecuaciones matemáticas por la falta de información.

Las computadoras pueden trabajar de esa manera, y nosotros no, porque el ser humano no puede ejecutar una gran cantidad de cálculos cualquier cantidad de tiempo práctico. A diferencia de los humanos, la computadora no necesita ciencia para comprimir y acortar sus operaciones basadas en números. (Carpo, 2019, p. 89).

La importancia algorítmica destacada por Terzidis (2006), toma un carácter pertinente con metodologías *heurísticas computacionales* en el *segundo giro digital* de la Arquitectura. Las principales estrategias algorítmicas producto de este enfoque, tales como los autómatas celulares,

las búsquedas estocásticas, los sistemas-L o los fractales, abren camino al concepto de *Diseño Generativo (DG) en la Arquitectura*. Según Caetano et al. (2020):

Algunos autores definen el DG como un proceso que principalmente se refiere a técnicas evolucionarias tanto para la creación, como para los procesos de producción de las soluciones de diseño; sin embargo, otros no restringen el DG con los procesos evolucionarios, considerándolo un enfoque de diseño basado en procesos algorítmicos basados en reglas que generan múltiples, y posibles, soluciones complejas. (2020, p. 8).

Las aportaciones del enfoque algorítmico, la evolución de los sistemas computacionales, la IA, el avance en los medios de producción y la robótica del *segundo giro digital* de la Arquitectura (Carpo, 2017, 2019) o la cuarta era de Diseño Asistido por Computadora (Wujec, 2017), motivan a arquitectos como Achim Menges (2008; 2008, 2015; 2020), Neri Oxman (2015), Gramazio Kohler a explorar las áreas de oportunidad abiertas por estas innovaciones.

A través de la investigación y el DG, desarrollan proyectos avanzados que son ejemplares en la optimización de desempeño de su materialidad y cualidades constructivas, para apuntalar la vanguardia en el diseño y cambiar el paradigma de los procesos de fabricación y edificación. Este enfoque *Performativo* es producto del método *heurístico*, la simulación y los avances en cuanto al alcance de realización de la tecnología. “El enfoque debe estar en explorar nuevas posibilidades y utilizar los medios de nuestro tiempo para tener en cuenta la complejidad de los aspectos cualitativos y cuantitativos que componen un edificio” (Menges y Knippers, 2020, p. 8).

Automatización, biomimética, FD, impresión 3D, materiales experimentales, autoorganización o autoensamble, son algunas de las estrategias que se exploran como nuevas metodologías en los procesos de construcción de objetos. En palabras de Menges (2015), el

enfoque tiene como objetivo investigar, “la reciprocidad entre el material y lo computacional en Arquitectura, sus múltiples y profundas interrelaciones con tecnología, biología y cultura” (2015, p. 7).

Por otra parte, la influencia de los últimos desarrollos arquitectónicos con relación a la tecnología computacional ha motivado a otro grupo de arquitectos a alinearse con la crítica a los métodos causales modernos y al sistema político capitalista neoliberal que caracterizaron la segunda mitad del siglo XX y la primera década del siglo XXI, que tuvieron una condición arquitectónica de geometría diferenciada, fluida y ortodoxamente continua, con el predominio formal de la curvilinealidad derivada del uso de geometría basada en las *splines*.

La postura crítica y *política* va directamente en contra de las inquietudes escultóricas de los años 90 que evolucionaron hasta llegar a la cúspide *Parametricista* de Schumacher (2009, 2011, 2012). Se posiciona en sintonía con la teoría de Carpo (2017, 2019) relacionada con la segunda era digital de la arquitectura, con un enfoque arquitectónico constituido por elementos separados, sincopados y repetidos (en serie) para generar sistemas complejos producidos bajo métodos *heurísticos* de simulación digital, sistemas de automatización y robótica para la FD bajo una lógica de ensamble.

Este enfoque adopta la denominación de *Discrete* (Retsin, 2019) o “Discreto”, desde su connotación de “separado” o “distinto” según la RAE, a partir de la primera aproximación de Carpo (2017) con el término *Discreteness* (Discreción). “*Discreteness*’ es una noción que proviene de las ciencias, que se refiere a lo que es individual y separado. Es lo opuesto a lo continuo, a lo que es ininterrumpido y fluido” (Retsin, 2019, p. 8). Derivado de estos vocablos, Morel (2019) llama a esta visión *Discretism* (Discretismo), con el fin de alinearlos con su

contraparte paradigmática *Parametricism*, en el artículo *The Origins of Discretism: Thinking Unthinkable Architecture* de la revista *Architectural Design* 89(2).

De esta forma, los arquitectos Gilles Retsin (2019; 2019), Philippe Morel (2019) o José Sánchez (2019, 2020) bajo la idea del *Discretismo*, buscan dar respuesta con la tecnología digital más avanzada, la crítica y un enfoque *político* a la crisis económica del 2008. Se posicionan en un escenario donde los elementos que conforman el sistema arquitectónico son de repetición serial compleja, con el objetivo de generar formaciones más oportunas a las necesidades de aprovechamiento de materiales asequibles, más endeble o provenientes de la reutilización o desperdicio.

A diferencia de la arquitectura vigente de Lynn (1998) y Schumacher (2009, 2011, 2012), los últimos enfoques sobre la arquitectura computacional se desligan de las exploraciones morfológicas promovidas en el siglo XX, y encuentran mayor significado a las aportaciones tecnológicas de las herramientas digitales, así como las oportunidades de automatización e IA, que se ha desarrollado de manera acelerada en los últimos años, gracias al fenómeno del *Big Data*.

Kostas Terzidis (2006) hace un análisis de las capacidades que puede brindar la computadora como auxiliar en el diseño, contrasta la “computación” y la “computarización” como dos maneras en las que puede ser utilizada. Mientras la primera es relacionada con el cálculo y la resolución de problemas difusos, la segunda se refiere al potencial de organización, procesamiento y representación de información ya preconcebida; estas últimas capacidades son utilizadas más intensamente, en el quehacer arquitectónico, a través de programas *Computer Aided Design (CAD)*.

Este análisis, fue importante para sustentar el valor que encuentra en el algoritmo como el medio para explorar la capacidad de “computación” y para demostrar que esta forma es la única en la que la computadora realmente puede asistir en el proceso de concepción del diseño. Por lo que Terzidis (2006) clasifica las estrategias algorítmicas como recursos de diseño, y destaca su aplicación en la Arquitectura. Algunas de estas estrategias son: *multi-booleanos, búsquedas estocásticas, fractales, autómatas celulares, hibridación, morphing* o *recursión*.

Contrario a Lynn (1998), que también explora el algoritmo como herramienta de diseño, el énfasis que le da Terzidis (2006) se apoya en considerarlo un medio para resolver la problemática arquitectónica, y no como un fin para definir la figura. Aunque Terzidis (2006) coincide con Schumacher (2009, 2011, 2012) en que las definiciones paramétricas derivan del pensamiento algorítmico, difiere en considerar los resultados como una novedad estilística. Para el primero, la Arquitectura Paramétrica es un proceso y no un producto con características definidas.

El valor performativo encontrado en el diseño computacional apunta hacia un entendimiento de creación que no se queda en lo digital, sino que requiere ser traducido a lo físico, aunque su creación provenga de un método descendente (*top-down*), de caja negra o *heurística computacional*. Esta visión contrasta con los exponentes anteriores, donde sus principales exploraciones giran alrededor de las cualidades computacionales principalmente virtuales.

Desde el final de la primera década del siglo XXI, las manifestaciones arquitectónicas se posicionan firmemente en la llamada era *post-digital* (o también *segunda era digital*) de la Arquitectura. Cantrell y Mekies (2018) consideran que la Arquitectura hoy en día ha mostrado una maduración que le permite alejarse de la complejidad. “Post-2008, los arquitectos,

instituciones y curadores se evacuaron de lo digital, encontrando refugio en una variedad de nuevas neo-tendencias y obsesiones, que van desde la austeridad-chic al neo-postmodernismo, desde la ontología orientada a objetos hasta el llamado post-digital” (Retsin, 2019, p. 7).

Así, el *Discretismo* también es posible posicionarlo dentro de un ámbito *político*, y no solo como una expresión *tecnológica*, bajo el objetivo de hacer un replanteamiento en la utilización de los avances computacionales aplicados en el diseño arquitectónico, de una manera más prudente con la crisis económica, a través de lo que Sánchez (2019, 2020) describe como una economía de escala, es decir, generar repeticiones complejas automatizadas de materiales asequibles, endebles o provenientes de la reutilización o desperdicio.

Discrete Architecture se encuentra inevitablemente vinculada con lo social y la posibilidad de que un mayor número de pequeñas empresas coexistan. El paradigma de la tectónica Discreta privilegia las unidades autónomas, partes que no son miembros subsidiarios de un entero. Las partes pueden ser recombinadas en múltiples permutaciones identificando una condición tectónica abierta. (Sanchez, 2019, p. 24).

Es importante destacar que este replanteamiento, tiene el enfoque es diluir las brechas entre el proceso de diseño, la generación del modelo digital, el sistema de fabricación, y la materialidad misma, al grado de convertir todos estos pasos en un solo proceso de autoproducción efectuado por las propiedades del mismo mecanismo co-dependiente.

Es posible concluir que la aproximación del *Discretismo* es afín a los diagramas automáticos producidos por lógicas computacionales que se manejaban desde Lynn (sin el concepto de una superinteligencia artificial de por medio), sin embargo, diferente con respecto al resultado formal, ya que no admite la fluidez y la curvilinealidad. Desde esta perspectiva, el

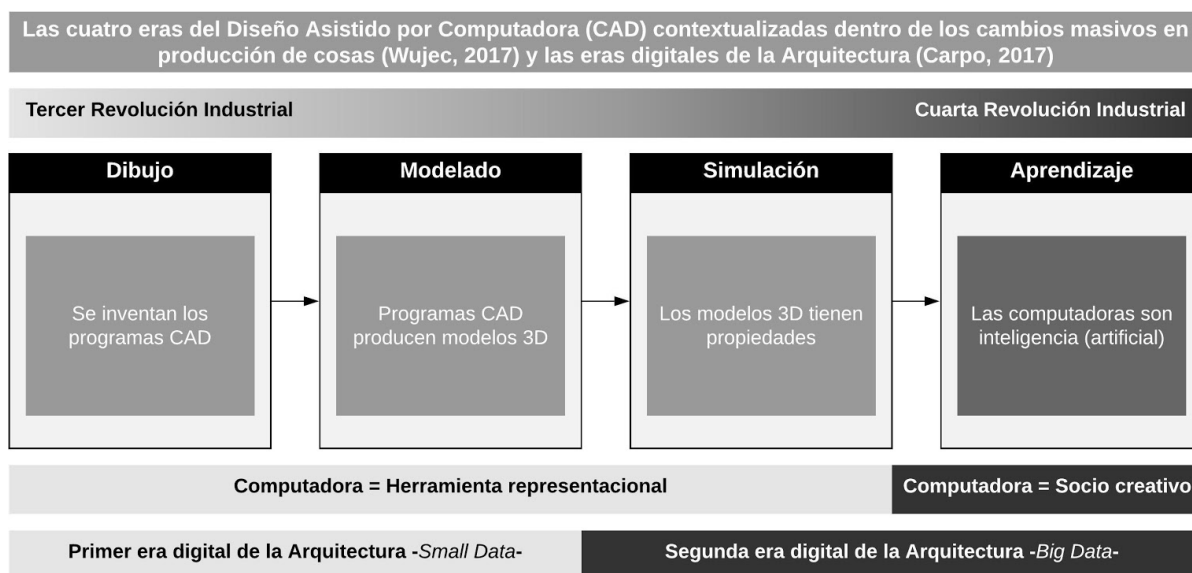
enfoque contrasta con la visión del *Esculturalista* y el *Parametricista* de la *primera era digital* de la Arquitectura.

El enfoque, coincide con el enfoque performativo post-digital, ya que utiliza los procedimientos generativos y *heurísticos* para la creación, así como los sistemas avanzados en robótica para la producción, con la diferencia que el *Discretismo* visualiza que los métodos aditivos de fabricación (impresión 3D y el ensamble automatizado), son los más efectivos para los lineamientos de sus objetivos.

La discusión acontecida en las últimas tres décadas en torno a la Arquitectura computacional refleja contrastes en el significado interpretativo de los parámetros que utilizan para darle sentido a las herramientas digitales. Con relación a esta idea, Cantrell y Mekies (2018) sugieren que mientras las estrategias de diseño computacional abren nuevos paradigmas y oportunidades de diseño, al final se trata de los valores añadidos y de un mejor desempeño en los proyectos.

Figura 17.

Diagrama descriptivo de las cuatro eras de la relación entre diseño y computación.



Nota. Diseño Asistido por Computadora (CAD), contextualizado dentro de las cuatro Revoluciones Industriales según Wujec (2017) y las eras digitales de la Arquitectura según Carpo (2017). Recuperado de “*Algoritmos y Arquitectura: una aportación al Diseño*” (p.29), por Onchi (2021).

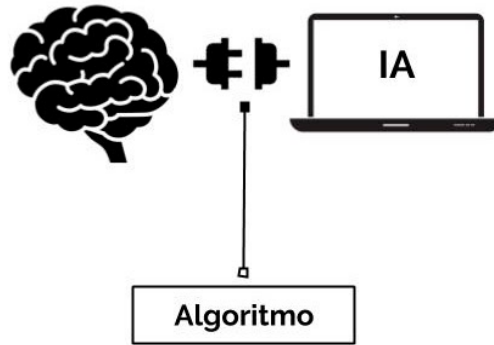
3.1.3. Arquitectura Algorítmica.

Uno de los enfoques más importantes del DC en la Arquitectura, es la fundamentada en algoritmos como medio metodológico para su desarrollo. Por tanto, es necesario definir los aspectos más relevantes relacionados con la Arquitectura Algorítmica. Se considera algoritmo al procedimiento de solucionar un problema en un finito número de pasos con el uso de operaciones lógicas (Terzidis, 2006). En programación computacional se entiende como una secuencia de pasos para ejecutar una tarea (Shiffman, 2015).

Si bien, el uso de algoritmos no es exclusivo de los sistemas computacionales, es allí donde su uso es fundamental, ya que éstos, no solamente tienen la función de describir los pasos del proceso para la solución de tareas, sino que también comunican la información a un tercer agente. Es decir, un algoritmo sirve como un traductor o mediador entre el pensamiento humano y el procesador de una computadora (Figura 18). Este hecho es fundamental, ya que es el medio para desvanecer la desconexión existente entre el diseñador y el computador al momento de diseñar y comunicar el procedimiento de solución de un problema con el pensamiento humano descrito en forma algorítmica (Terzidis, 2006).

Figura 18.

El algoritmo como traductor o mediador entre el pensamiento humano y la computadora.



Nota. Recuperado de “*Algoritmos y Arquitectura: una aportación al Diseño*” (p.12), por Onchi (2021).

Si bien, los programas CAD son desarrollados con algoritmos, sus interfaces en el objetivo de facilitar su uso no permiten su manipulación, sino que se encuentran englobados en una serie de instrucciones predefinidas y preparadas para el uso de la persona. Trabajar algorítmicamente (Figura 19), implica tener conciencia de que: “(1) un algoritmo puede ser escrito de diferentes maneras; (2) un algoritmo requiere de suposiciones; (3) un algoritmo incluye decisiones; (4) un algoritmo complejo puede ser separado en piezas modulares” (Reas y McWilliams, 2010, p. 13).

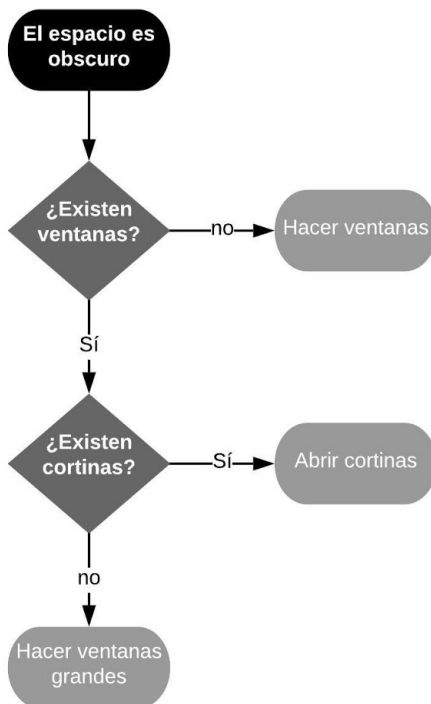
Por lo tanto, el desarrollo algorítmico con aplicación en la arquitectura brinda la oportunidad de generar variantes de diseño y de hacer una descripción de las ideas en una definición algorítmica, la cual tiene como fin encontrar y transmitir a la computadora las rutas de solución a los problemas arquitectónicos con modelos tridimensionales, simulación y procesos de cálculo. Terzidis (2006) define a la Arquitectura Algorítmica como “Algotectura” y en términos más amplios Caetano et al. (2020) describe el concepto como:

El diseño algorítmico es un paradigma de diseño que usa algoritmos para generar modelos y, por tanto, puede ser considerado también como generativo. Sin embargo, en diseño algorítmico, existe una correlación entre el algoritmo y el modelo generado,

proveyendo así trazabilidad y permitiendo al usuario identificar las partes del algoritmo que generaron una parte dada del modelo. En este sentido, en el diseño algorítmico, el algoritmo es isomórfico al modelo. (2020, p. 9).

Figura 19.

Ejemplo de algoritmo expresado en diagrama de flujo.



Nota. Recuperado de “*Algoritmos y Arquitectura: una aportación al Diseño*” (p.13), por Onchi (2021).

3.1.4. Arquitectura Paramétrica.

Otro enfoque relacionado con la Arquitectura Algorítmica y que también se encuentra estrechamente vinculado con el DC es la Arquitectura Paramétrica. El término paramétrico es consecuente de la palabra parámetro el cual procede de raíces griegas. Etimológicamente se encuentra compuesta por el prefijo *para* (junto a, a lado de, contra de) y la palabra *metron*

(medida, instrumento para medir), cuyo significado refiere a un dato o factor que se toma como referencia para analizar o valorar un problema.

Según Jabí (2013) “el diseño paramétrico es un proceso basado en el pensamiento algorítmico que permite la expresión de parámetros y reglas que, juntas, definen, codifican y clarifican la relación entre las intenciones y respuestas de diseño” (2013, p. 201). Por tanto, es sistematizar una serie de parámetros e instrucciones entendidas como variables, que juntas desarrollan un algoritmo, y permiten verificar de manera interactiva la consecuencia de manipular un dato en el objeto arquitectónico resultante. En esencia, según Caetano et al. (2020):

Es un enfoque de diseño basado en el uso de parámetros para describir un conjunto de diseños ... el diseño paramétrico (DP) también se encuentra relacionado con el paradigma *Building Information Modeling* (BIM), ya que usa conceptos de DP como geometría asociativa y relaciones topológicas que establecen dependencias a través de diferentes elementos de diseño. (2020, pp. 7, 11).

3.2. Fabricación Digital, Robótica e integración en el Diseño

La Fabricación Digital es un fenómeno que, en el ámbito de la Arquitectura, se practica y discute hace aproximadamente 27 años (Dunn, 2012). Esta referencia temporal, es coincidente con el *primer giro digital* discernido por Carpo (2017) y mencionado con anterioridad. El traslado que sucedió de la producción estandarizada en masa hacia una personalizada fue una inquietud (y necesidad) que se remonta a los enfoques morfológicos de los primeros arquitectos que exploraron las capacidades computacionales en la disciplina gracias a los programas CAD.

Bajo la idea de que la Arquitectura representa los actos de diseñar y realizar; la información generada desde un programa CAD en la fase de diseño, en algún punto debe ser trasladada al proceso de construcción. En este sentido, el medio tecnológico para traducir el

producto virtual proveniente del CAD a modelos físicos (prototipos) son las maquinarias de tipo “Fabricación Asistida por Computadora” (*Computer Aided Manufacture; CAM*) (Dunn, 2012). Así, la FD puede también ser entendida bajo el término CAD/CAM, y se refiere al proceso computacional/fabricación que procede en el momento que se busca dar un paso hacia delante después de la producción de datos digitales.

Sven Pfeiffer (2020) define a la FD como “la producción de objetos físicos a partir de un diseño y un código generados directamente por el ordenador, normalmente con poca o ninguna intervención manual en la fabricación real” (citado por Hirschberg et al., 2020, p. 407). Nick Dunn (2012) dice que la FD es “una subcategoría del Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la Fabricación Asistida por Computadora (CAM), debido a que utiliza máquinas controladas por computadora como herramientas con las que corta o hace partes” (p.20).

Cabe mencionar que, aunque en la Arquitectura el fenómeno es prácticamente reciente, en el ámbito del diseño industrial y la ingeniería tiene un precedente de más de 60 años (Dunn, 2012), en la producción de aeroespacial, naval, automotriz, defensa e industrial en general (Hirschberg et al., 2020). A partir del año 2000, la FD ha sido considerada dentro de un movimiento cultural llamado “*Maker Culture*”, relacionado con el surgimiento de los *FAB LAB*, que es una red global colaborativa que comenzó como un proyecto de extensión del *Center for Bits and Atoms (CBA)*, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology; MIT*) en el 2001 por el científico computacional americano Neil Gershenfeld.

Esta red internacional es una comunidad abierta y creativa que proporciona acceso a medios tecnológicos de FD, en la que se desarrollan prototipos de diseños avanzados, se ofrecen cursos, capacitación y certificaciones para prototipar y acercar a las personas a la producción digital, con el fin de democratizar la tecnología.

Por tanto, desde la perspectiva de la disciplina arquitectónica, el enfoque principal de FD es hacia el *prototipado o la fabricación rápida*, las cuales tienen como principal exponente la impresora 3D, que es parte de un proceso conocido como “fabricación aditiva”, y que es útil para la producción de modelos o elementos constructivos (Hirschberg et al., 2020). Sin embargo, si se toma como referencia el proceso llamado “fabricación sustractiva”, las maquinarias estelares son los sistemas de Control Numérico Computacional (CNC), que principalmente se utilizan para corte o fresado de partes, ya sea industriales o constructivas.

De esta manera, es posible concluir que existen diferentes procesos en la FD que se encuentran estrechamente vinculados con las taxonomías utilizadas en la fabricación industrial. Sven Pfeiffer (citado por Hirschberg et al., 2020) las distingue como: *procesos aditivos, sustractivos, de transformación, de deformación, de tratamiento de superficies, de unión*, así como *procesos integrados*, que incluyen la Automatización y la Robótica. A continuación, se describen cada uno de estos procesos (Tabla 5).

Tabla 5.

Taxonomía de procesos de Fabricación Digital (FD)

Proceso	Descripción	Método	Subproceso	Material
Aditivo	Describe diferentes procesos que pueden ser usados para reproducir o sintetizar un objeto físico de un mapa 3D, modelo o dibujo.	Fotopolimerización	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estereolitografía (SLA) ▪ Impresión por inyección múltiple (MJP) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fotopolímeros
		Extrusión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelado por deposición fundida (FDM) / Fabricación por filamento fundido (FFF) / Modelado por capa fundida (FLM) / Impresión por inyección plástica (PJP) ▪ Escritura directa de tinta (DIW) / 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Termoplásticos ▪ Metales eutécticos ▪ Cauchos ▪ Plastilina ▪ Arcilla ▪ Materiales comestibles

Proceso	Descripción	Método	Subproceso	Material
			<i>Robocasting</i>	
		Fusión por lecho de polvo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Impresión por inyección múltiple (MJP) ▪ Fusión selectiva por láser (SLM) ▪ Sinterización selectiva por láser (SLS) ▪ Fusión por haz de electrones (EBM) ▪ Cabezal de inyección de tinta tridimensional (3DP) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Termoplásticos ▪ Aleaciones metálicas ▪ Metales ▪ Cerámica ▪ Materiales pulverizados y pegamento
Sustractivo	Describe a los procesos que restan material de un volumen dado para llegar a la forma deseada de un objeto.	Perforado (<i>punching</i>) Fresado (<i>milling</i>)	NA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal ▪ Variable ▪ MDF ▪ Contrachapado (Triplay) ▪ Poliestireno (<i>foam</i>) ▪ Metal ▪ Variable ▪ Madera ▪ Metal ▪ Polímeros
		Torneado (<i>lathing</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Torno ▪ Torno CNC 	
		Molienda (<i>grinding</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Máquina de molienda (<i>grinding machine</i>) ▪ Torno ▪ Pulidora 	
		Erosión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maquinado electroquímico (ECM) ▪ Maquinado por descarga eléctrica (EDM) ▪ Maquinado por haz de electrones (EBM) ▪ Cortadora láser 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cortadora de plasma ▪ Cortadora por chorro de agua 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal ▪ MDF ▪ Fieltro ▪ Madera ▪ Acrílico ▪ El grosor no debe ser mayor a 1 cm ▪ Metal ▪ Metal ▪ Concreto ▪ Cerámica

Proceso	Descripción	Método	Subproceso	Material
		Procesos de calor o electromecánicos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cortadora de cable caliente ▪ CNC de cable caliente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Piedra ▪ Vidrio ▪ Compuestos ▪ Poliestireno (<i>foam</i>) ▪ Arcilla
Transformación	Describe los procesos de transformación del material por alta temperatura o por presión.	Fundición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fundición a presión ▪ Fundición en molde 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal ▪ Metal ▪ Variable
Deformación	Describe los procesos que dan al material una nueva forma sin alterar su estructura molecular o química, con la aplicación de una fuerza y ayuda de altas temperaturas.	Conformado	NA	
		Laminación	NA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal
		Conformación		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polímeros
		Proceso de forja		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variable
		Extrusión		
Unión (conexión)	Los procesos de conexión mecánica, química o térmica crean una unión duradera o temporal entre dos o varias partes separadas para conformar un objeto de forma, geometría o características deseadas.	Soldadura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal
		Soldadura fuerte (<i>brazing</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arcos eléctricos ▪ Plasma ▪ Laser 	
		Sinterización	NA	
Integrados	Referidos a los procesos de Automatización y Robótica.	Robótica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brazo Robótico Industrial (BRI) ▪ Cobot ▪ Robots Móviles Autónomos (AMR) ▪ Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV / Drones) ▪ Sistemas Multi Robóticos ▪ Máquinas automáticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Múltiple ▪ Variable
		Sensores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura ▪ Humedad 	NA

Proceso	Descripción	Método	Subproceso	Material
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gases ▪ Sonido ▪ Iluminación ▪ Presión atmosférica ▪ Movimiento ▪ Rayos infrarrojos ▪ Rayos ultravioleta ▪ Escáner 2D y 3D ▪ Teledetección de pulsos de luz (<i>LiDAR</i>) ▪ Entre otros 	
		Actuadores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neumáticos ▪ Hidráulicos ▪ Eléctricos: motores (corriente continua, paso a paso, servomotor) 	
		Manipuladores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pinza ▪ Succión ▪ Extrusor ▪ Fresadora ▪ Cortador ▪ Soldador ▪ Rociador ▪ Entre otros 	
		Realidad Virtual / Aumentada (<i>VR / AR</i>)	NA	

Nota. Adaptado de “*Atlas of Digital Architecture*” (pp.412-414), por Hirschberg et al. (2020).

Modificado por elaboración propia (2023).

3.2.1. Fabricación Digital como un proceso integrado en el Diseño.

Los procesos de Automatización y Robótica en la FD implican una integración de *sistemas robóticos, sensores, actuadores*, y pueden ser acompañados con otros procesos de *Realidad Virtual (VR)* o *Realidad Aumentada (AR)*. De hecho, desde la perspectiva creativa, del Diseño o de la “*Maker Culture*”, estas áreas disciplinares no sólo implica integraciones de mecanismos, sino también la hibridación de *investigación, diseño no estandarizado y técnicas de DC* (modelado 3D, DG, algorítmico o paramétrico). En la Arquitectura, dichas integraciones son

realizadas por manifestaciones que, bajo los enfoques *tecnológicos* descritos con anterioridad, contribuyen con la innovación en el *Diseño*, el desarrollo de *Materiales*, y los mismos procesos de *Fabricación*.

Así, en la metodología, el punto de partida es la *investigación*, con una estructura que, según Aksamija (2016), sigue los siguientes pasos:

(1) Identificación del problema de investigación, (2) revisión de literatura para determinar el Estado del Arte, (3) reconocimiento de brechas, (4) identificación de métodos de investigación, (5) ejecución del estudio, (6) recolección de datos y análisis de resultados (4.3) conclusión e implementaciones de resultados. (2016, p. 176).

Sí el método de investigación se dirige a una innovación de servicio, entonces tendrá un enfoque cualitativo, y se aplicarán procesos de observación y entrevistas como muestra de análisis. En cambio, si se orienta a la innovación de productos o procesos, seguirá una lógica cuantitativa o experimental, la cuales, incluirán simulaciones y modelados en la primera, o prototipado y pruebas en la segunda (Aksamija, 2016).

De esta manera, como parte de los procesos de integración en la FD (Figura 20), en la estructura anterior, si la investigación es del tipo cualitativo, los procesos de observación pueden ser aumentados con la aplicación de *sensores*, ya que tienen la capacidad de ser receptores y de registrar información (en tiempo real) de los fenómenos en cuestión.

Los *sensores* (activos y pasivos) tienen la capacidad de registrar imágenes, temperatura, estrés físico, movimiento, presión atmosférica, radiación infrarroja, entre otras cosas (Wujec, 2017). Estas propiedades aumentan la percepción humana y contribuyen a que la información obtenida para fines cualitativos permita una posterior evaluación cuantitativa (a partir de la gran

cantidad de datos recolectados), con el fin de que la apreciación humana sea más certera en el momento de tomar decisiones.

Los sensores digitales están aumentando y expandiendo la percepción humana, ampliando nuestra habilidad para percibir las cosas... A medida que los sensores mejoren en contarnos sobre los cambios del mundo. Con cada mejora en la resolución, perciben cualidades en un objeto que antes eran invisibles. (Wujec, 2017, pp. 37, 39).

Por otro lado, si la investigación es cuantitativa, las simulaciones son realizadas bajo estrategias de DC, que pueden implicar métodos descendentes (*top-down*), o *heurísticos* (de caja negra). Ejemplares de estos métodos son las estrategias algorítmicas como los *sistemas-L*, *autómatas celulares*, *fractales*, *búsquedas estocásticas*, etc. así como modelos de optimización como los *algoritmos evolutivos* o de análisis como el *Método de Elementos Finitos* (FEM), ya sea para la resolución de problemas o el desarrollo geométrico y topológico en el diseño.

Finalmente, si el estudio es experimental, por lo contrario, sigue métodos ascendentes (*bottom-up*) de prototipado, los cuales, pueden desarrollarse mediante los procesos de FD previamente mencionados (desde el más elemental, hasta el más avanzado), equipados con *sensores*, *actuadores*, *manipuladores* o *componentes personalizados*. También esta fase puede involucrar el desarrollo de nuevos materiales, tanto estáticos como dinámicos con propiedades de movimiento, reacción a agentes externos o inclusive autoensamble. En palabras de Wujec (2017):

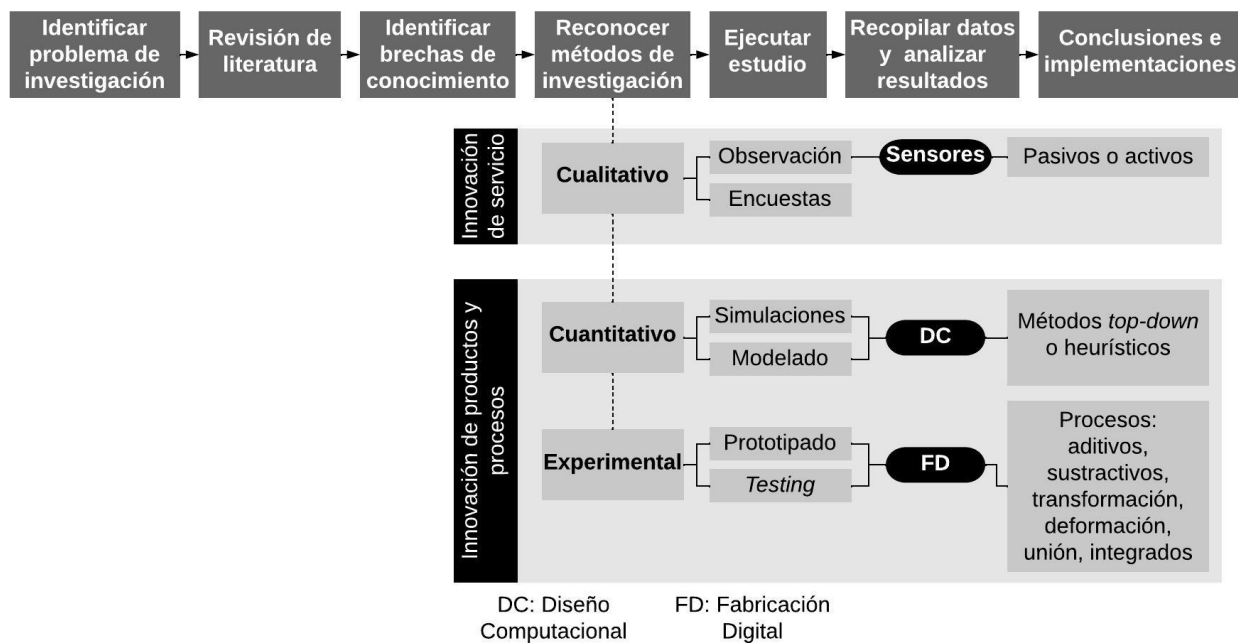
Nosotros siempre hemos usado las herramientas físicas para magnificar nuestras habilidades para dar forma a los objetos. Ahora las herramientas robóticas aceptan instrucciones digitales y se han vuelto expertos para los actos físicos de fabricación, sin cansarse, aburrirse, y usualmente sin cometer errores... equipados con sensores y un

cerebro de aprendizaje automático, los robots finalmente se volverán brillantes, receptivos, fuertes, rápidos e inteligentes. (2017, pp. 146, 148).

El proceso de la metodología de investigación anterior, se integra a las prácticas de diseño como una rama de la estructura organizacional de una firma de diseño arquitectónico, para consolidar una relación entre los valores de la firma y las prácticas de investigación a fin de innovación arquitectónica. Según Aksamija (2016) existe una gran cantidad de maneras de operación entre la investigación y las prácticas de diseño en una firma. Reconoce tres modelos en los que habitualmente se diferencian estas relaciones: (1) *interno*, (2) *externo* e (3) *híbrido*, a consecuencia de diversos factores como el tamaño de la firma u organización, su dedicación a la investigación y desarrollo, al financiamiento, etc.

Figura 20.

Método integrado de investigación en la Fabricación Digital (FD).



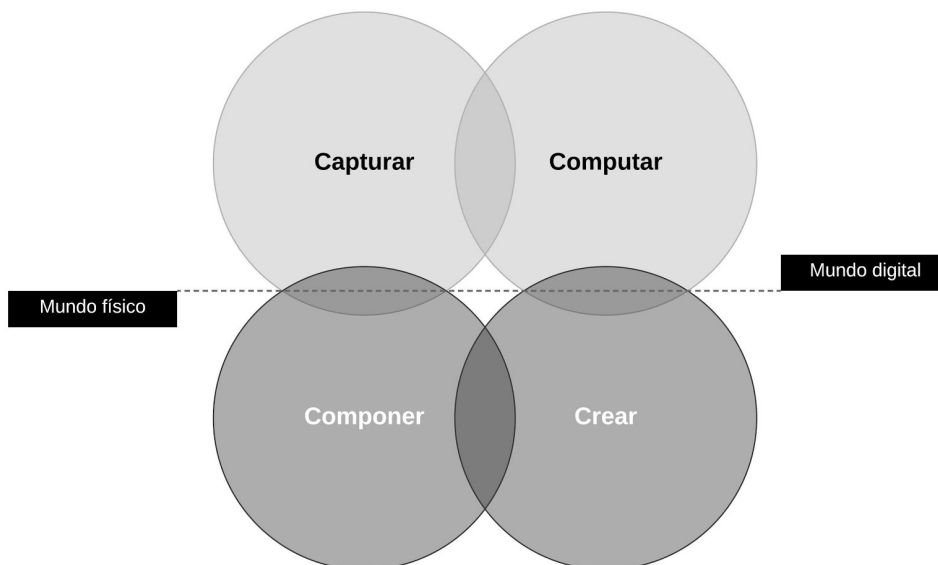
Nota. Adaptado de “*Integrating Innovation in Architecture: Design, Methods and Technology for Progressive Practice and Research*” (p.176), por Aksamija (2016). Modificado por elaboración propia (2020).

Desde la perspectiva de Wujec (2017), existen cuatro pasos generales por los que pasa el proceso de integración en la FD al momento de hacer las cosas (Figura 21): (1) *capturar*: proceso principalmente cualitativo para la obtención de información, (2) *computar*: proceso de diseño y métodos cuantitativos de simulación y modelado en 3D con herramientas digitales como recurso, (3) *crear*: paso en el que se lleva el diseño a la producción mediante sistemas de Robótica y Automatización, (4) *componer*, la producción ágil de objetos permite desarrollar nuevos materiales con propiedades de movimiento, interacción o autoorganización.

Los primeros dos pasos se ubican en el contexto digital o virtual, mientras que los últimos dos son parte del mundo físico. La dinámica interrelación de ambos escenarios permite un mayor dominio en la resolución de problemas complejos en el diseño, y una mayor capacidad para generar productos cada vez más adaptables a nuestro entorno.

Figura 21.

Pasos generales de la Fabricación Digital (FD).

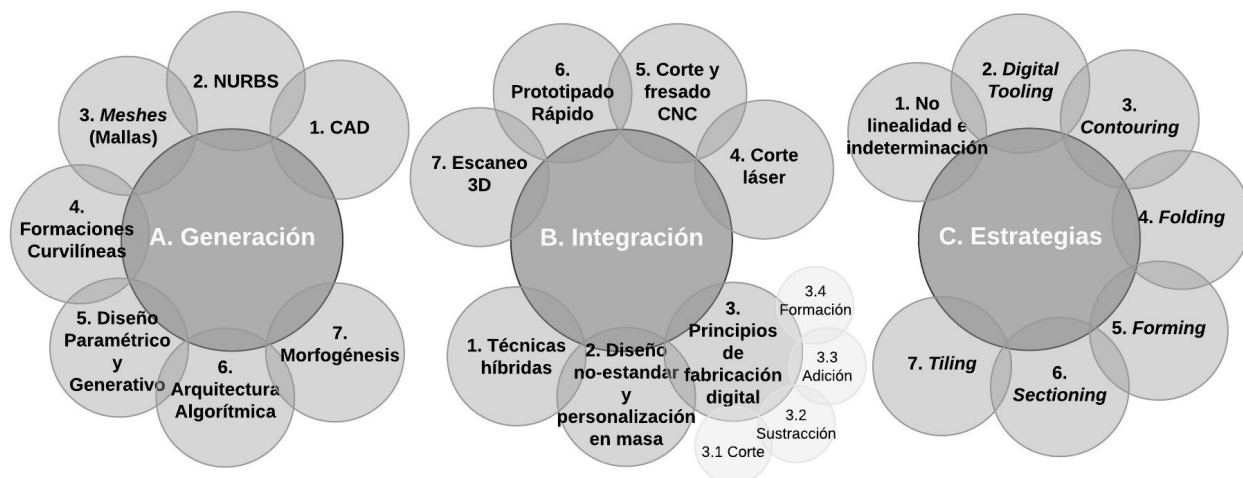


Nota. Adaptado de “*The Future of Making: Understanding the forces shaping how and what we create*” (p. 31), por Wujec (2017). Modificación por elaboración propia (2020).

Por otro lado, de manera más extensa y relacionado con la Arquitectura, Dunn (2012) explica el proceso de FD en tres pasos (Figura 22): (a) *generación*, es donde se aplican las técnicas de producción de las formas a través de recursos digitales; (b) *integración*, se utiliza la vanguardia en máquinas de fabricación al utilizar diferentes procesos; (c) *estrategias*, se determinan métodos de fabricación para la producción específica de las demandas del diseño. De estos tres pasos, derivan distintas estrategias de aplicación normalmente utilizadas en cada rubro.

Figura 22.

Los tres pasos del proceso de Fabricación Digital en la Arquitectura.



Nota. Adaptado de “*Digital Fabrication in Architecture*”, por Dunn (2012). Diagrama por elaboración propia (2020).

3.2.2. Robótica y Automatización.

Dentro de la taxonomía de procesos de FD, se encuentran los que son integrados y que consideran la Robótica y la Automatización. Los procesos de automatización pueden referir a la “obsolescencia del trabajo” (Claypool et al., 2019), ya que se refieren a la realización de tareas por parte de máquinas, de manera automática, con poca o sin intervención humana. Desde la perspectiva de Claypool et al. (2019) el término *automatización* ya incluye el carácter integrador que ha sido discutido en el apartado anterior. Inclusive, desde la Arquitectura, ya puede integrar conceptos o procesos de IA, *Machine Learning* (ML), *Big Data*, AR, ciudades inteligentes y trabajo. En este sentido, no distingue los conceptos de *diseño*, *fabricación* o *digital*, sino que la palabra en sí, ya los considera de manera difusa.

Por tanto, los procesos automáticos realizados por máquinas se encuentran estrechamente vinculados con el concepto de Robótica. El término robot proviene de la palabra checa *robota* o *roboti* (en plural), que significa “trabajo forzado” o “servidumbre”. Fue utilizado por primera vez por el escritor Karel Čapek en su obra de teatro R.U.R. (*Rossumovi Univerzální Roboti* /

Rossum's Universal Robots), acontecida en Praga, en la segunda década del siglo XX, donde fueron descritos como “gente artificial” que debían ser lo más simples posibles, sin emociones, honestos y trabajadores; descripción que recuerda más al concepto de androide (Claypool et al., 2019; Hirschberg et al., 2020).

Hirschberg et al. (2020) define a los robots como “máquinas automáticas...que son realizadas con partes inorgánicas y mecánicas, equipadas con Inteligencia Artificial... que no sólo realizan secuencias y operaciones complejas, sino que pueden regular sus resultados, lo cual, significa que son autorregulados” (p.414). Claypool et al. (2019) como “cualquier máquina que puede realizar acciones complejas, sin requerir control humano para operar... un taladro no es un robot, porque es controlado por un humano. En cambio, una lavadora sí, ya que puede correr automáticamente sin control humano” (p.14).

En la FD, el robot que se ha ajustado de mejor manera a la escala arquitectónica es el Brazo Robótico Industrial (BRI) de gran escala. Éstos son estacionarios, pero pueden ser montados a dispositivos que sirvan de guía y le permitan ser trasladados, como los ejes de traslado o “Unidades de Transferencia de Robot” (*Robot Transfer Unit*; RTU), las grúas, los pórticos grúas, los andamios automatizados o inclusive, *Robots Móviles Autónomos* (AMR) que pueden funcionar como plataforma de transportación.

Los BRI pueden trabajar individualmente, o de manera múltiple y colaborativa. De hecho, los BRI de mediana escala, se encuentran diseñados para el trabajo colaborativo, y son denominados como *Cobots*. Por otro lado, en la Arquitectura y Construcción también son utilizados los AMR, que se caracterizan por ser móviles, terrestres y equipados con *sensores* y *manipuladores* sofisticados que le permiten ser autónomos. Éstos pueden trabajar no sólo de manera individual, sino que pueden desenvolverse colectivamente para, de esta manera,

conformar un Sistema Multi-Robótico (SMR). Así como hay AMR con carácter terrestre, existen aquellos que son aéreos, llamados Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) o drones, también pueden conformar SMR y tienen un uso en la disciplina apenas emergente.

Típicamente, los robots (en cualquiera de sus tipos) se encuentran constituidos por partes mecánicas activas y pasivas, también por componentes electromecánicos que pueden ser clasificados como *sensores*, *actuadores* y *manipuladores*. Los *sensores* ya han sido descritos con anterioridad, los *actuadores* son dispositivos que permiten controlar el movimiento (de manera precisa) en un robot. De manera más amplia, estos componentes se encargan de transformar la energía, que es administrada a un robot, en movimiento y acciones. Los *manipuladores*, son robots o componentes que, de acuerdo con su finalidad y constitución, pueden realizar tareas como levantar, sostener o trasladar objetos.

Los principales *actuadores* pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos. Estos últimos se constituyen principalmente por motores, los cuales existen de gran variedad. Destacan los motores de corriente continua (o directa), los motores de paso a paso, y los servomotores. Los primeros, son una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica, a través de un movimiento rotatorio continuo, generado por un campo magnético. Los motores de pasos convierten los impulsos eléctricos en desplazamientos angulares y discretos, con giros en una gran cantidad de ángulos de acuerdo con su control. Por último, los servomotores son similares a los de corriente continua, con la diferencia de que puede ubicarse en cualquier posición de su rango de operación, y de esta manera, mantenerse estable en la posición.

Por otro lado, puede ser considerado el mismo BRI un *manipulador* robótico, sin embargo, también son considerados los dispositivos que complementan la unidad robótica para realizar tareas determinadas. En este sentido, estos componentes son un referente importante para

las actividades de construcción arquitectónica, ya que depende del diseño de éste, el tipo de manipulación de material constructivo que utilizará en el proceso. Las tareas más básicas que realiza un manipulador es el de levantar, sostener, y trasladar. Sin embargo, también pueden cortar, extruir, erosionar y realizar prácticamente todos los procesos de FD mencionados anteriormente. Los dispositivos más comunes son: *pinzas, sujetador por succión, extrusor, fresadora, cortador, soldador, rociador, compactador*, entre otros.

Finalmente, la robótica puede ser clasificada en dos categorías: los robots duros o mecánicos (*hard robots*) y los blandos (*soft robots*). Los primeros, se encuentran constituidos por piezas rígidas, sólidas y sincopadas, articuladas por mecanismos que pueden incluir amarres, anclajes y engranajes. Por otro lado, los robots blandos son diseños bio-inspirados, que toman como referencia los cuerpos flexibles, se encuentran compuestos por partes suaves, elásticas, con memoria de forma, o inclusive de constitución continua.

3.3. Los sistemas computacionales y la Arquitectura

Dentro del ámbito de las disciplinas del Diseño, la Arquitectura se encuentra fuertemente involucrada con la transformación que ejerce la llamada Industria Inteligente o Industria 4.0, que constituye la cuarta revolución industrial. Wujec (2017) explica las cuatro revoluciones industriales acontecidas:

La primera nace en el siglo XVIII con la máquina de vapor ... la segunda emerge en la última etapa del siglo XIX ... cuando se impulsa la producción en masa ... Una tercera se apoderó de los años 70, impulsada por las herramientas digitales ... Ahora estamos entrando a una cuarta revolución, la cual no es manejada por una sola fuerza, sino por una combinación de tecnologías, incluyendo sensores, algoritmos y robótica. (2017, p. 30).

De esta manera, es posible discernir que la computadora fue la variable que generó la tercera revolución e incitó, tras su evolución, a dar el paso hacia la cuarta transformación del ámbito industrial con el desarrollo de la IA. Así, desde la fundación de la primera computadora moderna, desarrollada por el matemático y científico británico Alan Turing en el marco de la Segunda Guerra Mundial (1937), se tuvo la determinante idea de considerar a esta máquina como un sustituto de la mente humana a través de su programa.

La manera de comprobar este reemplazo fue con la (aún vigente) “Prueba de Turing”, la cual, mediante una conversación a ciegas, una persona debe ser incapaz de reconocer si el remitente es una máquina. Esta prueba fue planteada por Turing en su publicación más importante con relación a la IA: el artículo Maquinaria Computacional (*Computing Machinery*) en 1950 (Leach, 2021).

Esta cuarta revolución, representa un cambio de era relacionada con la tecnología, la investigación y la industria. De acuerdo con Carpo (2017), la velocidad con la que sucedió, se incrementó significativamente a partir de la consolidación del *Big Data* en los últimos años de la primera década del siglo XXI. De esta manera, el hecho de que la Arquitectura sea parte importante de estas transformaciones se debe a la estrecha relación que tiene con los sistemas computacionales, que se remonta a una contribución que es de carácter mutuo y no únicamente utilitaria para ésta.

Así, la disciplina arquitectónica también ha sido importante para el desarrollo de la computación gracias al pensamiento de *complejidad* de la segunda mitad del siglo XX, abordado a través de estructuras epistemológicas (y filosóficas) de la *cibernética* y la *teoría de la información*, que influenciaron a los principales arquitectos de ese tiempo (Geoghegan, 2023). La *complejidad*, fue una estructura epistemológica que caracterizó el final del movimiento

moderno; de manera más palpable, fue promovido a partir de la Segunda Guerra Mundial, gracias al avance en los medios de comunicación y el acceso de información que impulsaron la migración de un pensamiento lineal a otro complejo.

El matemático, biólogo e informático Warren Weaver (1998; 1991), quién junto a Claude E. Shannon (1998) desarrollaron la *Teoría Matemática de la Comunicación* en 1949, distinguió las metodologías aplicadas por la ciencia para la resolución de problemas en el escrito intitulado *Science and Complexity* en 1948. Estas metodologías fueron clasificadas por Weaver de acuerdo con el tipo de problemáticas y cantidad de variables que se analizaban: (1) *problemas de la simplicidad*, (2) *problemas de la complejidad desorganizada*, y (3) *problemas de la complejidad organizada*. (Onchi-Rascón et al., 2023, p. 1184).

Weaver distinguió que, las lógicas *cuantitativas*, *analíticas* y *causales* de la modernidad, fueron los métodos indicados para afrontar los *problemas de la simplicidad*. Por otro lado, consideró que, para los *problemas de la complejidad desorganizada* (que ya reconocían la interacción simultánea de una gran cantidad de variables), las técnicas de la *probabilidad y estadística* iban a ser la mejor opción para tratarlos.

Con respecto a los *problemas de la complejidad organizada* que, aunque se encuentran constituidos por una gran cantidad de variables, aun así, muestran características de organización u orden. Ante este escenario, Weaver ya intuía que los *sistemas computacionales y el trabajo multi y transdisciplinario*, iban a ser prometedores para desarrollar metodologías que abordaran este tipo de problemas.

Además, en cuanto a la *cibernética*, éste fue un término acuñado por Norbert Wiener en 1948 que hace referencia a la retroalimentación de información que controla un sistema

(Steenon, 2017). “Es la ciencia que enfatiza la comunicación y el control en humanos, máquinas, y seres vivos” (Geoghegan, 2023, p. 12).

De esta forma, gracias a la influencia de éstos pensamientos, el informático y arquitecto Nicholas Negroponte, a través de sus inquietudes relacionadas con el Diseño Digital, propone las primeras estrategias de IA en 1970 en su laboratorio (y libro) llamado “*The Architecture Machine*” en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology*; MIT), las cuales, contribuyeron con la formación de su primera generación llamada “*Good Old Fashioned AI*” (GOFAI) (Bernstein, 2022; Chaillou, 2022).

De la misma manera, el arquitecto Christopher Alexander, a partir de 1960, influyó con su trabajo a especialistas de la programación computacional en el desarrollo de los reconocidos “lenguajes orientados a objetos”, al punto que, es un referente importante para ellos, así como para los diseñadores digitales en el ámbito de la *heurística*, los patrones y la arquitectura, como término utilizado en el desarrollo computacional (Steenon, 2017).

Por tanto, la cuarta revolución industrial, que corresponde con la cuarta era digital en el Diseño y la Arquitectura (Wujec, 2017), “se encuentra constituida por una revolución (gracias a la IA) de procesos computacionales y de Robótica complejos, con directa repercusión en la FD” (Onchi-Rascón et al., 2023, p. 1184).

3.4. Fabricación Digital e Inteligencia Artificial: Automatización e Inteligencia Colectiva en la Arquitectura

De acuerdo con lo discutido en los apartados anteriores, la FD en la Arquitectura sucede cuando esta disciplina se relaciona con la Automatización (como especialidad) con el objetivo de beneficiar y optimizar los procesos del desarrollo arquitectónico, el diseño de materiales, así como los procesos de Ingeniería y Construcción.

El modelo típico de Automatización aplicado en la Arquitectura considera una combinación de procesos de DC y Robótica, predominantemente manejados con sistemas de Control Numérico Computacional (CNC) y Brazos Robóticos de tipo Industrial (BRI). “... El control numérico, que todavía sirve como principio en el trabajo de los sistemas de Control Numérico por Computadora (CNC) se encuentran en el corazón de muchas herramientas de Fabricación Digital que usamos hoy.” (Hirschberg et al., 2020, p. 408).

Aunque este modelo, en las últimas dos décadas del siglo XX, ha sido el responsable del traslado paradigmático de la producción arquitectónica enfocada en la estandarización en masa a otro modelo basado en la personalización en masa (Carpo, 2017; Claypool et al., 2019; Hirschberg et al., 2020), lo cierto es que en la última década se ha identificado que la mayoría de estos métodos significan una problemática de accesibilidad tecnológica, debido a que los medios y herramientas comúnmente utilizados en la FD, representan un problema de escala para su movilidad, manipulación y mantenimiento (Claypool et al., 2019).

De acuerdo con Wujec (2017) la cuarta era de la computación en el diseño, se caracteriza porque la computadora ha dejado de ser una herramienta que asiste al diseñador para convertirse en un socio creativo. Este cambio de paradigma viene de la mano con el desarrollo de la tecnología de Inteligencia Artificial (IA) y la Robótica en el campo de la FD. El modelo típico, previamente mencionado, basado en Arquitectura y Automatización también puede ser complementado con IA cuando existe un *sistema colaborativo* entre diversos robots.

Aunque la integración de estas tres especialidades significa un conjunto de brechas interdisciplinarias que además contribuyen al problema de accesibilidad tecnológica, es posible discernir que la implementación de IA en el modelo también puede ofrecer oportunidades de solución al problema al apostar por la *multiplicidad*, favorecer la *colectividad robótica*, y así,

minimizar su escala en el proceso de construcción arquitectónica que demanda gran tamaño. De esta manera, se puede contribuir a mejorar la transportabilidad del medio tecnológico de automatización, y también, aprovechar la interacción de los contextos disciplinares de la Robótica e IA, para traducirlos a la problemática arquitectónica.

Los agentes necesitan operar a una escala en la que la percepción de los agentes individuales retrocede, permitiendo que la lectura dominante sea la de la organización emergente generada por los agentes. Esto sugiere que el agente necesita operar a una escala significativamente más pequeña que la de un elemento arquitectónico (muro, columna o fenestración) y destaca la importancia de los modelos de alta población. (Snooks, 2018, p. 25).

3.4.1. Inteligencia Artificial y Colectiva.

La Inteligencia Artificial (IA) (Figura 23) es definida por Neil Leach (2021) como “aquella que busca imitar o simular la mente humana” (p. 15). También, cita a John Kelleher con una definición más amplia, la cual textualmente es descrita como: “el campo de investigación que se centra en el desarrollo de sistemas computacionales que pueden realizar tareas y actividades que normalmente se considera que requieren inteligencia humana” (citado por Leach, 2021, p. 15).

Un *sistema colaborativo* de diversos robots puede requerir de estrategias de IA para condicionar, programar o generar un esquema de interacción *inteligente* entre las distintas unidades que constituyen el sistema. Esta colaboración también es reconocida como *Sistema Multi-Robótico* (SMR) y Dias et al. (2021) lo define como “un conjunto de sistemas Multi-Agente, donde los agentes individuales son robots. Estos sistemas están compuestos por

múltiples robots autónomos que interactúan entre sí, con objetivos individuales e información sensorial” (p. 6).

Si el SMR es un medio tecnológico, un *Sistema Multi-Agente* (SMA) es el modelo de IA que constituye el esquema de comportamiento entre los diversos robots. Los SMA se caracterizan por ser un conjunto de agentes autónomos y adaptables, débiles en su acoplamiento para solucionar problemas, con atributos y comportamientos que permiten relacionarse y estructurar topologías de interacción dentro de un ambiente determinado, para trabajar juntos y resolver problemas que están más allá de sus capacidades individuales (Stieler et al., 2022). Un SMA está constituido por un conjunto de algoritmos, los cuales son definidos por Roland Snooks como:

Los algoritmos multi-agente operan a través de la interacción local de agentes computacionales autónomos, que se autoorganizan y generan comportamientos emergentes a escala global. Estos algoritmos establecen una relación no lineal en la que cada agente responde a los agentes vecinos sin control jerárquico o de control descendente. (Snooks, 2018, p. 61).

Así, estas propiedades de los SMA se posicionan en una complejidad determinada por una multiplicidad de inteligencia distribuida y no centralizada. Por tanto, uno de los métodos de inteligencia que pueden condicionar los SMA son los de *Enjambre*. Craig Reynolds es uno de los referentes más importantes en la *Inteligencia de Enjambre* (IE) aplicada en el mundo computacional, gracias al desarrollo de modelos de comportamiento para la simulación digital.

Los algoritmos de IE, simulan el comportamiento en parvada de las aves, los cardúmenes de peces, las hormigas, entre otros sistemas de autoorganización biológica. Los comportamientos básicos de estos sistemas, que condicionan a los agentes para interactuar con sus vecinos son: (1)

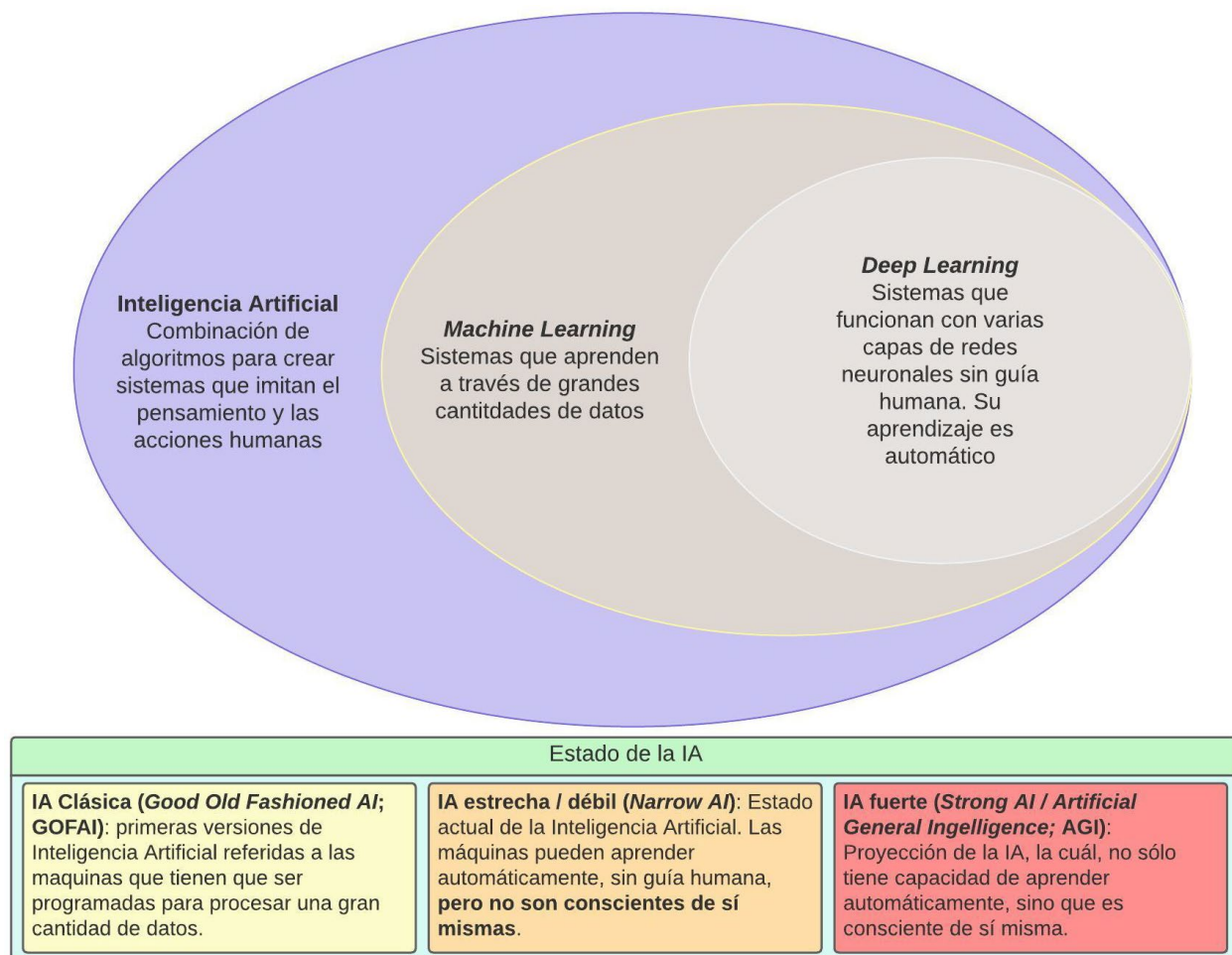
la *alineación*, (2) la *cohesión* y (3) la *separación* (Snooks, 2018). Los SMA y los sistemas de IE constituyen una clasificación llamada *Inteligencia Colectiva (IC)*, y son parte de una categoría más amplia de algoritmos llamados *metaheurísticos* de tipo *poblacional*.

Leach (2021) considera a la IE como formas básicas de IA. De esta manera, los SMR que basan su modelo de comportamiento e interacción en este sistema, y pueden ser reconocidos como Sistemas Robóticos de Enjambre (SRE; *Swarm Robotics*).

Inspirada en la organización de insectos sociales, como hormigas, abejas y termitas, y en la formación de cardúmenes de peces y pájaros en vuelo, *Swarm Robotics (SR)* es un campo de investigación de Inteligencia Artificial responsable de crear nuevos mecanismos de organización de varios robots con una estructura simple. (Dias et al., 2021, p. 1).

Figura 23.

Diagrama descriptivo de la Inteligencia Artificial y sus subconjuntos.



Nota. Adaptado de “*Architecture in the Age of Artificial Intelligence: An Introduction to AI for Architects*” (p.17), por Leach (2021). Modificación por elaboración propia (2023).

3.4.2. Métodos algorítmicos de optimización de la Inteligencia Artificial.

Con el fin de que, en la Arquitectura exista una mayor aproximación con los mecanismos que la IA utiliza en su constitución para la resolución de problemas, es importante conocer las estrategias algorítmicas a las que recurre para el análisis, predicción y optimización de fenómenos complejos (Tabla 6). Estas estrategias son conocidas también como métodos de modelado, control y/u optimización, y según Carpanzano y Knüttel (2022) pueden ser (1) analíticos, (2) numéricos, (3) empíricos, (4) *Machine Learning* (ML), y (5) métodos de Programación en Tiempo Real (PTR).

Los primeros tres modelos son determinados por funciones matemáticas y estrategias de probabilidad y estadística. Aunque, tienen la capacidad de trabajar con una gran cantidad de datos y con procesos complejos, son altamente extenuantes para la computadora al momento de ejercer simulaciones. Así mismo, ML tiene como objetivo optimizar las estrategias probabilísticas aplicadas mediante Redes Neuronales (RN) y pueden tener un aprendizaje (a) supervisado, (b) no supervisado o (c) reforzado (semi supervisado). Por otro lado, los métodos PTR tienen la capacidad de responder en tiempo real a los procesos personalizados, por sus cualidades de autoorganización, autorregulación y autoaprendizaje (Carpanzano y Knüttel, 2022).

Tabla 6.

Métodos algorítmicos de optimización de la Inteligencia Artificial (IA).

Tipo	Método
Analítico	▪ Analítico
Numérico	▪ Método de Elementos Finitos (FEM)
	▪ Método de Volumen Finito (FVM)
Empírico	▪ Análisis estadístico
	▪ Redes Neuronales (RN)
	▪ Procesos Gaussianos
	▪ RN informadas por físicas
	▪ Operadores Neuronales de Fourier
<i>Machine Learning</i> (ML)	▪ Supervisado
	▪ No supervisado
	▪ Reforzado
Modelo de Control Predictivo	▪ Optimización basada en modelos
Programación en Tiempo Real (PTR)	▪ Métodos de optimización exacta
	▪ Métodos de aproximación (constructivos, IA, búsqueda local, metaheurísticos)

Nota. Adaptado de “*Advances in Artificial Intelligence Methods Applications in Industrial Control Systems: Towards Cognitive Self-Optimizing Manufacturing Systems*” (pp.6-11), por Carpanzano y Knüttel (2022). Modificado por elaboración propia (2023).

Estos últimos métodos, incluyen un conjunto de algoritmos que son clasificados en dos rubros: (1) métodos de optimización exacta, (2) y de aproximación. Estos segundos, no se basan en un modelo matemático, sino que, se apoyan en otras estrategias computacionales que tienden

a ser bio-inspiradas. Así, dentro de los métodos de aproximación, se encuentran los *metaheurísticos* que se caracterizan por su robusticidad para trabajar con una gran cantidad de datos complejos, sin embargo, no son reconocidos por ser los más precisos y no todos estos algoritmos son eficientes en cuanto a la relación carga computacional y tiempo (Wortmann, 2019).

En este sentido, para el arquitecto que no tiene una formación guiada por matemática avanzada, los métodos metaheurísticos se ajustan como una buena alternativa para ejercer simulaciones computacionales de análisis, predicción y optimización de problemáticas relacionadas con la disciplina.

3.4.3. Algoritmos metaheurísticos: evolutivos e Inteligencia Colectiva.

El enfoque de los métodos *metaheurísticos* es mixto, pues se fundamentan en el concepto de aproximación intuitiva de la *heurística* para la resolución de problemas a través de la evaluación de datos complejos. En este sentido, la *heurística* es definida por la Real Academia Española (2022) como la técnica de la indagación y del descubrimiento. También define el término como métodos no rigurosos aplicados en algunas ciencias para buscar la solución a un problema (por ejemplo, la intuición, el tanteo o reglas empíricas, etc.).

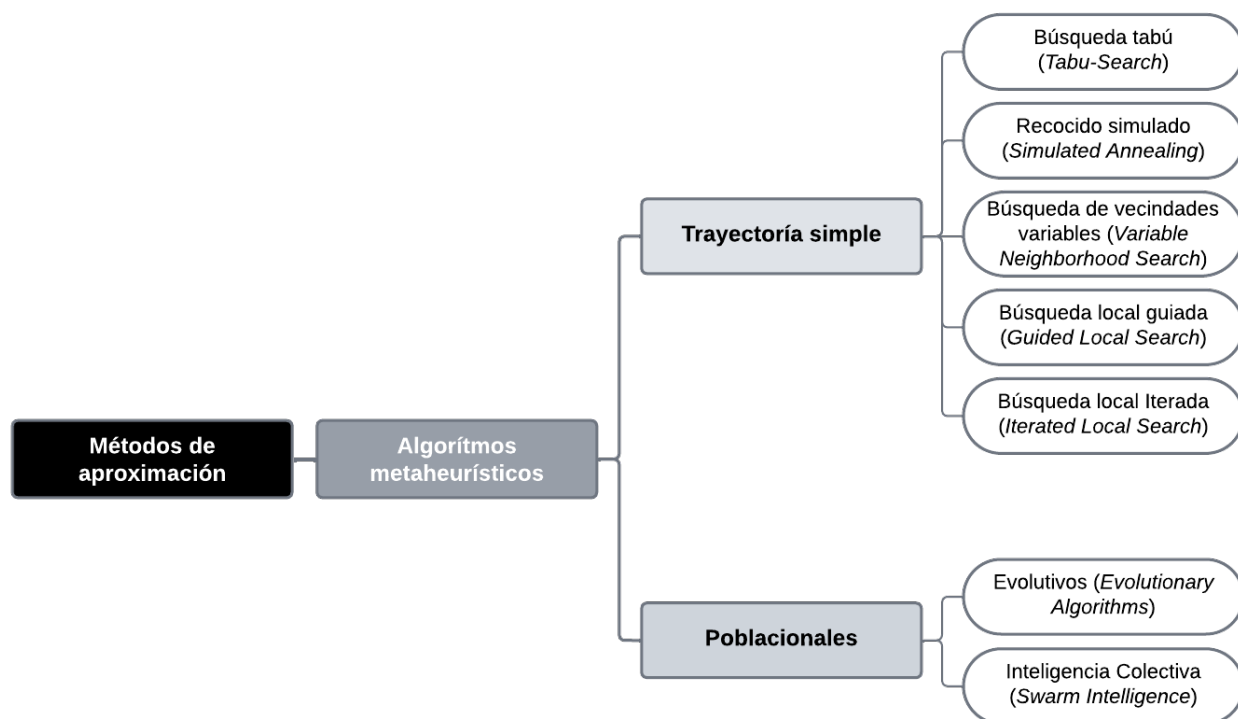
En el ámbito computacional, Díaz López et al. (2016) define un método *heurístico* como “un procedimiento para resolver un problema complejo de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución de manera eficiente” (p. 45). La evolución tecnológica de los métodos *heurísticos computacionales* trae como consecuencia la progresión nombrada como procedimientos *metaheurísticos*, los cuales, son un conjunto de sistemas híbridos que integran algoritmos derivados de la IA, la evolución biológica, así como estrategias estadísticas. Según

Díaz López et al. (2016) se clasifican en dos tipos: (1) de *trayectoria simple* y (2) *poblacionales* (Figura 24).

Dentro de los primeros se encuentran: (1.1) Búsqueda Tabú (*Tabú-Search*), (1.2) Reconocido Simulado (*Simulated Annealing*), (1.3) Búsqueda de Vecindades Variables (*Variable Neighborhood Search*), (1.4) Búsqueda Local Guiada (*Guided Local Search*), (1.5) Búsqueda Local Iterativa (*Iterated Local Search*), etc. Por otro lado, algunos ejemplos de la segunda clasificación son: (2.1) Algoritmos Evolutivos (*Evolutionary Algorithms*; AE), así como los (2.2) Algoritmos basados en Inteligencia Colectiva (*Swarm Intelligence*; IC) (Díaz López et al., 2016).

Figura 24.

Clasificación de algoritmos metaheurísticos.



Nota. Elaboración propia (2023).

En la Arquitectura, los métodos *metaheurísticos* más populares como asistente computacional son los de tipo *poblacional*; específicamente, los de tipo *evolutivo* son los más

utilizados para el análisis y resolución de problemas de diseño y construcción (Wortmann, 2019). Éstos se encuentran representados por los llamados Algoritmos Genéticos (AG), los cuales, simulan la evolución genética mediante clasificar y filtrar las muestras óptimas resultantes de la prueba, error y reproducción iterativa de variables (selección natural). El algoritmo evolutivo estándar es descrito en el siguiente pseudo código (Algoritmo 1).

Algoritmo 1.

Algoritmos evolutivo estándar.

Pseudo código

Entrada: La función a optimizar y los parámetros del algoritmo.

Salida: El valor de la aproximación del óptimo encontrado.

- 1: Inicializar población.
 - 2: Evaluar población.
 - 3: **mientras** Criterio de paro == false **hacer**
 - 4: Aplicar selección.
 - 5: Aplicar cruza.
 - 6: Aplicar mutación.
 - 7: Evaluar los individuos generados.
 - 8: Actualizar la población.
 - 9: **fin mientras**
-

Nota. Recuperado de “*Topologías de optimización por enjambre de partículas basadas en información mutua*” (p.23), por Rojas-García (2015).

Por otro lado, los métodos de IC son virtualmente interpretados mediante el Modelado Basado en Agentes (MBA), cada agente es representado a manera de partícula, y en conjunto se caracterizan por ser autónomos, adaptables, débiles en su acoplamiento, con atributos que permiten relacionar y estructurar topologías de interacción, para de esta forma, trabajar juntos y resolver problemas que están más allá de sus capacidades individuales (Stieler et al., 2022). En otras palabras, son métodos bio-inspirados que simulan el comportamiento en parvada de las aves, los peces, las abejas, entre otros sistemas de autoorganización natural.

Así, sus características giran en torno a la complejidad de una multiplicidad de inteligencia distribuida (no centralizada), y son sistemas que no se encuentran en estado de

equilibrio. Dentro del sistema, existen transiciones de fase que generan una criticalidad autoorganizada global de los agentes, propiedad que permite que sea un sistema robusto con resiliencia ante eventualidades estocásticas (o impredecibles), al momento de solventar una tarea.

El método de IC que es más utilizado, no solo para el análisis y optimización de problemas, sino también para reinterpretar sistemas de comportamientos en la Automatización y Robótica, así como para moldear espacios y formas en la Arquitectura, es la *Inteligencia de Enjambre* (IE). Para la resolución de problemas, la IE incluye algoritmos llamados: (a) Optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*; PSO), (b) Optimización mediante colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization*; ACO), (c) Colonia de abejas (*Bee Colony Optimization*; BCO), entre otros. El algoritmo estándar (Algoritmo 2) es propuesto por Kennedy y Eberhart (1995) y descrito por Rojas-García (2015) (en su versión canónica) con el siguiente pseudo código.

Algoritmo 2.

Algoritmo de la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en su versión canónica.

Pseudo código

Entrada: La función a optimizar, el espacio de búsqueda, c_1 , c_2 (coeficientes de aceleración), número de partículas i de la población, criterios de paro.

Salida: La aproximación del mínimo obtenido.

- 1: Generación $t \leftarrow 1$
 - 2: Inicialización aleatoria de la posición y la velocidad de las partículas dentro del espacio de búsqueda.
 - 3: Guardar el valor de la posición obtenida en la mejor experiencia personal \vec{p}_i de cada partícula y el valor de aptitud (la función a optimizar) de cada partícula.
 - 4: **mientras** No se cumpla algún criterio de paro **hacer**
 - 5: Actualizar la velocidad y posición de la partícula i con las ecuaciones (Fórmula 1 y 2):

$$\vec{v}_i^{\vec{t}+1} = \vec{v}_i^{\vec{t}} + c_1 r_{1i}^{\vec{t}} \otimes (\vec{p}_i^{\vec{t}} - \vec{x}_i^{\vec{t}}) + c_2 r_{2i}^{\vec{t}} \otimes (\vec{g}_{best} - \vec{x}_i^{\vec{t}}) \quad (1)$$

$$\vec{x}_i^{\vec{t}+1} = \vec{x}_i^{\vec{t}} + \vec{v}_i^{\vec{t}+1} \quad (2)$$
 - 6: Evaluar la función de aptitud de cada partícula
 - 7: Actualizar el p_i de cada partícula y buscar el mejor valor de todo el enjambre para guiar la búsqueda social \vec{g}_{best}
 - 8: $t \leftarrow t + 1$.
 - 9: **fin mientras**
-

Nota. v_i es la velocidad actual de la partícula i . r_1 y r_2 son dos vectores aleatorios en el intervalo $[0,1]$. \vec{x}_i es la posición actual de la partícula i . Recuperado de “*Topologías de optimización por enjambre de partículas basadas en información mutua*” (p.32), por Rojas-García (2015).

Todos estos algoritmos, también pueden ser topológicamente simulados bajo la lógica de *agentes autónomos*, para determinar sistemas de comportamiento artificial, o para el desarrollo formal arquitectónico. Estos agentes son definidos por Reas y Fry (2007) como “un sistema que detecta su entorno y actúa sobre él según su propia agenda” (p.469).

Para este fin, el experto en gráficas computacionales y vida artificial Craig W. Reynolds (2001) es uno de los referentes más importantes en IE, gracias a sus desarrollos relacionados con los mecanismos de comportamiento para la simulación en 1986. Los comportamientos básicos que condicionan a los agentes para interactuar con sus vecinos son: (1) *separación*, (2) *alineación* y (3) *cohesión* (Snooks, 2018). Bajo estas condiciones, los *agentes autónomos* interactúan para generar sistemas topológicos que pueden ser reinterpretados para los fines anteriormente mencionados.

4. CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

Las características y composición de la hipótesis del presente trabajo de investigación fungieron como directriz para el desarrollo del MT previamente descrito, el cual identificó en la literatura modelos de Inteligencia Artificial (IA) que aplicados a un Sistema Multi-Robótico (SMR) contribuyen a que la Fabricación Digital (FD) en la Arquitectura sea accesible; también, define los principales conceptos que serán aplicados en la presente metodología, como parte de los procesos que serán expuestos en el presente estudio para cumplir con los objetivos de la investigación. Estas referencias fueron fundamentales para la construcción metodológica del presente trabajo, la cual sigue los lineamientos estructurales de la hipótesis de investigación.

Es así, que la metodología expuesta en este capítulo se desarrolla como respuesta al segundo objetivo particular de investigación, el cual consiste en definir las características de un modelo de IC aplicado a un SMR para la construcción automatizada de la EA. Paralelamente, este objetivo particular surge como consecuencia de la segunda pregunta secundaria de investigación: ¿en qué consiste la IC aplicada a un SMR y qué características debe tener para automatizar la construcción de la EA?

El proceso metodológico será planteado y descrito en los siguientes apartados: (1) *Características de la investigación*, (2) *Modelo de Inteligencia (Artificial) Colectiva*, (3) *Sistema Multi-Robótico*, (4) *Envolverte Arquitectónica*, (5) *Simulación del modelo de Inteligencia Colectiva*, (6) *Diseño general del cuasiexperimento*, (7) *Diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos*.

4.1. Características de la investigación

Las características del diseño de la estructura metodológica, así como de la investigación fueron retomadas de referentes en el desarrollo de metodologías de investigación en Arquitectura

y otras disciplinas, los cuales son: Groat y Wang (2002), Hernández Sampieri et al. (2014), Velázquez Fernández y Rey Córdova (2013), Blaxter et al. (2001).

4.1.1. Enfoque de investigación.

Esta investigación tiene un enfoque mixto según Hernández Sampieri et al. (2014), ya que se desarrolló en dos líneas de investigación que son de tipo cualitativo y cuantitativo. De esta manera, aunque las variables a analizar fueron principalmente representadas con magnitudes y evaluadas mediante operaciones aritméticas, lo cierto es que, también fueron consideradas otras que no pueden ser valoradas por cuantificación directa y, por tanto, representaron cualidades de las variables mismas (Velázquez Fernández y Rey Córdova, 2013). Estas variables cualitativas fueron producto de mecanismos generados por métodos algorítmicos con carácter *heurístico* en procesos de simulación computacional.

4.1.2. Tipo de investigación.

La investigación es de tipo *cuasiexperimental*, ya que, aunque existió manipulación de variables independientes, conformadas por un modelo de IC para analizar su efecto sobre la variable dependiente que es la construcción automatizada (FD) en la Arquitectura, las condiciones iniciales en las que se encontraron los grupos del experimento fueron predefinidos y esto implicó posibles diferencias en el control “puro o absoluto” del mismo. Por tanto, cuando se encontraron conformados los grupos, no pudieron ser equivalentes y los sujetos tampoco emparejados en el experimento o asignados al azar (Hernández Sampieri et al., 2014; Velázquez Fernández y Rey Córdova, 2013).

4.1.3. Periodicidad.

El estudio tuvo una periodicidad longitudinal, es decir, no fue determinado un lapso con características particulares para ejercer el cuasiexperimento y para la toma de información, sino

que fue evaluada la evolución del fenómeno a partir de distintas muestras en diferentes momentos temporales de un año, mediante simulación computacional, con condiciones ambientales típicas del clima de la ciudad de Mexicali, Baja California, en espacios virtuales configurados con las características de un laboratorio de construcción semiabierto.

Dichos estudios tuvieron un carácter de tendencia, debido a que el análisis de las diferentes muestras, no necesariamente estuvieron constituidas por los mismos objetos y/o sujetos (Velázquez Fernández y Rey Córdova, 2013).

4.1.4. Criterios de diseño metodológico.

Al caracterizarse la hipótesis de investigación por ser explicativa y de tipo causal, el diseño de la estructura metodológica sigue estos mismos criterios para su desenvolvimiento (Figura 25). El estudio analizó la repercusión de las variables independientes sobre las variables dependientes, para de esta forma explicar las relaciones de causa – efecto, así como mecanismos de funcionamiento de estas (Hernández Sampieri et al., 2014; Velázquez Fernández y Rey Córdova, 2013).

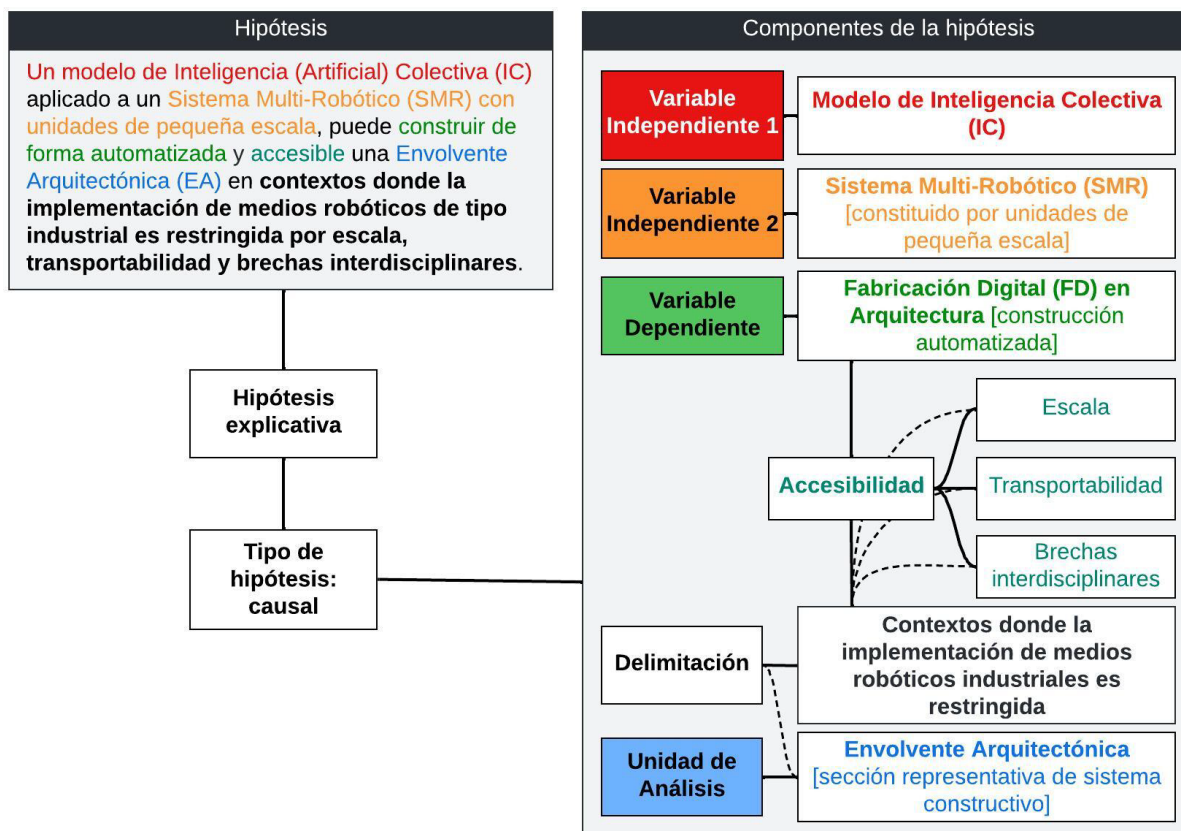
En este sentido, el presente diseño metodológico consideró el desarrollo de (1) un modelo de IC como *variable independiente 1*, aplicado a (2) un SMR constituido por unidades de pequeña escala como *variable independiente 2*. El cuasiexperimento evaluó las capacidades de estas dos variables para poder efectuar procesos de (3) construcción automatizada (Fabricación Digital; FD) en la Arquitectura como *variable dependiente*. Esta relación causal entre variables también consideró el estudio de las propiedades de accesibilidad a la FD desde una perspectiva de escala, transportabilidad y brechas interdisciplinares, según es descrito en el apartado *1.1 Planteamiento del problema* del presente trabajo de investigación.

La *unidad de análisis* consistió en ser una (4) sección representativa de un sistema constructivo para el desarrollo de la Envolvente Arquitectónica (EA). Este ejemplar fue el representante de un muro (elemento arquitectónico vertical) que paulatinamente se convierte en cubierta (elemento arquitectónico horizontal), constituido por elementos endebles de madera dispuestos de forma consecutiva y automática por el SMR (ver apartado 3.5 Envolvente Arquitectónica). Con respecto al sistema de unión de estos elementos constructivos, la presente investigación no tuvo como alcance abordar este proceso. Futuras investigaciones ampliarán los alcances de la presente metodología.

El modelo IC aplicado a un SMR para la construcción de la EA, tuvo una *delimitación* de aplicación dirigida a (5) contextos donde la implementación de medios robóticos de tipo industrial para la construcción automatizada es restringida por los problemas de accesibilidad previamente descritos.

Figura 25.

Componentes de la hipótesis de investigación como directriz para el diseño metodológico.



Nota. Elaboración propia (2022).

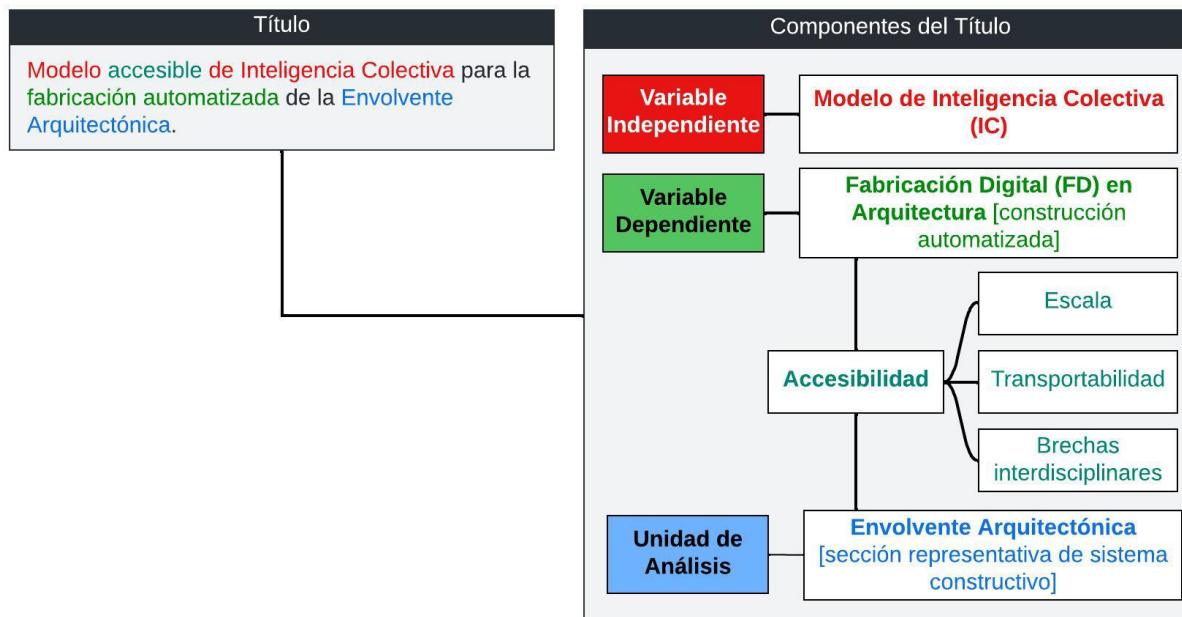
El cuasiexperimento, en conjunto, fue estudiado a través de un *alcance teórico* de (6) simulación virtual de un Modelo Basado en Agentes (MBA) de tipo dinámico, mediante diferentes programas y plataformas de programación dirigidas al DC, al diseño de inteligencia y al modelado robótico. En el mismo orden de ideas, el título del presente trabajo de investigación, *Modelo accesible de Inteligencia Colectiva para la fabricación automatizada de la Envolvente Arquitectónica*, siguió los lineamientos compositivos de la estructura metodológica previamente descrita.

Así, en sus componentes es posible identificar al (1) *Modelo de Inteligencia Colectiva* como el representante de las *variables independientes* que contribuye a que sea *accesible* la (2) *Fabricación Digital*, con énfasis en la *Automatización* como *variable dependiente*, para ser

aplicado en la construcción de la (3) *Envolverte Arquitectónica*, definida como la *unidad de análisis* de esta investigación (Figura 26).

Figura 26.

Componentes del título de investigación estructurado bajo los lineamientos del diseño metodológico.



Nota. Elaboración propia (2022).

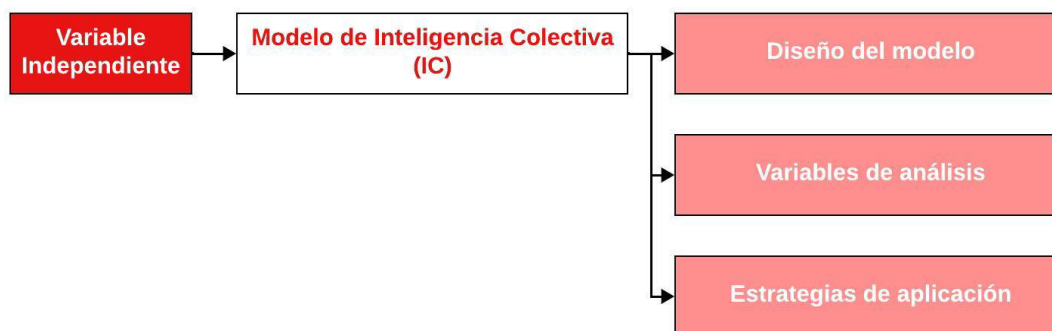
4.2. Modelo de Inteligencia (Artificial) Colectiva

En los componentes del objetivo de investigación principal, que es *elaborar un modelo de IC aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la construcción automatizada de la Envolverte Arquitectónica (EA)*, el modelo de IC es la *variable independiente 1* y tiene la propiedad de ser el principal aspecto para analizar en la investigación, con el objetivo de verificar su interacción con la *variable independiente 2* (SMR) y su repercusión en la construcción automatizada (Fabricación Digital -FD-) de la Arquitectura, que corresponde a la *variable dependiente*.

Este carácter causal fue estudiado en el cuasiexperimento de la investigación y la presente sección explica el desarrollo del modelo, así como también, muestra las características y propiedades de su diseño. Primeramente, el apartado explica los detalles del (1) *diseño del modelo*; posteriormente, muestra las (2) *variables* que el modelo analiza; finalmente, determina la (3) *estrategias de aplicación* que el modelo siguió para su aplicación de comportamiento en el SMR (Figura 27).

Figura 27.

Componentes explicativos del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).



Nota. Elaboración propia (2022).

4.2.1. Diseño del modelo.

El diseño del modelo de IC estratégicamente fue seccionado en dos fases que constituyen su desenvolvimiento y mecanismo de funcionamiento. La primera fase implicó únicamente el desarrollo digital desde una perspectiva virtual de modelado en 3D y simulación dinámica computacional. Ésta consistió en el (1) *Diseño del modelo de Inteligencia Colectiva (IC)*, en la cual, fueron desarrollados, con de programación computacional y bajo los lineamientos de un Modelo Basado en Agentes (MBA), los sistemas de comportamiento que fueron aplicados en un conjunto de partículas digitales o agentes (Figura 28). Para lograr este objetivo, inicialmente fueron maqueteados estos comportamientos en el entorno de programación textual *Processing*,

que funciona bajo el lenguaje de programación *Java*. Esta programación inicial, sirvió como base para realizar futuras migraciones de plataformas que pueden implicar diferente lenguaje de programación.

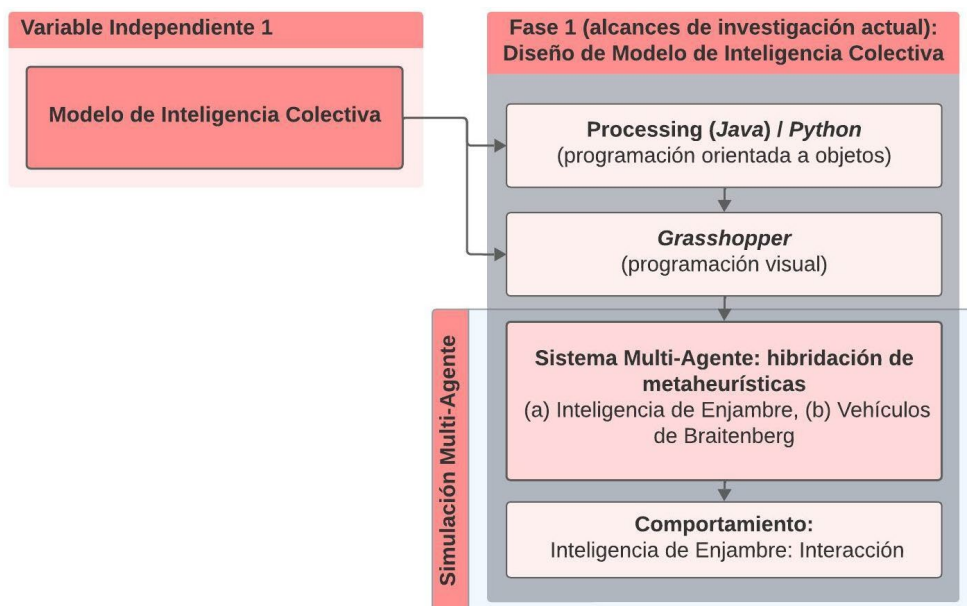
Después de la realización de esta maqueta, se procedió con traducirla al lenguaje de programación *Python*, para de esta manera, poder hacer las migraciones correspondientes de forma más flexible. Posteriormente, la lógica de estos comportamientos fue trasladada al entorno de programación visual *Grasshopper* del programa CAD para el modelado en tercera dimensión llamado *Rhinoceros*. Para aplicar estas lógicas de comportamiento del MBA, fue utilizado el complemento de *Grasshopper* llamado *Quelea*.

La estrategia del Sistema Multi-Agente incluyó la integración (o hibridación) de dos métodos *metaheurísticos* que son: la (a) *IE* y los (b) *Vehículos de Braitenberg*, para de esta forma, desarrollar comportamientos de *Interacción* y *Locomoción*. Futuras investigaciones visualizan integrar en el modelo la *metaheurística* de *Termitas*, con el objetivo de implementar el comportamiento de *agregación* al sistema de interacción bio-inspirado.

El trabajo de programación visual tuvo tres objetivos: (a) desarrollar algoritmos para el modelado paramétrico del sistema de agentes, (b) aplicación de las lógicas de comportamiento del Sistema Multi-Agente, y (c) ejecutar la simulación digital del modelo de IC. Esta fase de simulación del modelo es explicada de manera más amplia en el apartado 3.6. Simulación del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) del presente documento. También, el proceso de validación es descrito con profundidad en el apartado 3.8.1. Estrategia para la validación de desempeño del modelo.

Figura 28.

Diagrama del diseño y los mecanismos de funcionamiento del modelo de Inteligencia Colectiva (IC). El esquema muestra la primera fase del desarrollo.



Nota. Elaboración propia (2022).

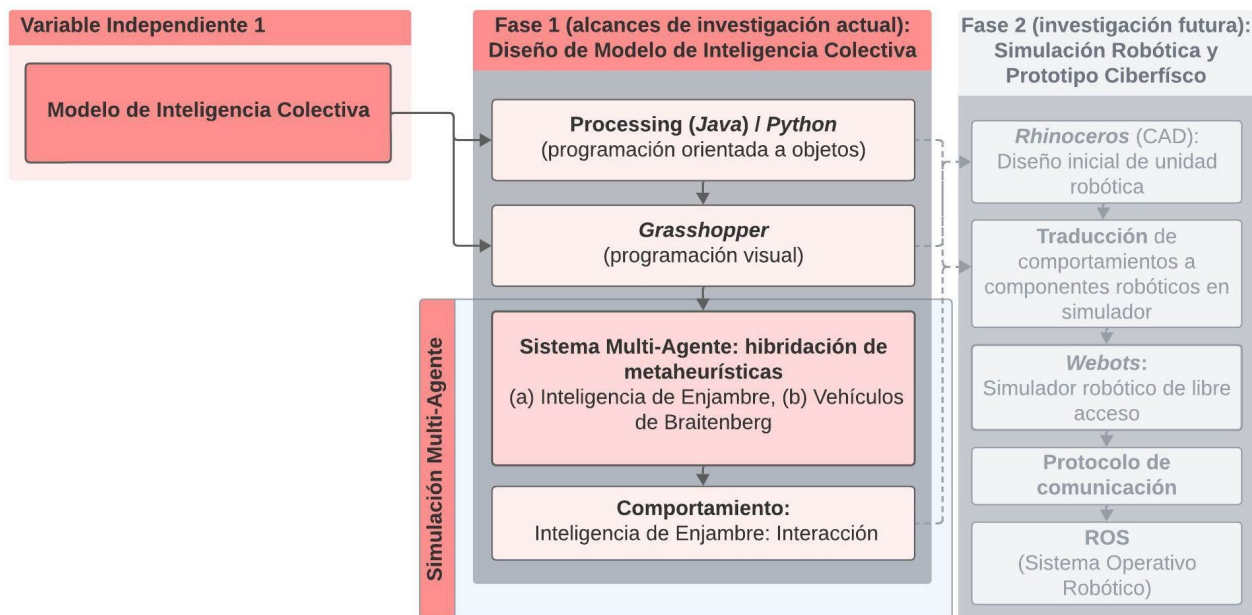
Por otro lado, la segunda fase de la metodología no es un alcance contemplado en este trabajo de investigación; sin embargo, mostrará el camino a seguir para extender el modelo de IC (que se propone en este estudio) al desarrollo de las aplicaciones *ciberfísicas*, al prototipado a detalle de las unidades robóticas y a la demostración física del experimento (Figura 29).

Esta segunda fase, tratará sobre (2) *la simulación robótica y la realización del prototipo ciberfísico*, lo que implicará el diseño de las unidades robóticas mediante *Rhinoceros*, la traducción de los comportamientos del modelo de IC a los componentes robóticos del simulador, la transferencia del modelo al simulador robótico, el diseño del protocolo de comunicación entre el sistema digital y el físico, para que a través del *Sistema Operativo Robótico (ROS)* puedan realizarse las intercomunicaciones *ciberfísicas* entre las unidades robóticas y los centros de control (si aplican). Este proceso, requerirá de trabajos de programación computacional y

traducción de lenguajes para la transferencia de información entre las diferentes plataformas o entornos.

Figura 29.

Diagrama extendido de la aplicación del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) a un Sistema Multi-Robótico ciber-físico. El esquema muestra la primera y segunda fase del desarrollo.



Nota. Elaboración propia (2022).

4.2.1.1. Primer acercamiento algoritmos metaheurísticos: movimiento estocástico.

Como primera fase para el desarrollo algorítmico para la simulación Multi-Agente, fue necesario profundizar con programación computacional basado en *C++* y *Java* los modelos de IC identificados como oportunos para ser implementados a un SMR. En este sentido, con el objetivo de comprender la lógica de funcionamiento de los *agentes autónomos* y los algoritmos que construyen sus comportamientos, fue desarrollado el algoritmo del modelo estocástico de Movimiento Browniano, como ejemplar inicial para simular el movimiento de un agente con un carácter autónomo aleatorio (Algoritmo 3).

Algoritmo 3.

*Algoritmo de movimiento Browniano en el entorno de programación Processing (Java).***Código en Processing**

```

float xU = 250;
float xP = 250;
float atractDer = 5;
float atractIzq = -5;
float yU = 250;
float yP = 250;
float atracArr = -5;
float atracAba = 5;
1: void setup(){
2:   size(500,500);
3: }
4: void draw(){
5:   if(xU > 0 && xU < 20){
6:     atractIzq = -4;
7:     atractDer = 5;
8:   }
9:   else if(xU > 480 && xU < width){
10:    atractDer = 4;
11:    atractIzq = -5;
12:  }
13:  else if(xU > 200 && xU < 300){
14:    atractDer = 5;
15:    atractIzq = -5;
16:  }
17:  if(yU > 0 && yU < 20){
18:    atracArr = -4;
19:    atracAba = 5;
20:  }
21:  else if(yU > 480 && yU < height){
22:    atracAba = 4;
23:    atracArr = -5;
24:  }
25:  else if(yU > 200 && yU < 300){
26:    atracAba = 5;
27:    atracArr = -5;
28:  }
29:  xU = xU + random(atractIzq, atractDer);
30:  yU = yU + random(atracArr, atracAba);
31:  line(xU, yU, xP, yP);
32:  xP = xU
33:  yP = yU
34: }

```

Nota. Elaboración propia (2023).

El algoritmo fue desarrollado con el lenguaje *Java* en el entorno de programación computacional *Processing* (en dos dimensiones). El resultado de la simulación mostró el

recorrido continuo de una partícula (agente) con incrementos aleatorios independientes (Figura 30). También, fueron explorados los comportamientos del *modelo de Vicsek* como alternativa de IC, con el fin de simular y analizar la influencia de un ruido, como medio para realizar cambios de fase en una densidad determinada de partículas (agentes).

En este modelo, las partículas (con autopropulsión) solo realizan cambios de dirección en un sentido de alineación con respecto a sus vecinos, sin embargo, mantienen una velocidad constante en todo momento sin importar su interacción con el resto de las partículas. Esta alineación sucede por la influencia de la dirección promedio de las partículas (en movimiento) vecinas que se encuentran en un radio local de afectación determinado (Aldana, Fuentes-Cabrera, y Zumaya, 2020).

El ruido condiciona el estado organizacional del sistema, y genera una transición de fase que oscila entre lo ordenado y lo desordenado: “En la fase ordenada, el sistema muestra un movimiento coherente, donde todas las partículas se mueven aproximadamente en la misma dirección; en la fase desordenada, las partículas se mueven en direcciones aleatorias (como partículas Brownianas).” (Aldana et al., 2020, p. 3). Esta relación de comportamiento es expresada matemáticamente (Fórmula 3) de la siguiente manera:

$$\theta_n(t + \Delta t) = \langle \theta(t) \rangle_n + \eta_n(t) \quad (3)$$

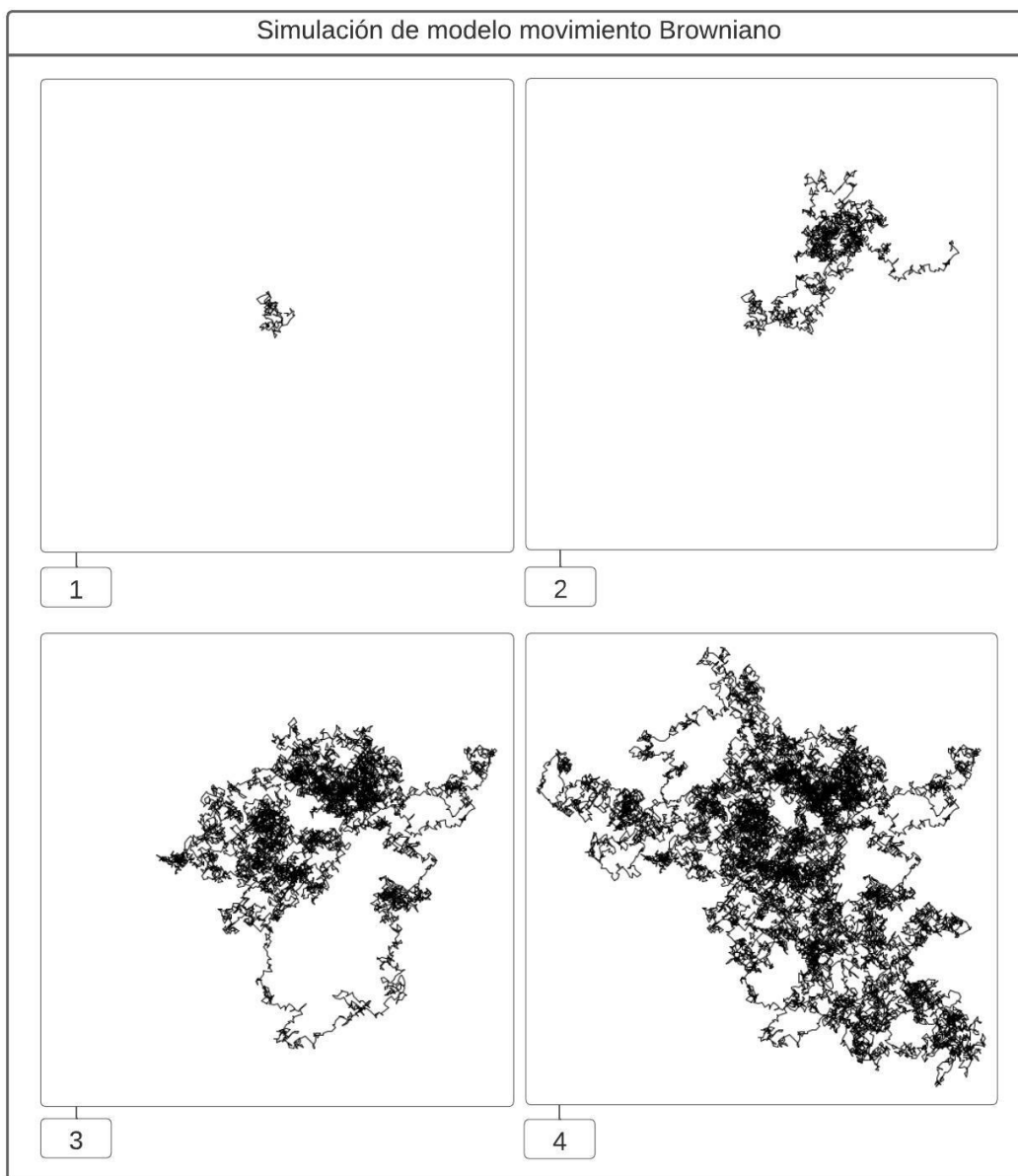
Donde, un grupo de N partículas en movimiento, dentro de un espacio con condiciones de límite periódico, tienen una velocidad v constante que es igual para todas las partículas, y cambian de dirección θ conforme el tiempo avanza. Así, dada la dirección de cada partícula n en el tiempo t , que es denotado por $\theta_n(t)$, la fuerza aleatoria cambia la dirección en un intervalo de tiempo Δt , a través de un número aleatorio $\eta_n(t)$. Por cada paso de tiempo, cada partícula evalúa

la dirección media $\langle \theta(t) \rangle_n$ de todas aquellas partículas que se encuentra en un radio de interacción R para alinearse en dirección de ese promedio (Brockmann, 2023; Vicsek, Czirók, Ben-Jacob, Cohen, y Shochet, 1995).

Este modelo, pertenece al grupo de IE que sólo explora uno de los tres comportamientos que lo constituyen: *la alineación*; por tanto, el algoritmo correspondiente es descrito en el siguiente apartado.

Figura 30.

Simulación realizada a través del algoritmo de movimiento Browniano en el entorno de programación Processing.



Nota. Elaboración propia (2023).

4.2.1.2. Inteligencia de Enjambre como modelo de interacción local Multi-Agente.

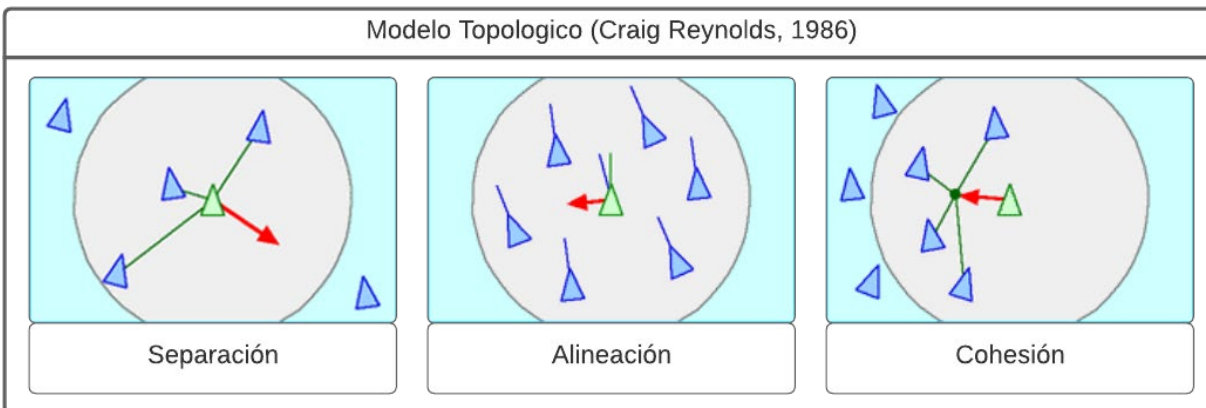
Para condicionar la interacción entre los agentes (que corresponden a las unidades robóticas del sistema) fueron analizados y explorados los comportamientos del modelo de Inteligencia de Enjambre (IE; *Swarm Intelligence*) como lógica de *interacción local* del Sistema Multi-Agente (SMA), que posteriormente es aplicado sobre un Sistema Multi Robótico (SMR), para la fabricación automatizada de la Envoltura Arquitectónica (EA).

El experto en gráficas computacionales y vida artificial Craig W. Reynolds (2001) es uno de los referentes más importantes en IE aplicados en el mundo computacional gracias a su desarrollo de modelos de comportamiento para la simulación en 1986. Los algoritmos de IE simulan el comportamiento en parvada de las aves, los peces, las abejas, entre otros sistemas de autoorganización biológica. Los comportamientos básicos de los sistemas de IE, que condicionan a los agentes, para interactuar con sus vecinos son: (1) *separación*, (2) *alineación* y (3) *cohesión* (Snooks, 2018). Leach (2021) considera los SMA y los sistemas de IE como formas básicas de IA. Los SMR que basan su modelo de comportamiento e interacción en sistemas de IE, pueden ser reconocidos como Sistemas Robóticos de Enjambre (SRE; *Swarm Robotics*) (Dias et al., 2021).

Reynolds (2001) explica el comportamiento de múltiples agentes bajo un enfoque topológico (Figura 31), en el cual la interacción entre las partículas, es condicionada por un radio de influencia en el que los comportamientos de cada agente se ven afectados por la intervención de otros vecinos. Este radio, puede ser llamado *zona de comportamiento*, y Reynolds considera uno discreto e independiente por cada comportamiento a modificar. Las principales variables por analizar son la *distancia* y la *dirección*, que se encuentra constituida por la *posición*, el *rumbo* (*velocidad*), y la *velocidad deseada* (cambio de dirección hacia objetivo) de cada agente.

Figura 31.

Enfoque topológico de Craig Reynolds para el comportamiento de interacción de la Inteligencia de Enjambre.



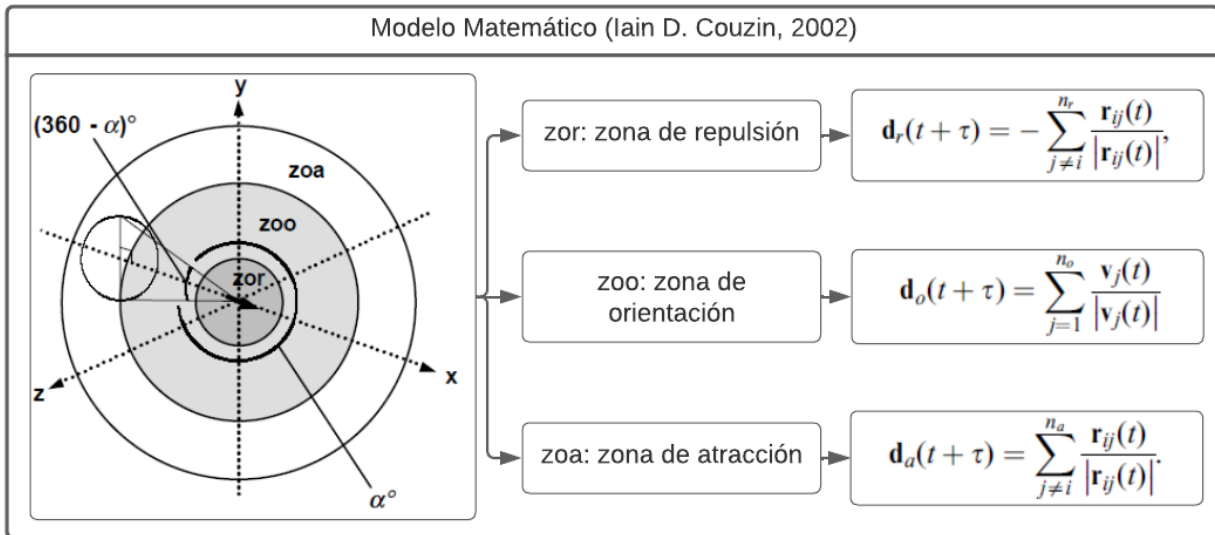
Nota. Adaptado de “*Boids: steering behaviors*” [Diagrama], por Reynolds (2001), *Boids* (<https://www.red3d.com/cwr/boids/>). Modificaciones por elaboración propia (2023).

Por otro lado, basado en Reynolds, el biólogo y científico Iain Couzin (2003; 2002) cambia el enfoque para explicar y condicionar el comportamiento de múltiples agentes en la IE de una perspectiva topológica a una matemática. A diferencia de su antecesor, en lugar de establecer una radio de influencia independiente por cada comportamiento, propone una zona de comportamiento múltiple tridimensional, en la que, de acuerdo con la distancia respecto al centro, cambia la *velocidad deseada* (el comportamiento) de la partícula analizada al momento en que los agentes vecinos intervienen.

De esta manera, la primera zona, que corresponde al centro de la burbuja de comportamiento obedece a la *zona de repulsión (separación)*, la segunda zona es de *orientación (alineación)*, y la tercera de *atracción (cohesión)* (Figura 32). Así, Couzin (2002) interpreta la primera zona como el espacio personal que evita colisiones con otros agentes por su cercanía; la segunda, como una distancia que permite el movimiento colectivo sin colisiones; y la tercera, representa la tendencia de los organismos por unirse a grupos y evitar encontrarse en la periferia. Cada uno de estos comportamientos, son expresados por Couzin (2002) con una función matemática que la describe y que serán explicados a continuación.

Figura 32.

Enfoque matemático de Iain Couzin para el comportamiento de interacción de la Inteligencia de Enjambre.



Nota. Adaptado de “Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups” (p. 3), por Couzin (2002), *Journal of Theoretical Biology*, 218(1), 1-11.

4.2.1.3. Comportamiento de separación (repulsión).

El comportamiento de separación es descrito, tanto por Reynolds (2001) como por Couzin (2003; 2002), como el cambio de *velocidad deseada* de cada agente en sentido contrario de la dirección que lleva al posicionamiento de éste, al promedio de las distancias entre los agentes vecinos que intervienen en la *zona de comportamiento* en un SMA. Couzin lo describe matemáticamente de la siguiente forma (Fórmula 4):

$$d_r(t + \tau) = - \sum_{j \neq i}^{n_r} \frac{r_{ij}(t)}{|r_{ij}(t)|} \quad (4)$$

Donde N agentes ($i = 1, 2, \dots, N$) con vectores de posición c_i , y vectores de dirección unitarios V_i son simulados en un espacio continuo tridimensional. El tiempo es particionado en

pasos de tiempo discretos t con un espaciamiento regular τ . En cada paso, los agentes evalúan la posición y orientación de n vecinos dentro de la *zona de comportamiento*, para determinar la dirección deseada del agente en el siguiente paso de tiempo $d_i(t + \tau)$.

En la zona de comportamiento de repulsión, modelada como una esfera centrada en el agente con radio r_r , si n_r vecinos se encuentran presentes en el tiempo t , el agente i responde con un movimiento de alejamiento de sus vecinos en la zona. Es considerado $r_{ij} = (c_j - c_i) / |(c_j - c_i)|$ como el vector unitario en dirección del vecino j . A continuación, se muestra el algoritmo correspondiente al comportamiento de separación (Algoritmo 4).

Algoritmo 4.

Algoritmo de separación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).

Código en Processing

```

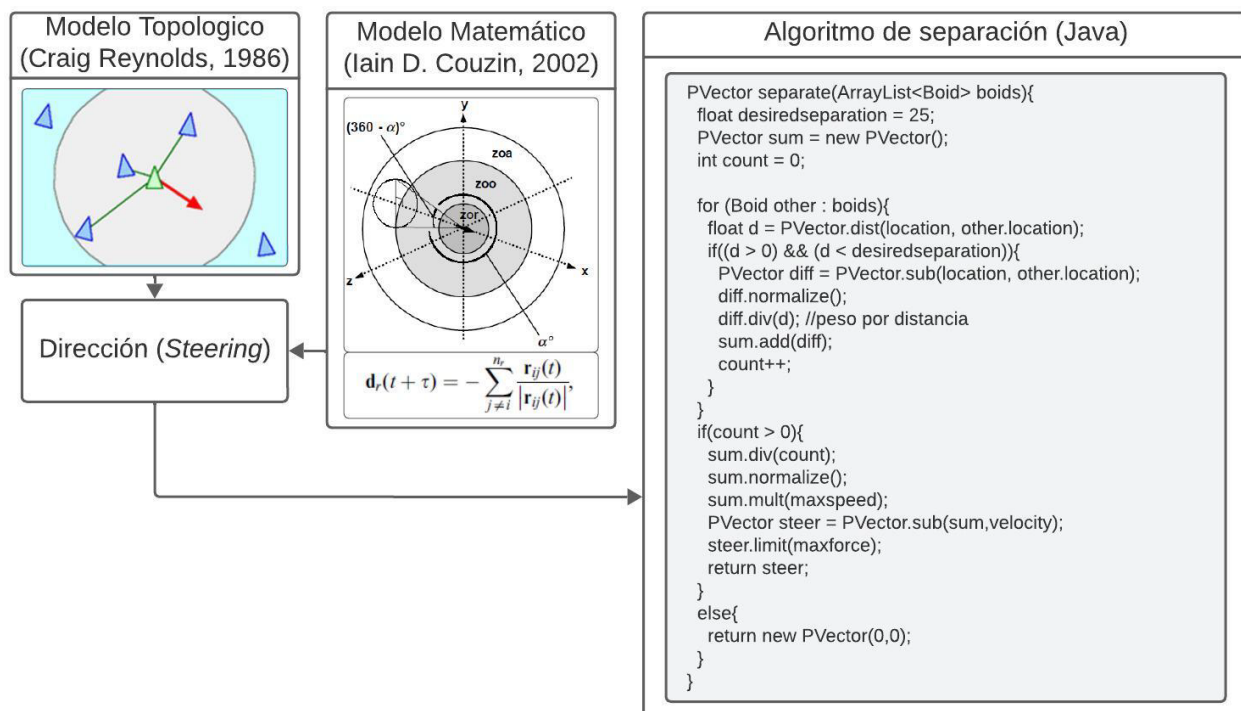
1: PVector separate(ArrayList<Boid> boids){
2:   float desiredseparation = 25;
3:   PVector sum = new PVector();
4:   int count = 0;
5:   for(Boid other : boids){
6:     float d = PVector.dist(location, other.location);
7:     if((d > 0) && (d < desiredseparation)){
8:       PVector diff = PVector.sub(location, other.location);
9:       diff.normalize();
10:      diff.div(d);
11:      sum.add(diff);
12:      count++;
13:    }
14:  }
15:  if(count > 0){
16:    sum.div(count);
17:    sum.normalize();
18:    sum.mult(maxspeed);
19:    PVector steer = PVector.sub(sum,velocity);
20:    steer.limit(maxforce);
21:    return steer;
22:  }
23:  else{
24:    return new PVector(0,0);
25:  }
26: }
```

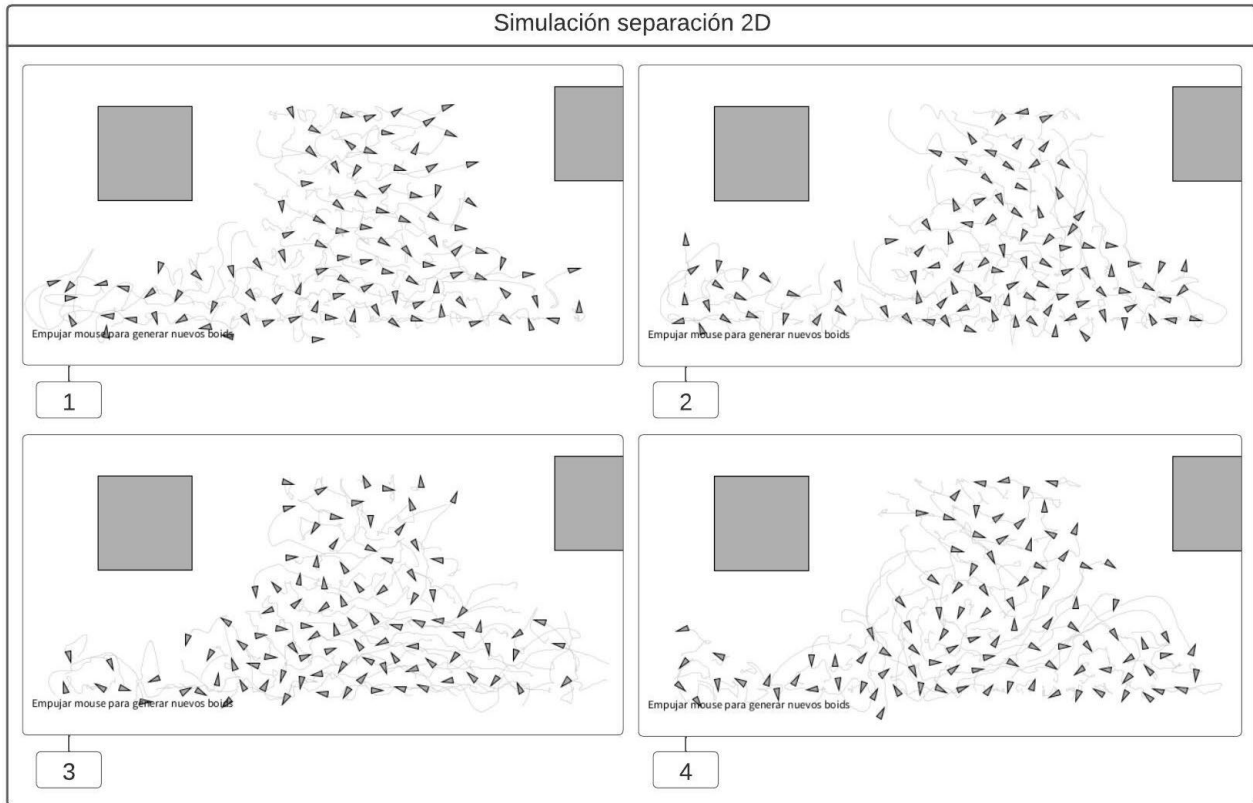
Nota. Adaptado de “*The Nature of Code: Simulating natural systems with processing*” (pp. 304, 305), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

Este comportamiento fue simulado en el MBA bidimensionalmente con el lenguaje *Java* en el entorno de programación *Processing*. El desarrollo de este comportamiento se basó en el algoritmo creado por Daniel Shiffman (2012) (Figura 33a); también, a continuación, es mostrado el resultado de la simulación (Figura 33b).

Figura 33.

(a) Algoritmo de separación desarrollado en el entorno de programación *Processing* (*Java*) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.





Nota. Adaptado de “*The Nature of Code: Simulating natural systems with processing*” (pp. 304, 305), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

4.2.1.4. *Comportamiento de alineación (orientación).*

El comportamiento de alineación es descrito, tanto por Reynolds (2001) como por Couzin (2003; 2002), como el cambio de *velocidad deseada* de cada agente en sentido promedio a la suma de direcciones de los agentes vecinos que intervienen en la *zona de comportamiento* en un SMA. Couzin lo describe matemáticamente de la siguiente forma (seguir nomenclatura mostrada en sección anterior para su interpretación) (Fórmula 5):

$$d_o(t + \tau) = \sum_{j=1}^{n_o} \frac{V_j(t)}{|V_j(t)|} \quad (5)$$

Este comportamiento, fue simulado en el MBA bidimensionalmente mediante el lenguaje *Java* en el entorno de programación *Processing*. A continuación, se muestra el algoritmo correspondiente al comportamiento de alineación (Algoritmo 5).

Algoritmo 5.

Algoritmo de alineación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).

Código en *Processing*

```

1: PVector align (ArrayList<Boid> boids){
2:     float neighbordist = 50;
3:     PVector sum = new PVector(0,0);
4:     int count = 0;
5:     for(Boid other : boids){
6:         float d = PVector.dist(location, other.location);
7:         if((d > 0) && (d < neighbordist)){
8:             sum.add(other.velocity);
9:             count++;
10:        }
11:    }
12:    if(count > 0){
13:        sum.div(count);
14:        sum.normalize();
15:        sum.mult(maxspeed);
16:        PVector steer = PVector.sub(sum,velocity);
17:        steer.limit(maxforce);
18:        return steer;
19:    }
20:    else{
21:        return new PVector(0,0);
22:    }
23: }

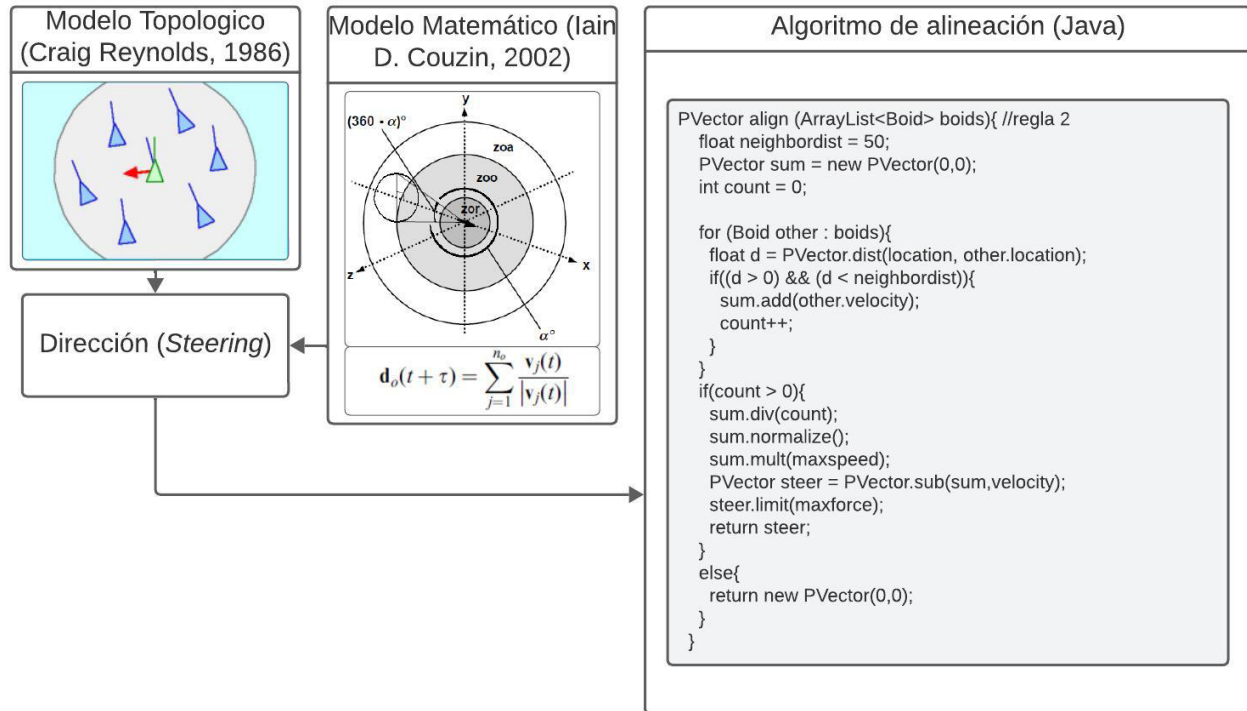
```

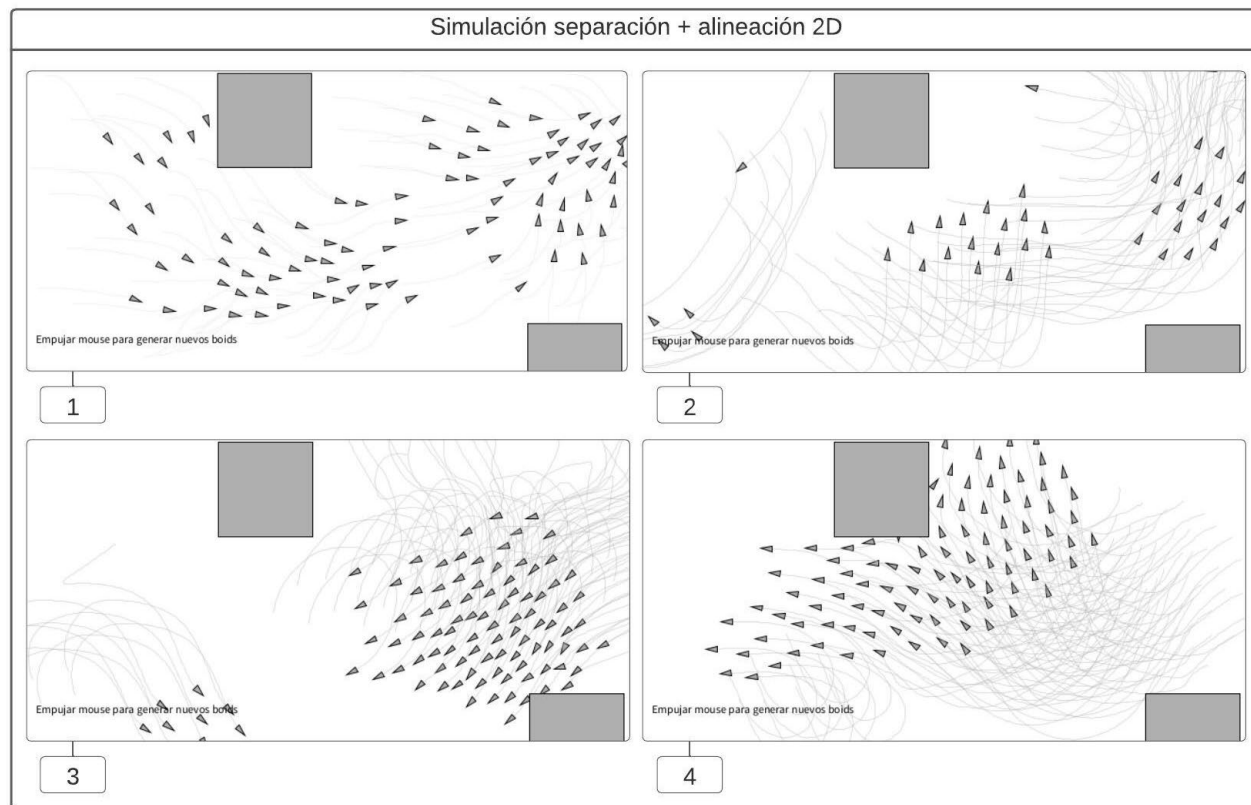
Nota. Adaptado de “*The Nature of Code: Simulating natural systems with processing*” (p. 311), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

Este desarrollo se basó en el algoritmo creado por Daniel Shiffman (2012) (Figura 34a); también, a continuación, es mostrado el resultado de la simulación del comportamiento de alineación en dos dimensiones (Figura 34b).

Figura 34.

(a) Algoritmo de alineación desarrollado en el entorno de programación Processing (Java) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.





Nota. Adaptado de “*The Nature of Code: Simulating natural systems with processing*” (p. 311), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

4.2.1.5. *Comportamiento de cohesión (atracción).*

El comportamiento de cohesión es descrito, tanto por Reynolds (2001) como por Couzin (2003; 2002), como el cambio de *velocidad deseada* de cada agente en sentido de la dirección que lleva al posicionamiento de éste, al promedio de las distancias entre los agentes vecinos que intervienen en la *zona de comportamiento* en un SMA. El modelo matemático que describe Couzin para este comportamiento, es similar al de separación, pero contrario; en este sentido, la fórmula no tiene un valor negativo (Fórmula 6):

$$d_a(t + \tau) = \sum_{j \neq i}^{n_a} \frac{r_{ij}(t)}{|r_{ij}(t)|} \quad (6)$$

El comportamiento, fue simulado en el MBA bidimensionalmente con el lenguaje *Java* en el entorno de programación *Processing*. A continuación, se muestra el algoritmo correspondiente al comportamiento de cohesión (Algoritmo 6).

Algoritmo 6.

Algoritmo de cohesión desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).

Código en *Processing*

```

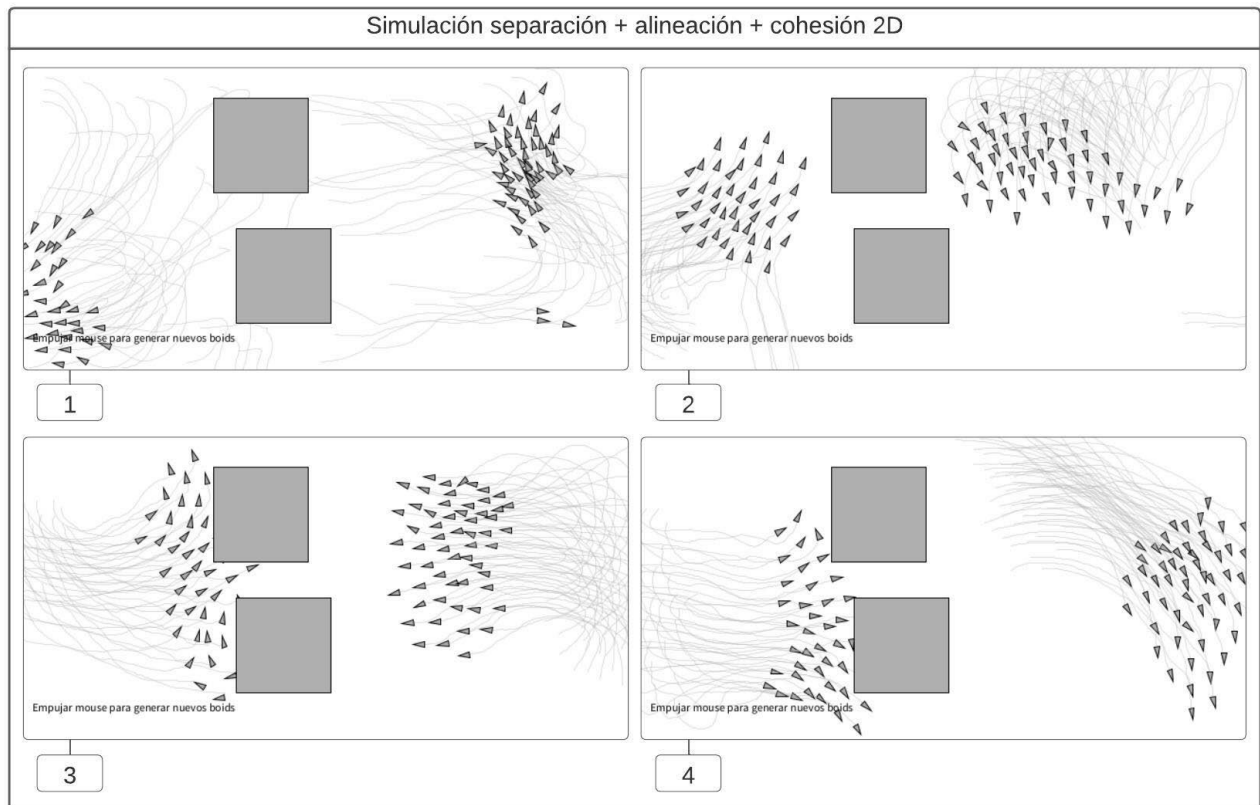
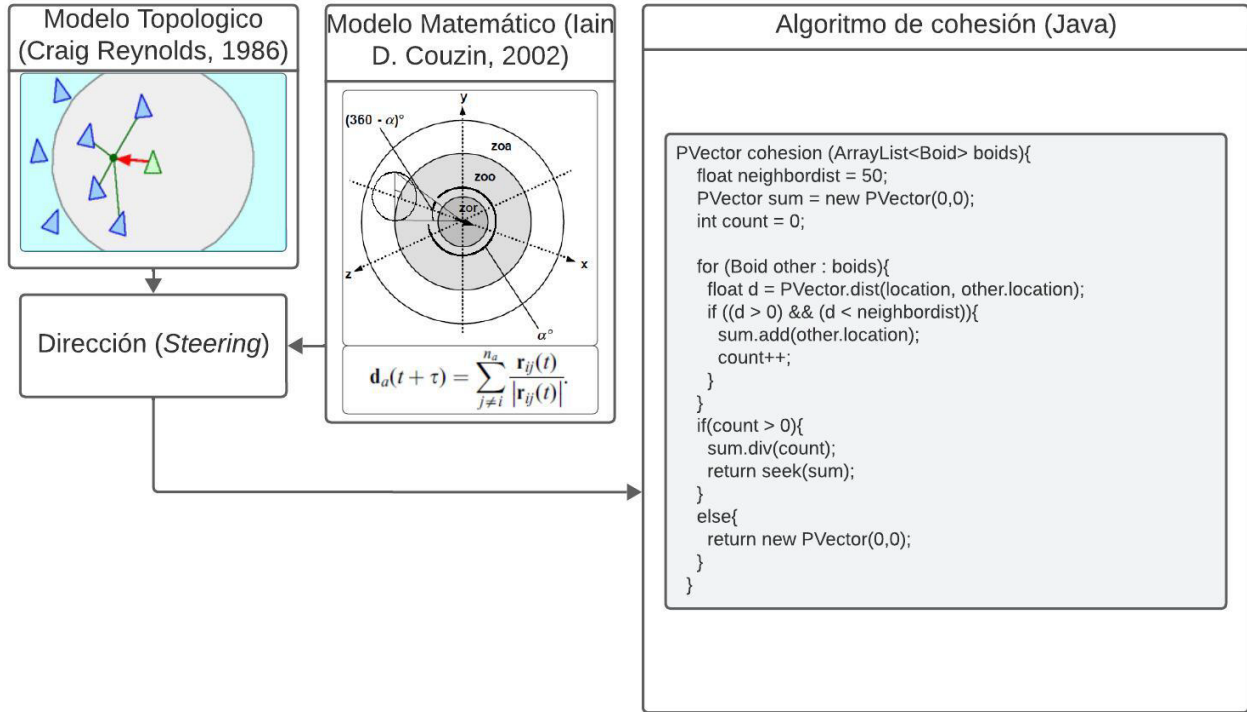
1: PVector cohesion (ArrayList<Boid> boids){
2:   float neighbordist = 50;
3:   PVector sum = new PVector(0,0);
4:   int count = 0;
5:   for(Boid other : boids){
6:     float d = PVector.dist(location, other.location);
7:     if((d > 0) && (d < neighbordist)){
8:       sum.add(other.location);
9:       count++;
10:    }
11:  }
12:  if(count > 0){
13:    sum.div(count);
14:    return seek(sum);
15:  }
16:  else{
17:    return new PVector(0,0);
18:  }
19: }
```

Nota. Adaptado de “*The Nature of Code: Simulating natural systems with processing*” (p. 312), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

Este desarrollo se basó en el algoritmo creado por Daniel Shiffman (2012) (Figura 35a); también, a continuación, es mostrado el resultado de la simulación del comportamiento de cohesión en dos dimensiones (Figura 35b)

Figura 35.

(a) *Algoritmo de cohesión desarrollado en el entorno de programación Processing (Java) según el modelo topológico de Reynolds -arriba-. (b) Resultado de simulación bidimensional del algoritmo -abajo-.*



Nota. Adaptado de “The Nature of Code: Simulating natural systems with processing” (p. 312), por Shiffman (2012), Selbstverl. Modificación por elaboración propia (2023).

4.2.1.6. *Simulación tridimensional e interacción global de la Inteligencia de Enjambre.*

Para simular en tercera dimensión los comportamientos de Reynolds (2001): *separación*, *alineación* y *cohesión* que constituyen la *interacción local* del modelo de IE, fueron adaptados los algoritmos correspondientes al entorno de programación visual *Grasshopper*, con la aplicación del complemento algorítmico *Quelea*.

La plataforma integrada al programa CAD *Rhinoceros*, llamada *Grasshopper*, es uno de los entornos de programación visual (*Graphical User Interface*, GUI) más sólidos que funciona como un editor de algoritmos gráficos para construir modelos paramétricos sin necesariamente tener habilidades previas de programación (Onchi, 2021). Esta plataforma, incluye un conjunto de complementos dedicados que funcionan como herramientas de programación, y sirven para la aplicación de los métodos *metaheurísticos*. De esta manera, es posible aplicar algoritmos evolutivos y métodos de IC para el análisis, control y optimización, con fines de resolución de problemas arquitectónicos (Figura 36).

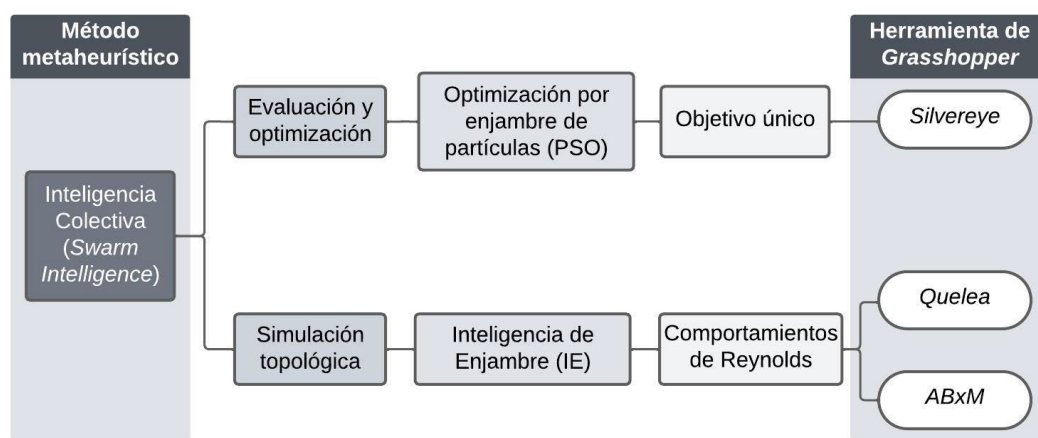
Así, para el caso de evaluaciones de objetivos únicos mediante métodos de IC, Wortmann (2019) menciona, en su análisis comparativo de métodos *metaheurísticos*, que el algoritmo PSO ofrece mayor robusticidad y mejores resultados en el proceso de simulación computacional realizada con *Grasshopper*. En este sentido, *Silvereye* (Cichocka, Migalska, Browne, y Rodriguez, 2016) es un complemento que ejecuta el algoritmo canónico desarrollado por Kennedy y Eberhart (1995) (explicado con anterioridad).

Por otro lado, para fines de simulación topológica de la IE, con el objetivo de reinterpretar sistemas de comportamiento artificial Multi-Agente o para el desarrollo espacial y formal arquitectónico, *Quelea* es una aplicación desarrollada por Alex Fischer, que se basa en los sistemas de comportamiento de Reynolds (2001) para su simulación en tercera dimensión. De la

misma manera, *ABxM* (Groenewolt, Schwinn, Nguyen, y Menges, 2018) es un conjunto de herramientas que estructuran un marco interactivo basado en agentes para el diseño arquitectónico y aplicaciones robóticas, producido en el Instituto para el Diseño Computacional y Construcción (ICD) de la Universidad de Stuttgart.

Figura 36.

Complementos algorítmicos de Grasshopper para los métodos metaheurísticos de Inteligencia de Enjambre.

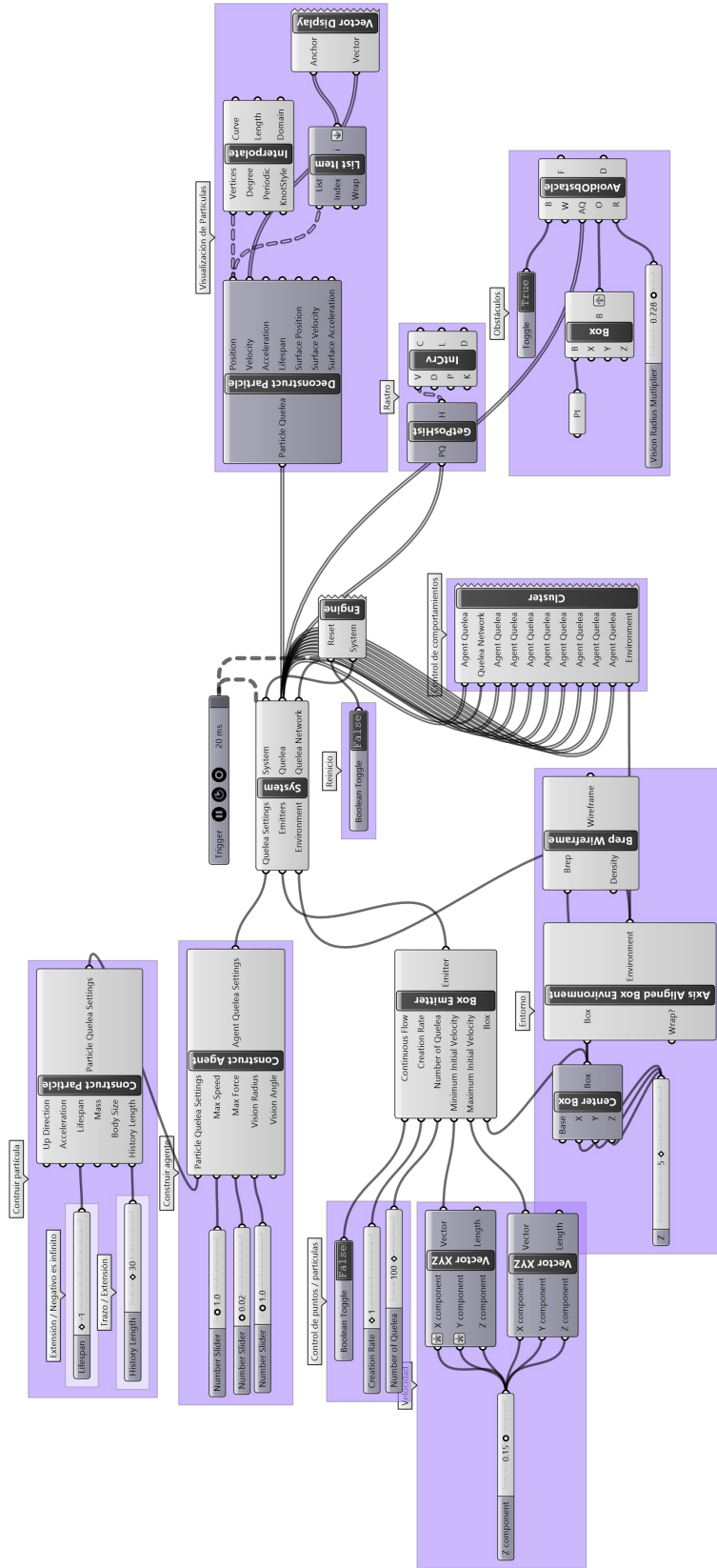


Nota. Diagrama por elaboración propia (2023).

De esta manera, a través de *Grasshopper* y el complemento *Quelea*, fue estructurado un flujograma algorítmico (Figura 37) que se encuentra constituido por tres partes: (1) la construcción de los agentes, emisor de partículas y su entorno de interacción (lado izquierdo del algoritmo); (2) el controlador y motor del sistema Multi-Agente, así como el manipulador de comportamientos (parte central); (3) las funciones de visualización topológica – geométrica del sistema y el constructor de obstáculos (lado derecho).

Figura 37.

Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Inteligencia de Enjambre mediante Quelea.

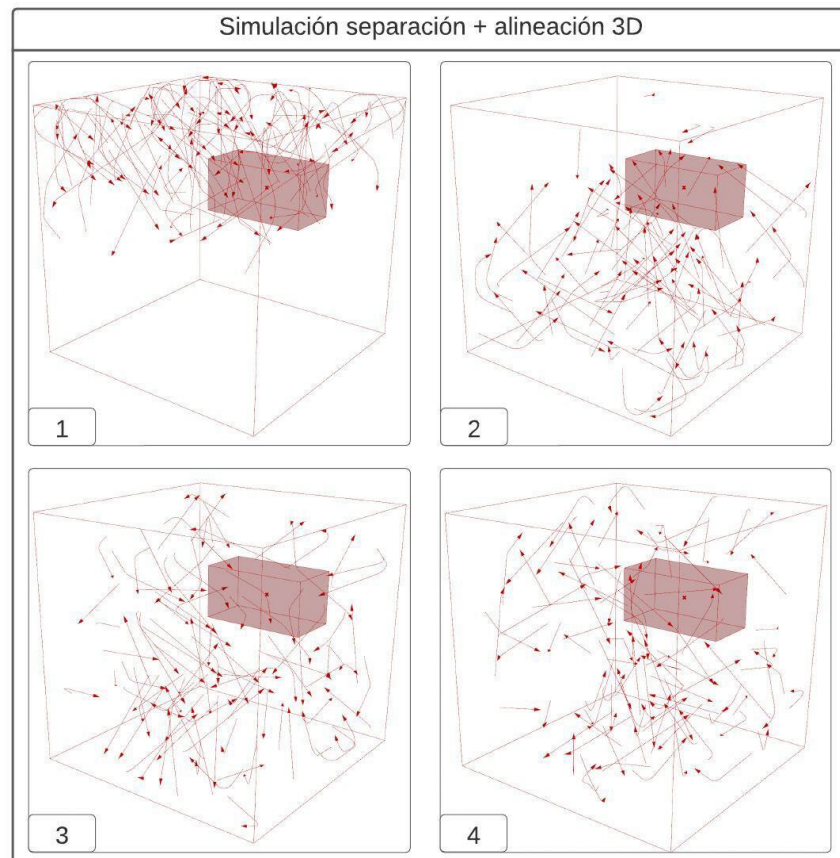


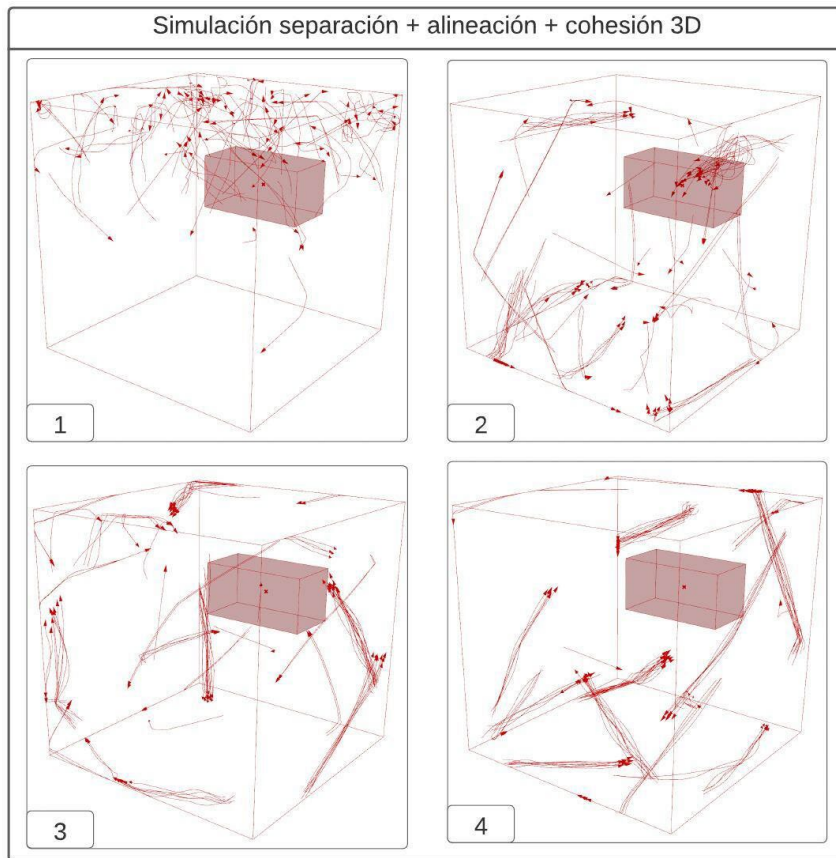
Nota. Elaboración propia (2023).

La interacción local de los agentes, como estrategia de IA, simula el comportamiento de las parvadas de aves o los cardúmenes de peces. La reinterpretación de estos comportamientos básicos bio-inspirados, pueden ser traducidos a sistemas complejos y estructuras emergentes a *nivel global* (del sistema). En este ejemplar, los resultados no sólo arrojaron un conjunto de líneas generadas por la huella del recorrido de las partículas, sino que también, fueron un comportamiento programado que puede ser trasladado a procesos de automatización robótica en la fabricación arquitectónica (Figura 38).

Figura 38.

Secuencia que muestra la simulación tridimensional de los comportamientos de la Inteligencia de Enjambre con Quelea de Grasshopper.





Nota. Elaboración propia (2023).

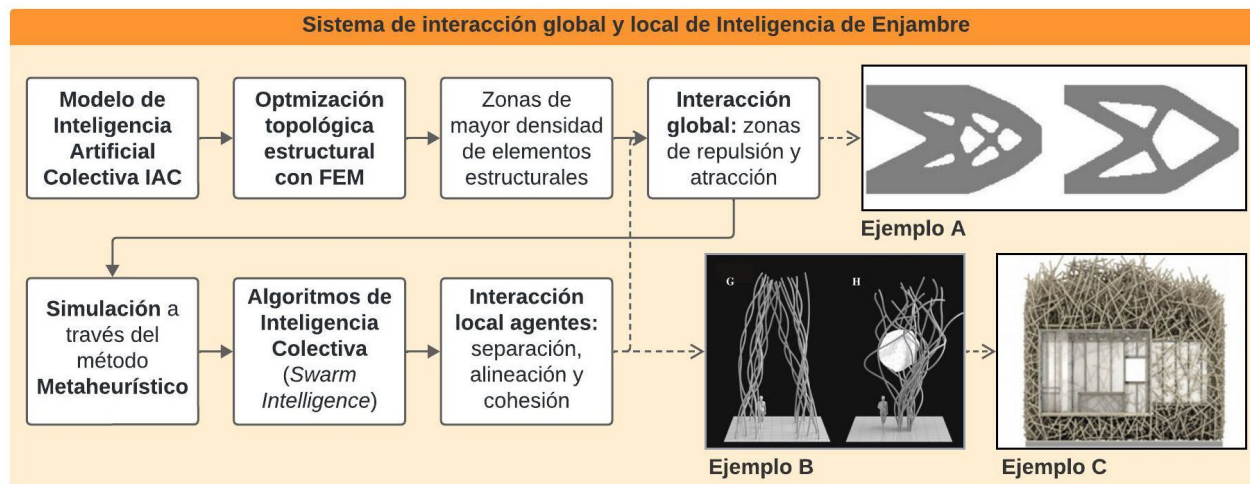
Por tanto, el objetivo fue generar un sistema Multi-Agente para la generación de estructuras topológicas que sirvan como directriz para la agregación de material en un plano espacial. De esta manera, mediante densidades de disposición, producto de los recorridos distribuidos de los agentes, se desarrollaron estructuras bidimensionales que, en acumulación vertical seriada, pueden consolidar una EA tridimensional.

La propuesta es que, en el sistema, existan obstáculos que funcionen como zonas de repulsión para los agentes, a fin de evitar agregación de material en esos espacios. Estas zonas de repulsión son condicionadas por el resultado de una previa simulación de optimización topológica estructural asistida por el *Método de Elementos Finitos* (FEM), aplicado sobre cada plano de referencia para la construcción automatizada que realiza cada agente. De esta manera, a

través de una imagen de densidades, generada por la aplicación FEM, es posible determinar las zonas de repulsión y de atracción para las partículas. Esta clasificación de zonas fungió como parámetro que condiciona la *interacción global* del modelo de IC (Figura 39).

Figura 39.

Sistema de interacción global y local de Inteligencia de Enjambre.



Ejemplo A: BESO Simulation Result, Bao et al. (2022); Ejemplo B: Fiberbots, Kayser et al. (2018); Ejemplo C: Algorithmic Space, Matsukawa (2006)

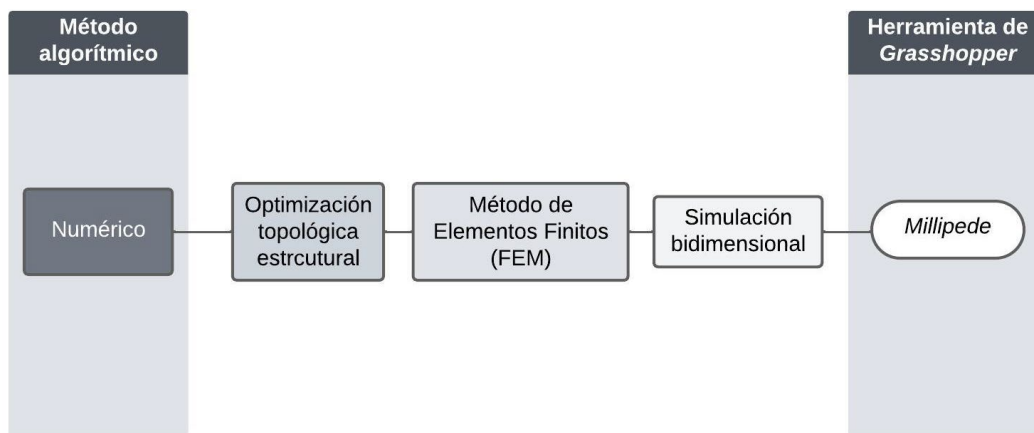
Nota. Imágenes adjuntadas en diagrama recuperadas de “SwarmBESO: Multi-agent and Evolutionary Computational Design based on the Principles of Structural Performance” (p.244), por Bao et al. (2021) (Ejemplo A); “Design of a multi-agent, fiber composite digital fabrication system” (p.6), por Kayser et al. (2018); “Algorithmic Space [Bungalow]” (p. 21), por Shohei Mutsokawa et al., citado por Hwang (2006), Actar. Diagrama por elaboración propia (2023).

Para la realización de la simulación de optimización topológica estructural, asistida por el *Método de Elementos Finitos* (FEM), fue utilizado el complemento de *Grasshopper* llamado *Millipede* (Figura 40). La estrategia fue aplicada sobre una superficie plana, en la cual se generó una imagen que señala las zonas que implican mayor densidad de material para poder soportar una carga. La imagen contrasta los colores blanco y negro, entre más blanca sean proyectadas las

zonas, mayor necesidad de materia requiere como refuerzo. La disposición de color blanco que arrojó la imagen muestra un sistema topológico optimizado de refuerzo estructural.

Figura 40.

Herramienta de Grasshopper Millipede para la simulación del Método de Elementos Finitos (FEM) y la optimización topológica estructural.

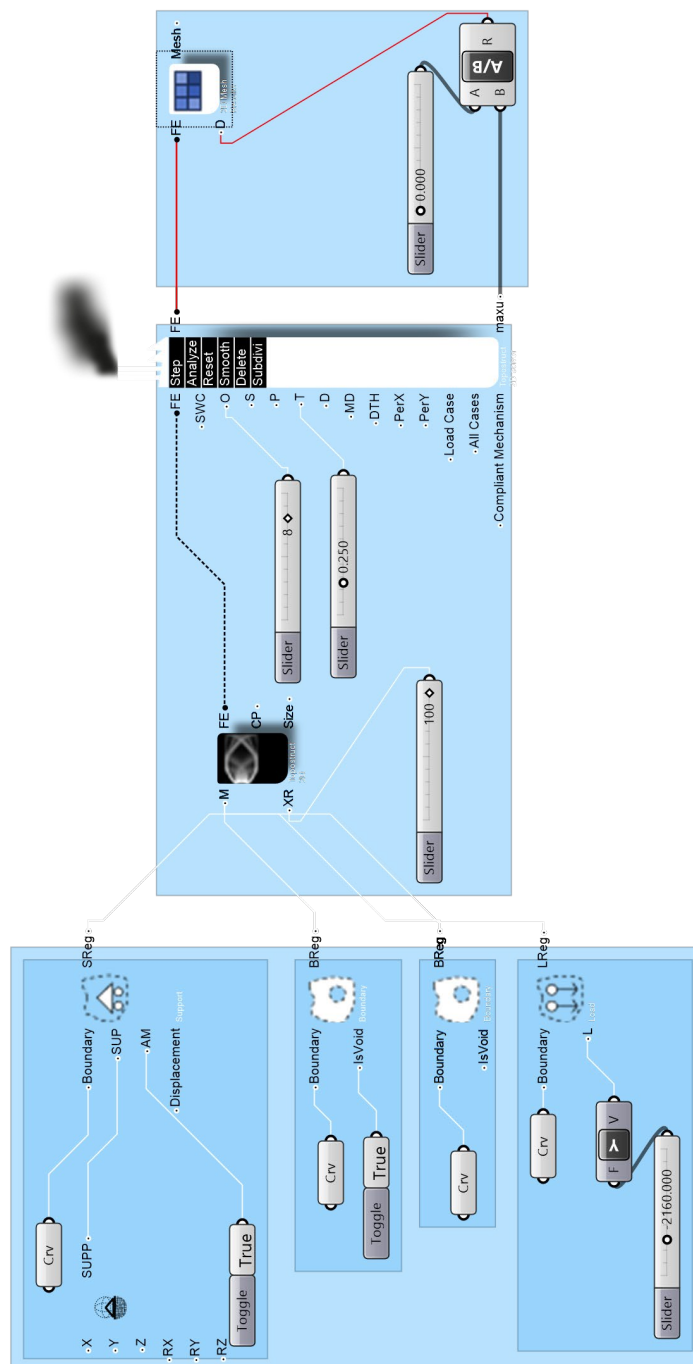


Nota. Diagrama por elaboración propia (2023).

El algoritmo se encuentra constituido por tres secciones (Figura 41): (1) determinar la carga y soporte estructural, el plano y vacío de análisis (lado izquierdo del algoritmo); (2) elegir la estrategia algorítmica de análisis y disponer el motor del simulador (parte central); (3) convertir los datos paramétricos en una malla geométrica y en la proyección de imagen resultante (lado derecho).

Figura 41.

Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación de optimización topológica estructural con el método FEM a través de Millipede.



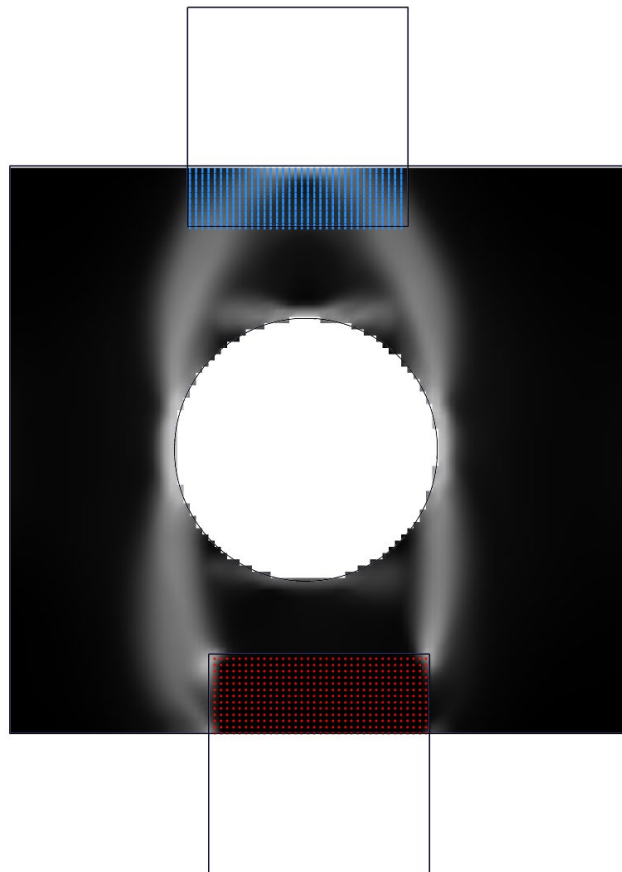
Nota. Elaboración propia (2023).

El resultado de la simulación (Figura 42) no sólo fungió para disponer obstáculos a los agentes en las zonas donde no se requiere agregación de material, sino también, sirvió como un

campo de flujo vectorial que, a manera de ruido, conducirá el recorrido de las partículas a *nivel global*.

Figura 42.

Resultado de la simulación realizada con el algoritmo de optimización topológica estructural (FEM) en el entorno de programación visual Grasshopper con el complemento Millipede.



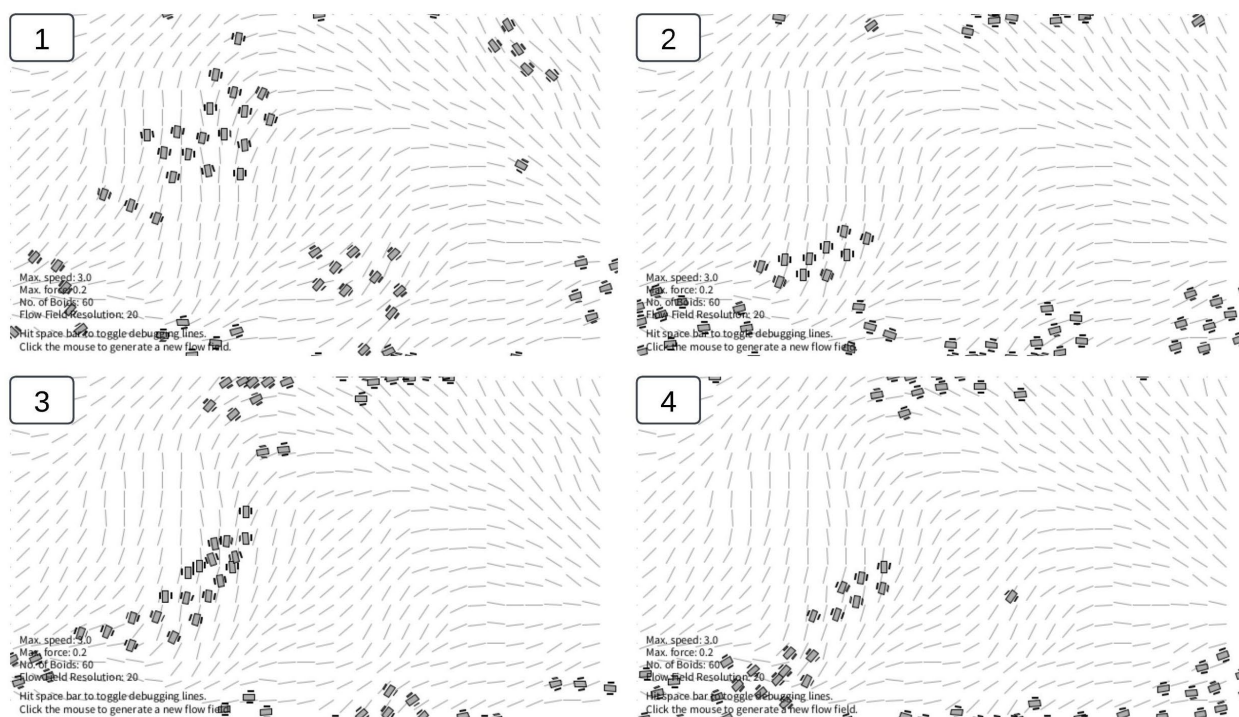
Nota. Elaboración propia (2023).

Un campo de flujo vectorial es un sistema que determina un entorno a través de la subdivisión en retícula de un espacio (virtual) bidimensional o tridimensional. En cada celda consecuente, es posicionado un vector que condiciona el rumbo de cada agente que pasa por ésta (Shiffman, 2012). De esta manera, es posible predecir el camino que llevará cada partícula en su

recorrido sobre el entorno, como si fuera una corriente de un flujo de agua o viento que, a manera de ruido, conduce a un objeto o ser (agente) determinado (Figura 43).

Figura 43.

Agentes conducidos por un campo de flujo vectorial determinado en un entorno de interacción.



Nota. Realizado en el entorno de programación *Processing (Java)*. Elaboración propia (2023).

4.2.2. Variables de análisis.

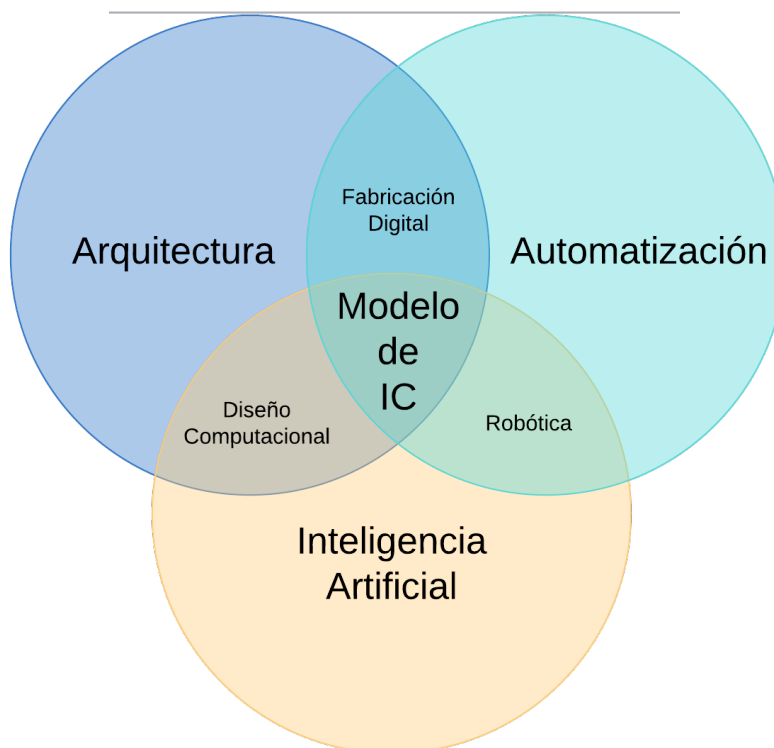
Las variables de análisis específicas del modelo de Inteligencia Colectiva (IC), parten del objetivo principal y los particulares de la presente investigación; los cuales, se centraron en solventar las problemáticas de accesibilidad de los sistemas de Fabricación Digital (FD) aplicados sobre la automatización constructiva de la Arquitectura. De esta forma, la investigación se enfocó en integrar las especialidades disciplinares de *Automatización e Inteligencia Artificial* (IA) hacia la *Arquitectura* y la gran escala que representan sus construcciones, así como los

medios robóticos utilizados en su fabricación, que típicamente obedecen a los Brazos Robóticos de tipo Industrial (BRI) (Figura 44).

Figura 44.

Integración de las tres especialidades (Arquitectura, Automatización e Inteligencia Artificial) en el modelo de Inteligencia Colectiva (IC).

Modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la fabricación de la Envolvente Arquitectónica (EA)



Nota. Elaboración propia (2021).

La hipótesis de este trabajo apuesta por (1) disminuir el tamaño de las unidades robóticas, (2) fomentar la multiplicidad de éstos a partir de mecanismos colaborativos de IA, y finalmente (3) diluir las brechas disciplinares existentes entre estas tres especialidades. En este sentido, las variables de análisis del modelo de IC correspondieron a la evaluación de la (a) *multiplicidad* de las unidades robóticas, para verificar la (b) *efectividad (relación éxito-fracaso)* del Sistema Multi-Robótico (SMR), y la valoración del (c) *tiempo* que requerirá para solventar las tareas

inherentes de la construcción automatizada. Este contraste, permitió estudiar la pertinencia de la *reducción de escala* al momento de construir elementos en tamaño arquitectónico (Figura 45).

Figura 45.

Relación de variables de análisis específicas del modelo de Inteligencia Colectiva.

VARIABLES A MEDIR EN EL MODELO DE INTELIGENCIA COLECTIVA (IC) APLICADO A UN SISTEMA MULTI-ROBÓTICO (SMR) PARA LA FABRICACIÓN DE LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA (EA)



Nota. Elaboración propia (2022).

La evaluación de estas variables, no solo tuvieron un carácter causal en el diseño del cuasiexperimento, sino que también, fungieron como medio para verificar el desempeño del modelo aplicado sobre un SMR virtual, con estrategias de análisis estadístico correlacional, tanto descriptivo como inferencial. Este proceso de evaluación será explicado con mayor profundidad en el apartado *3.7. Diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos.*

4.2.3. Estrategias de aplicación.

Los procesos de simulación implicaron ejecuciones de metodologías requeridas por la IA, tanto para la optimización de los resultados, como para condicionar el sistema de interacción y comportamiento colectivo de las unidades robóticas. Dichas metodologías fueron de carácter *metaheurístico* de tipo *poblacional*. Primeramente, fueron aplicados algoritmos para la optimización estructural de los elementos que constituyen el sistema constructivo de la EA a través del *Método de Elementos Finitos* (FEM). Posteriormente, la simulación utilizó algoritmos basados en IC para condicionar el comportamiento de *interacción local y global* de las unidades del SMR.

Estos procedimientos *metaheurísticos* son estrategias algorítmicas que la IA utiliza para la resolución de problemas a través de simulación computacional (sobre todo cuando son de carácter dinámico). Estas estrategias son tanto auxiliares como participes (con su aplicación) en las fases de concepción de las disciplinas de Diseño y son efectivas para realizar múltiples aproximaciones intuitivas a respuestas no esperadas o preconcebidas.

Así, el desarrollo del modelo de IC integró lógicas de (1) *interacción*, y (2) *locomoción*, como medio para la fabricación automatizada mediante un SMR. La lógica de *interacción* fue conducida con el modelo de Inteligencia de Enjambre (*Swarm Intelligence*), y la lógica de *locomoción* con el modelo *Vehículos de Braitenberg* (explicado con mayor detalle en el siguiente apartado). En conjunto, estas dos lógicas y modelos completaron el grupo de comportamientos que se destinan al movimiento colectivo del SMA.

Por otro lado, futuras investigaciones extenderán el sistema de comportamiento del modelo, para poder solventar de manera precisa las tareas que se relacionan con la agregación de material, bajo el concepto de FD aditiva con elementos discretos de madera. El modelo de IC

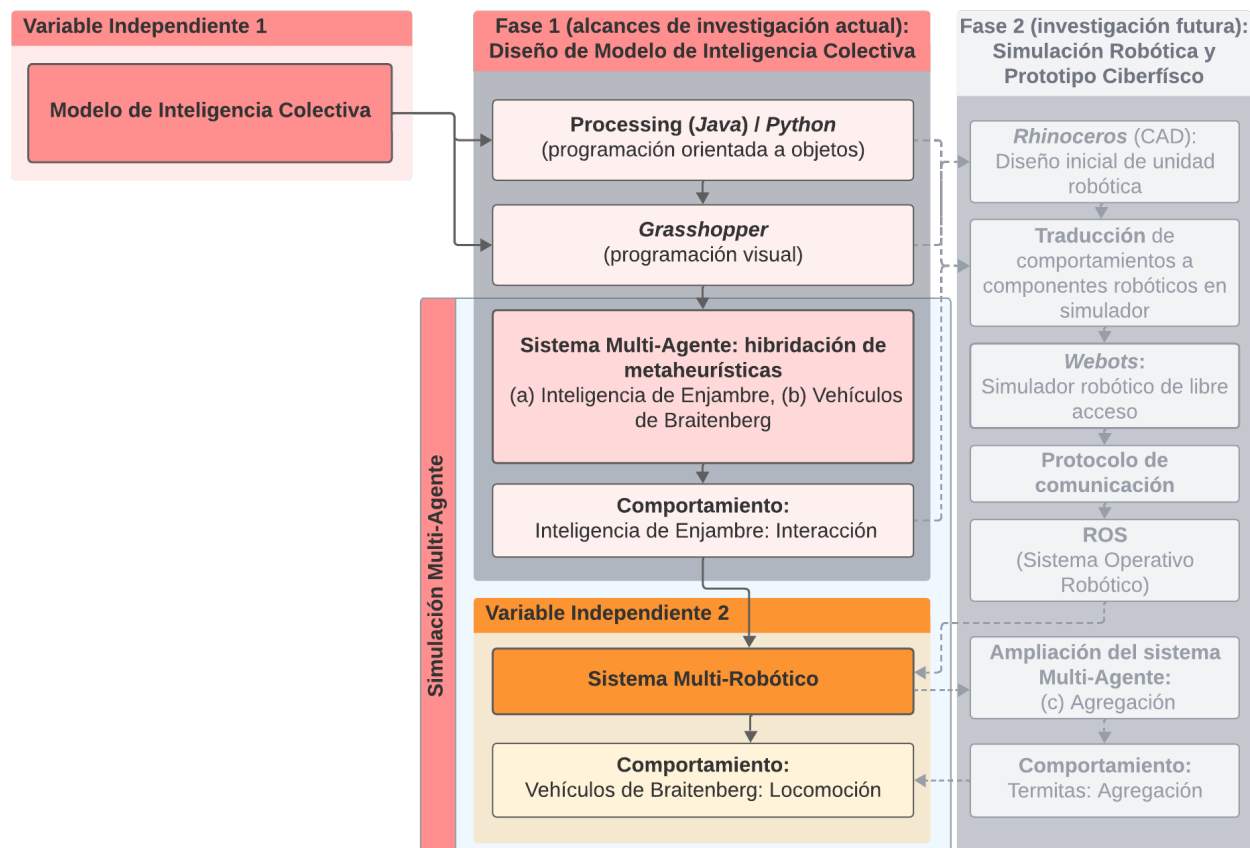
llamado *Termitas* se visualiza como una alternativa prometedora, por seguir un comportamiento de *agregación y agrupamiento bio-inspirado* para ser integrado con las *metaheurísticas* previamente mencionadas que constituyen la propuesta del modelo Multi-Agente.

4.3. Sistema Multi-Robótico

El modelo de IC, previamente descrito, ejerce una aplicación directa sobre el Sistema Multi-Robótico (SMR), el cual es considerado en esta investigación como *la variable de análisis independiente* 2. El desarrollo virtual del modelo permitió la simulación del comportamiento físico del SMR, que se encontrará constituido por un conjunto de unidades robóticas de pequeña escala condicionadas para la *interacción* y la *locomoción* del conjunto, en el propósito de construir automáticamente (FD; *variable dependiente*) la EA (*unidad de análisis*) (Figura 46). La descripción del proceso de validación será descrita en el apartado 3.8.1. Estrategia para la validación de desempeño del modelo.

Figura 46.

Aplicación del modelo de IC para la simulación del Sistema Multi-Robótico (SMR).

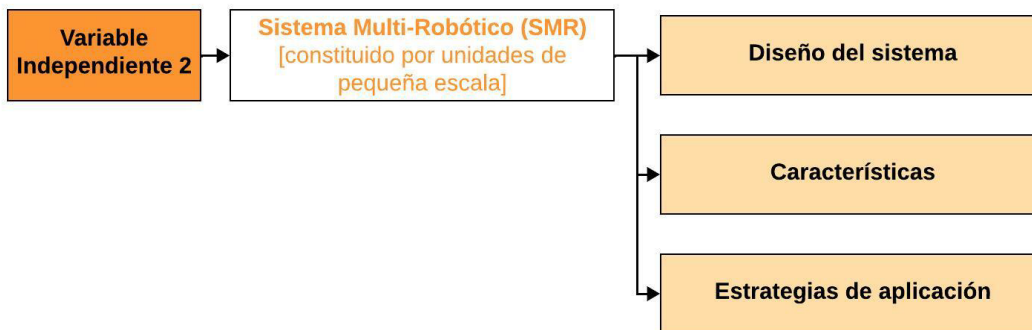


Nota. Elaboración propia (2022).

De esta manera, el SMR es explicado en los subpartados siguientes con el (1) *diseño del sistema*, sus (2) *características* tanto del conjunto como de las unidades robóticas que lo constituyen, así como con las (3) *estrategias de aplicación* del sistema que fueron consideradas en la presente metodología (Figura 47).

Figura 47.

Componentes explicativos del Sistema Multi-Robótico SMR.



Nota. Elaboración propia (2022).

4.3.1. Diseño del sistema.

El sistema del Modelo Basado en Agentes (MBA), descrito con anterioridad, tomó como referencia a una partícula que interactúa dentro un espacio tridimensional virtual, pero no presenta características que se asemejen a un *vehículo autónomo terrestre* en su comportamiento. En este sentido, la progresión del sistema sucedió con la integración de la lógica *metaheurística* de los *Vehículos de Braitenberg*, para interpretar un modelo de *locomoción* que complementa al previo conjunto de comportamientos de *interacción*.

4.3.1.1. Vehículos de Braitenberg como modelo de locomoción.

Desde la perspectiva digital, que es la que compete a la primera fase de la metodología propuesta, el conjunto de comportamientos de los *Vehículos de Braitenberg* como modelo de *locomoción* es similar al de la IE; la diferencia, es que se encuentran dirigidos a un enfoque neurocientífico de simulación e interpretación. El concepto fue ideado por el neuroanatomista y ciberneticista Valentino Braitenberg (2004) en 1984 como un experimento mental, con el fin de ilustrar las habilidades de un conjunto de agentes inteligentes, consideradas por él como creaturas sintéticas en la publicación "*Vehicles: Experiments in synthetic psychology*" (Reas y Fry, 2007). En lugar de *separación*, la interpretación de Braitenberg fue el *miedo*; en lugar de

cohesión, la interpretación fue *amor* o *agresión*. No existen en este modelo un similar a alineación (Figura 48).

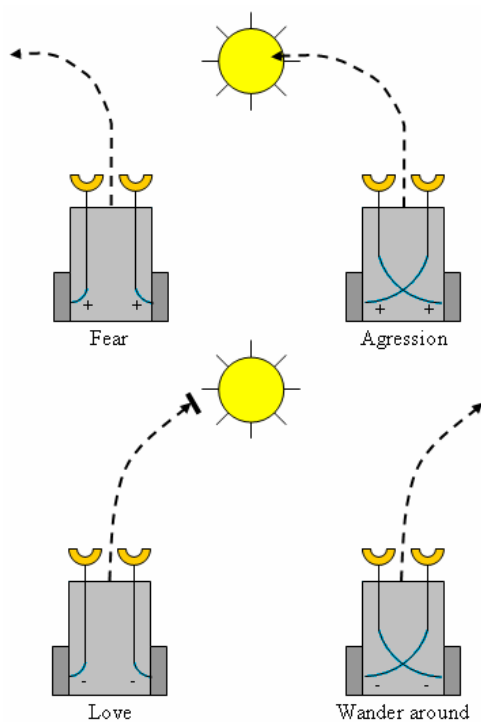
Ante el objetivo de desarrollar un modelo de IC que pueda ser implementado a un SMR que funcione mediante vehículos terrestres, la lógica de *interacción* del modelo IE no es suficiente, ya que, se dirige principalmente a la simulación de partículas. Por tanto, fue necesario traducirla al criterio de *locomoción* de los *Vehículos de Braitenberg* en el que los agentes se comportan como unidades robóticas sencillas. Estos robots, pueden trasladarse de forma autónoma en un entorno determinado, cuentan con dos sensores primitivos que tienen propiedades para medir estímulos externos, también con dos ruedas (cada una manejada por su propio motor) que funcionan como actuadores en su constitución (electric Bricks, 2010; Reas y Fry, 2007).

Los sensores son frontales y forman un circuito en el que la conexión es cruzada con respecto a los motores de las llantas, es decir, el sensor izquierdo se conecta con el motor derecho y viceversa. Al recibir estímulo el sensor izquierdo, activa el motor derecho y circula con giro a la izquierda; por otro lado, cuando el sensor derecho, activa el motor izquierdo y el robot gira a la derecha (Saavedra-Alcoba, Gutierrez-Callejas, y Enríquez-Paz, 2016).

Existen varios comportamientos con los que el vehículo puede ser condicionado, los cuales son: *miedo*, *agresión*, *amor* y *exploración*. Por ejemplo, cuando el robot es *temeroso* y el sensor se estimula con una fuente de luz, se dirige en línea recta hacia éste; si no es así, se queda quieto (Saavedra-Alcoba et al., 2016). Por otro lado, si es *explorador*, se alejará de la fuente de luz o le dará la espalda. La diversidad de comportamientos es determinada por el tipo de conexión existente entre los sensores y los motores: directa o cruzada, respuesta positiva o negativa (Figura 48).

Figura 48.

Vehículos de Braitenberg y sus comportamientos.



Nota. Recuperado de “*Vehicles: Experiments in synthetic psychology (9. print)*” por Braitenberg (2004), MIT Press.

El sistema odométrico (Figura 49) de los *Vehículos de Braitenberg* sigue una lógica matemática donde los robots pueden ser modelados de acuerdo con las coordenadas globales X-Y, que significan la ubicación del agente en las coordenadas cartesianas del espacio euclídeo, donde t es el tiempo y $Q(t)$ es el ángulo respecto al tiempo (orientación relativa al eje x). La velocidad lineal y angular son representadas mediante las siguientes ecuaciones de movimiento del robot (Saavedra-Alcoba et al., 2016) (Fórmula 7):

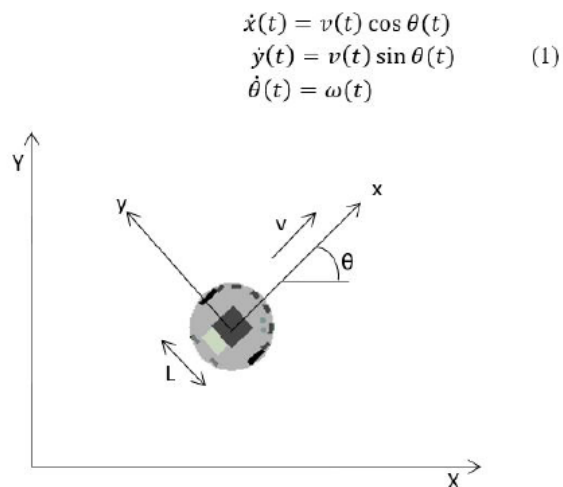
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= v(t) \cos \theta(t) \\ \dot{y}(t) &= v(t) \sin \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) &= \omega(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Esta ecuación se sujeta a la siguiente restricción no holonómica adicional (Fórmula 8):

$$\dot{x}(t) \sin \theta(t) - \dot{y}(t) \cos \theta(t) = 0 \quad (8)$$

Figura 49.

Sistema odométrico de los Vehículos de Braitenberg.



Nota. Recuperado de “Análisis de Comportamientos de Vehículos de Braitenberg para la búsqueda robótica usando El Robot LEGO EV3” (p.160), por Saavedra-Alcoba (2016).

4.3.2. Características.

El modelo de IC que se propone en esta investigación se encontró dirigido a un SMR terrestre, constituido por unidades robóticas reducidas en escala, que puedan ser transportadas a cualquier contexto, y que no requieran de un alto nivel de complejidad en su diseño, composición, construcción, programación, así como operación. Los *Vehículos de Braitenberg*, son ejemplares oportunos que cumplen con estas características. Cada unidad robótica por separado es un medio robótico endeble, que no tiene capacidad de manipular objetos constructivos de gran envergadura; sin embargo, a través de la multiplicidad, como sistema colectivo es capaz de superar los límites individuales que representa.

Un ejemplar contemporáneo de *Vehículo de Braitenberg*, que puede ser construido de manera personalizada en taller o laboratorio es el *robot que evita obstáculos*. Éste se encuentra constituido por los siguientes componentes (Tabla 7):

Tabla 7.

Ejemplar personalizado de Vehículo de Braitenberg: componente y características generales.

Componente	Tipo de componente	Función
Chasis de vehículo	▪ Cuerpo de unidad robótica	▪ Estructura en la que se montan todos los componentes de la unidad robótica. La sujeción es mediante tornillos y se encuentra constituido por múltiples orificios para realizar diferente composición de elementos estructurales y dispositivos.
Estructura	▪ Elementos estructurales	▪ Elementos estructurales montados sobre el chasis del vehículo. Brindan soporte a la unidad robótica. ▪ Se encuentra constituido por tornillos, tuercas y elementos metálicos.
Tarjeta microcontroladora (<i>Arduino UNO</i>)	▪ Componente electrónico.	▪ Circuito integrado digital central de la unidad robótica. Es un componente programable, cuenta una unidad central de proceso (CPU), con memoria RAM y ROM, así como líneas de entrada y salida periféricas. ▪ Representa el cerebro de la unidad robótica y su disposición es fundamental.
Tarjeta para el control de motores (<i>Motor Shield</i>)	▪ Componente electrónico	▪ Circuito integrado para el control de motores, cuenta con entradas y salidas periféricas.
Motorreductores	▪ Actuador electrónico	▪ Mecanismo con capacidad de regular velocidad de giro de un motor para que funcione con un ritmo determinado. Se encuentra constituido por una cadena de engranajes que aplican diferentes velocidades a la del motor.
Servomotor	▪ Actuador electrónico	▪ Motor que puede ubicarse en cualquier posición de su rango de operación, y de esta manera,

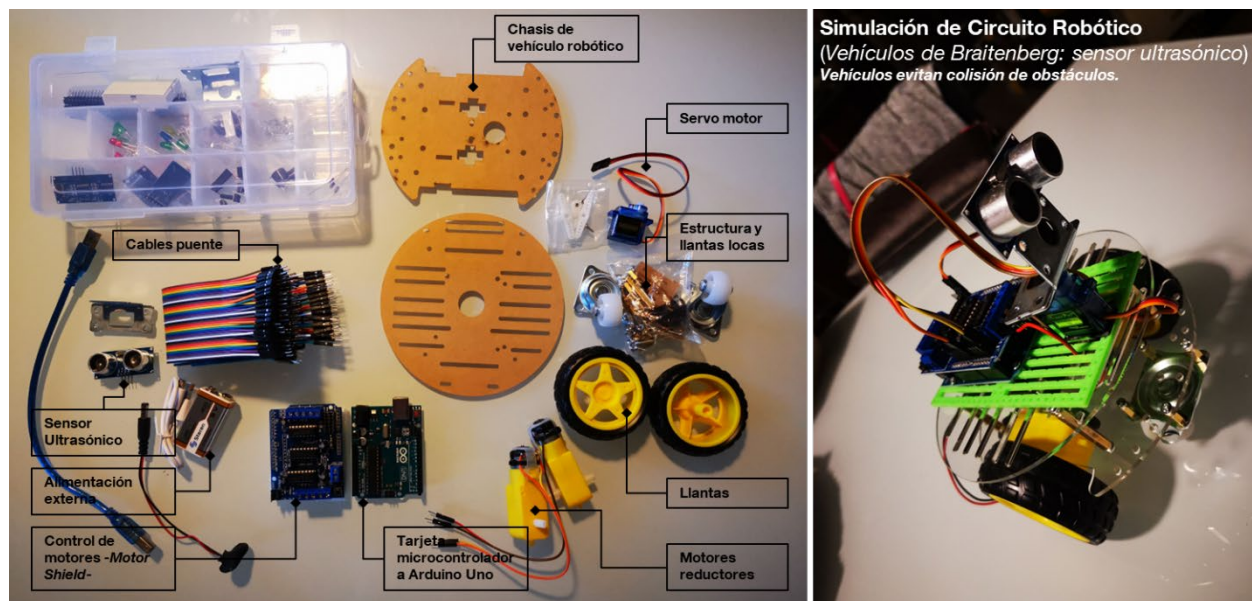
Componente	Tipo de componente	Función
Llanta	▪ Componente de movimiento	mantenerse estable en la posición. ▪ Componente controlado por los Motorreductores, permite el movimiento de la unidad robótica.
Llanta loca	▪ Componente de movimiento auxiliar	▪ Llanta pasiva, no se encuentra conectada a ningún motor y es auxiliar de apoyo y movimiento.
Baterías	▪ Alimentación externa	▪ Alimentación de energía externa para la unidad robótica.
Sensor ultrasónico	▪ Sensor electrónico	▪ Dispositivo para medir distancias a través de impulsos ultrasónicos. ▪ Puede ser controlado por el servomotor.
Cables puente	▪ Componente electrónico	▪ Transfiere energía e información entre todos los componentes electrónicos, sensores y actuadores de la unidad robótica.

Nota. Elaboración propia (2023).

Este ejemplar robótico de *Vehículo de Braitenberg*, puede ser complementado (o aumentado) por más sensores, componentes electrónicos, actuadores (como llantas, articulaciones o dispositivos de comunicación), así como manipuladores (como pinza, sujetador por succión, o cortador) de pequeña escala. A continuación, es mostrado el prototipo físico de este ejemplar y sus componentes (Figura 50).

Figura 50.

Robot que evita obstáculos: ejemplar físico de Vehículo de Braitenberg.



Nota. Elaboración propia (2023).

Este prototipo de *Vehículo de Braitenberg* fue construido como unidad, y tuvo el objetivo de conocer las necesidades y alcances que el robot tiene, sin embargo, no fue desarrollado físicamente el SMR completo. Ese alcance corresponde a la segunda fase de investigación de este trabajo, que se encuentra contemplado para trabajo futuro. Más información sobre la construcción de esta unidad robótica se encuentra en el apartado [3.13. Ampliación ciberfísica del modelo de Inteligencia Colectiva.](#)

4.3.3. Estrategias de aplicación.

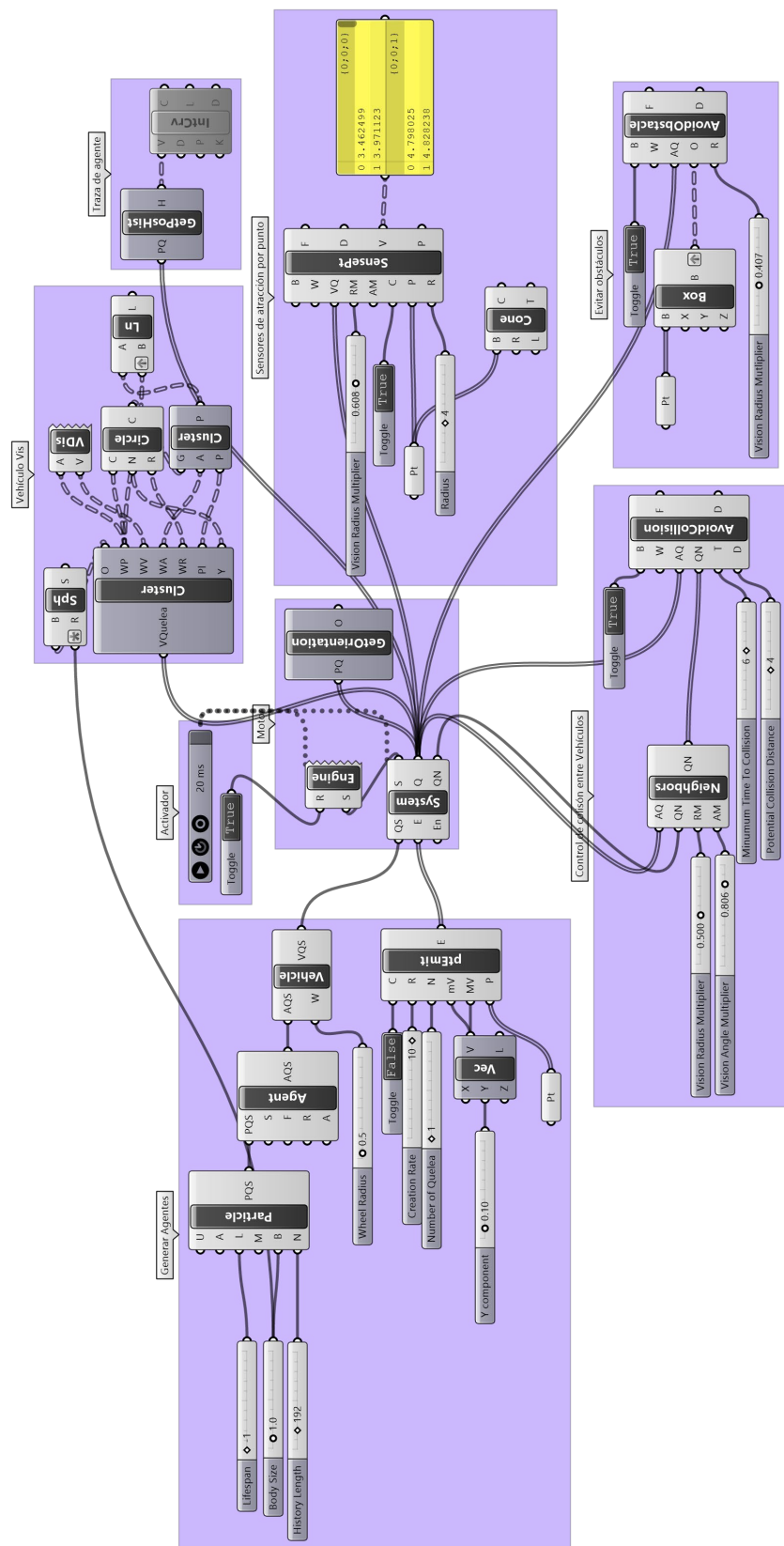
La hibridación de las metaheurísticas de *IE* y *Vehículos de Braitenberg* constituyeron los métodos algorítmicos que consolidaron el modelo de IC propuesto en esta investigación. Éstos integraron comportamientos de *Interacción* y *Locomoción*, con el objetivo de ejecutar un sistema de construcción automatizada robótica, colaborativa y distribuida.

El algoritmo base para la simulación Multi-Agente de esta integración se encuentra estructurado por un flujograma algorítmico (Figura 51) que se constituye por cuatro partes: (1) la construcción de los agentes como vehículos, el emisor de partículas y su entorno de interacción -

si se dispone- (lado izquierdo del algoritmo); (2) el controlador y motor del sistema Multi-Agente, así como el manipulador de comportamientos (parte central); (3) las funciones de visualización de los vehículos y el resultado topológico – geométrico del sistema (lado superior derecho), (4) el constructor y controlador de sensores para la atracción a objetivos y la repulsión hacia los obstáculos determinados (lado central e inferior derecho).

Figura 51.

Flujograma algorítmico base en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg mediante Quelea.



Nota. Elaboración propia (2023).

El resultado de ejecutar este algoritmo en tercera dimensión muestra la simulación de los agentes que representan a los *Vehículos de Braitenberg*, ahora con los comportamientos de *Interacción* traducidos a una lógica de *Locomoción* bajo el criterio de atracción a los conos (Figura 52). Cada agente (esfera) tiene un desenvolvimiento que considera el tamaño de las llantas representadas por un círculo que gira conforme avanza. También, muestra el vector de desplazamiento con flechas y los sensores que reconocen el entorno con dos cruces de color rojo.

Figura 52.

Simulación tridimensional realizada con el algoritmo para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg mediante Quelea.

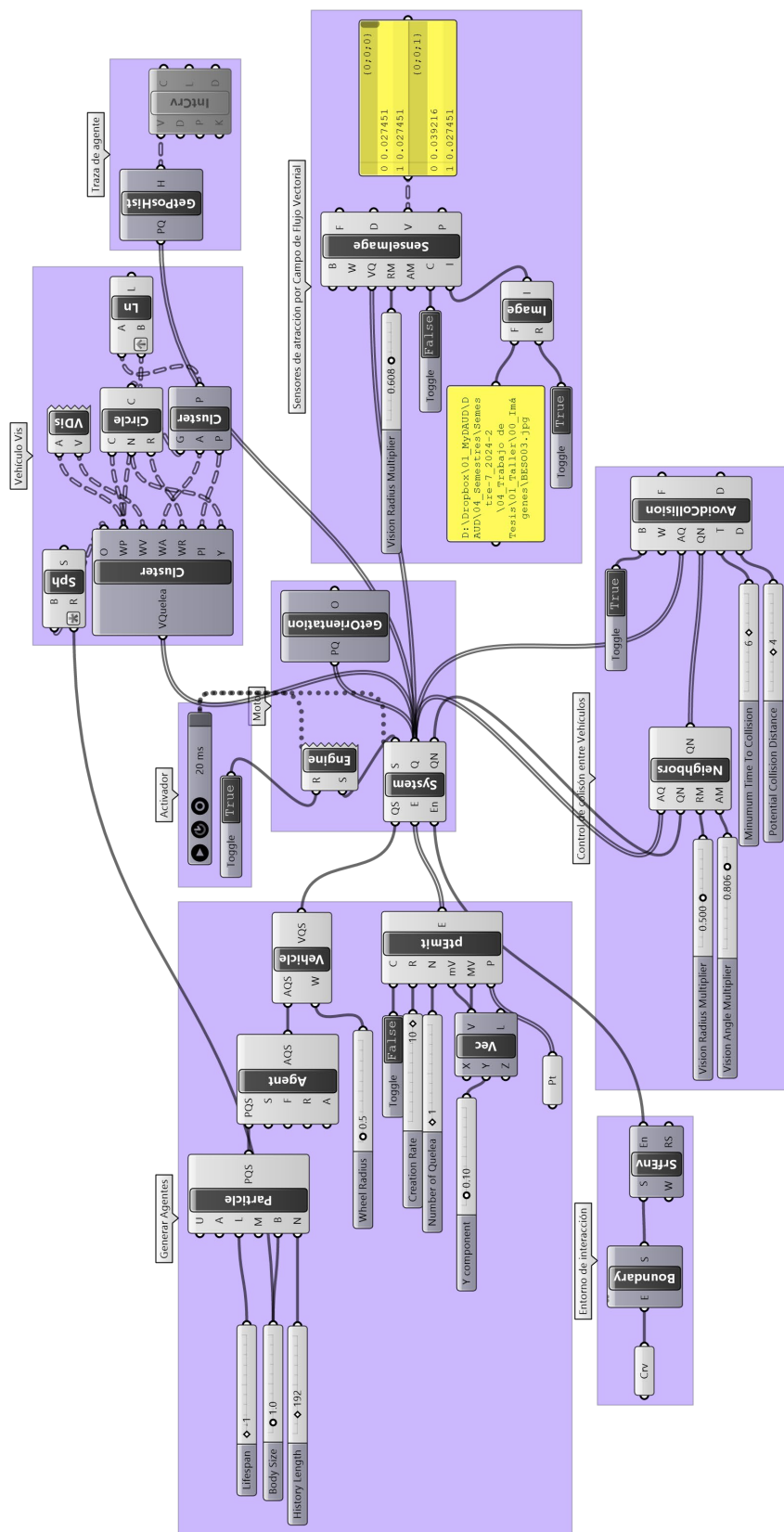


Nota. Elaboración propia (2023).

Para el reconocimiento del resultado, de la optimización topológica estructural en el sistema Multi-Agente anterior, fue necesario cambiar el sensor para puntos del algoritmo, por otro que verifique la imagen producto de la optimización FEM para que, de esta forma, pueda reconocer el campo de flujo vectorial que, a manera de ruido, conduce globalmente el recorrido de los agentes. También fue requerido establecer un entorno de superficie como espacio de interacción límite para la acción de los agentes (Figura 53).

Figura 53.

Flujograma algorítmico en Grasshopper para la simulación topológica Multi-Agente de Vehículos de Braitenberg con reconocimiento de campo de flujo vectorial mediante Quelea.



Nota. Elaboración propia (2023).

Para aplicaciones físicas del ejemplar de *Vehículo de Braitenberg* (robot que evita obstáculos) previamente descrito, el algoritmo inicial para el control de la unidad robótica fue con el lenguaje de programación C++, en el entorno de programación *Arduino IDE* para las tarjetas microcontroladoras marca *Arduino*. Esta programación fue dirigida al modelo UNO de *Arduino*, sólo contempla el comportamiento individual del robot y no la interacción colectiva de éstos (Algoritmo 7). Futuras investigaciones explorarán este proceso con la aplicación de la segunda fase del cuasiexperimento.

Algoritmo 7.

Algoritmo para el control de robot que evita obstáculos, como ejemplar de Vehículo de Braitenberg, desarrollado en el entorno de programación Arduino IDE (C++).

Código en Arduino IDE (C++)

```
#include <Servo.h>
#include <NewPing.h>
#include <AFMotor.h>

NewPing Dist(A0, A1, 200);
Servo myServo;

int distance = 0;
int distRight = 0;
int distLeft = 0;
boolean Booleano = false;

AF_DCMotor Motor3(3);
AF_DCMotor Motor4(4);

1: void setup() {
2:   myServo.attach(10);
3:   myServo.write(115);
4:   delay(1000);
5:   myServo.write(65);
6:   delay(500);
7:   myServo.write(160);
8:   delay(500);
9:   myServo.write(115);
10: }
11: void loop() {
12:   distance = tDistance();
13:   if(distance >= 25 && distance <= 250) {
```

Código en Arduino IDE (C++)

```
14:     gAhead();
15: }
16: else if(distance < 25) {
17:     brake();
18:     delay(150);
19:     reverse();
20:     delay(250);
21:     brake();
22:     delay(250);
23:     distRight = lookRight();
24:     delay(250);
25:     distLeft = lookLeft();
27:     delay(250);
28:     if(distRight >= distLeft) {
29:         turnRight();
30:         brake();
31:     }
32:     else if (distLeft >= distRight) {
33:         turnLeft();
34:         brake();
35:     }
36: }
37: }
38:
39: int lookRight() {
40:     myServo.write(60);
41:     delay(350);
42:     int distance = tDistance();
43:     return distance;
44: }
45: int lookLeft() {
46:     myServo.write(165);
47:     delay(350);
48:     int distance = tDistance();
49:     delay(50);
50:     myServo.write(115);
51:     return distance;
52: }
53: int tDistance() {
54:     delay(10);
55:     int distanceCM = dist.ping_cm();
56:     if(distanceCM <= 0 || distanceCM >= 250) {
57:         distanceCM = 250;
58:     }
59:     return distanceCM;
60: }
61: void brake() {
62:     Motor3.run(RELEASE);
63:     Motor4.run(RELEASE);
```

Código en Arduino IDE (C++)

```

64: }
65: void gAhead() {
66:   if(Booleano == false) {
67:     Booleano = true;
68:     Motor3.run(FORWARD);
69:     Motor4.run(FORWARD);
70:     velocityCtrl();
71:   }
72: }
73: void reverse() {
74:   Booleano = false;
75:   Motor3.run(BACKWARD);
76:   Motor4.run(BACKWARD);
77:   velocityCtrl();
78: }
79: void turnRight() {
80:   Motor3.run(FORWARD);
81:   Motor4.run(BACKWARD);
82:   delay(400);
83: }
84: void velocityCtrl() {
85:   for (int velocity = 0; velocity < 95; velocity +=2) {
86:     Motor3.setSpeed(velocity);
87:     Motor4.setSpeed(velocity);
88:     delay(3);
89:   }
90: }

```

Nota. Elaboración propia (2023).

4.4. Ampliación metaheurística del modelo de Inteligencia Colectiva para aplicación al Sistema Multi-Robótico

Para efectos de ampliar el sistema de comportamientos del modelo de IC desarrollado en este trabajo de investigación, es posible integrar el algoritmo de *Agregación* llamado *Termitas*, como estrategia para la disposición aditiva de material para la tarea de construir una sección representativa de EA con elementos discretos de madera.

Termitas es un modelo que simula el comportamiento autoorganizado de agregación de materia en conjuntos, tal como lo hacen las colonias de termitas. Los comportamientos que constituyen este algoritmo son: (1) *búsqueda*, (2) *aleatoriedad*, (3) *agregación*. El objetivo de

trabajar con este modelo es para integrarlo a la lógica de *Interacción y Locomoción dirigida* del modelo de *IE y Vehículos de Braitenberg*, y así desechar el comportamiento de *aleatoriedad* del algoritmo.

Este algoritmo, también corresponde al conjunto de lógicas *metaheurísticas de agentes autónomos* y fue propuesto y desarrollado por Mitchel Resnick (2002) en el libro llamado “*Turtles, termites, and traffic jams: explorations in massively parallel microworlds*” en 1994. Este sistema se desenvuelve en una retícula bidimensional donde un color representa espacio abierto y otro un pequeño trozo de madera (representado por un píxel en pantalla). La termita explora en espacio abierto hasta que encuentra un pedazo de madera, la recoge y sigue con la búsqueda hasta que encuentra otro trozo. Al encontrar este nuevo alimento, deja el anterior y se da la vuelta para continuar con la misma tarea. Al transcurrir el tiempo emergen múltiples pilas de madera acumuladas (Reas y Fry, 2007).

La dirección en la que se desplaza cada agente es determinada por pixeles en una retícula orientada con píxel norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste. Cuando la termita no tiene espacio enfrente y carga con un pedazo de madera, camina en reversa y se mueve un píxel en una nueva dirección. Cuando no carga un elemento de madera y se encuentra con uno, lo toma y sigue adelante (Reas y Fry, 2007). El algoritmo en el entorno *Processing (Java)*

(Algoritmo 8), es descrito a continuación:

Algoritmo 8.

Algoritmo de comportamiento de agregación mediante metaheurística Termitas, desarrollado en el entorno de programación Processing (Java).

Código en Processing (Java)

```
int[][] angles = {{0,1}, {1,1}, {1,0}, {1,-1}, {0,-1}, {-1,-1}, {-1,0}, {-1,1}};
int numAngles = angles.length;
int x, y, nx, ny;
int dir = 0;
```

Código en Processing (Java)

```

color black = color(0);
color white = color(255);

1: void setup() {
2:   size(100,100);
3:   background(255);
4:   x = width / 2;
5:   nx = x;
6:   y = height / 2;
7:   ny = y;
8:   float woodDensity = width * height * 0.5;
9:   for(int i = 0; i < woodDensity; i++) {
10:     int rx = int(random(width));
11:     int ry = int(random(height));
12:     set(rx, ry, black);
13:   }
14: }
15: void draw() {
16:   int rand = int(abs(random(-1,2)));
17:   dir = (dir = rand + numAngles) % numAngles;
18:   nx = (nx + angles[dir] [0] + width) % width;
19:   ny = (ny + angles[dir] [1] + height) % height;
20:   if ((get(x,y) == black) && (get(nx,ny) == white)) {
21:     set(x,y,white);
22:     set(nx,ny,black);
23:     x = nx;
24:     y = ny;
25:   }
26:   else if ((get(x,y) == black) && (get(nx,ny) == black)) {
27:     dir = (dir + (numAngles / 2)) % numAngles;
28:     x = (x + angles[dir] [0] + width) % width;
29:     y = (y + angles[dir] [1] + height) % height;
30:   }
31:   else {
32:     x = nx;
33:     y = ny;
34:   }
35:   nx = x;
36:   ny = y;
37: }

```

Nota. Recuperado de “*Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists*”

(p.473), por Reas y Fry (2007), The MIT Press.

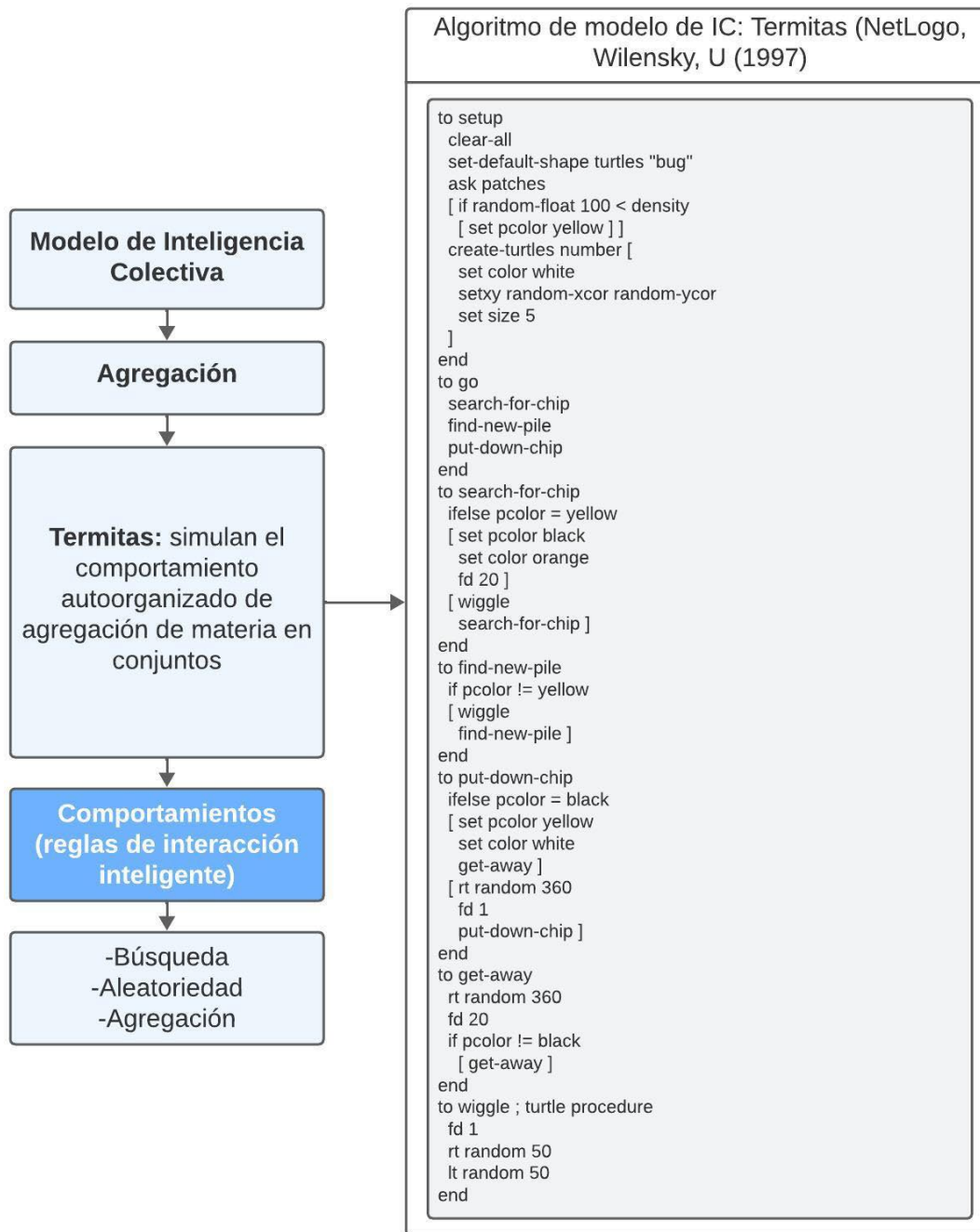
Este algoritmo también fue escrito por Uri Wilensky en 1997 en el lenguaje del simulador y modelador basado en agentes *NetLogo*. A continuación, es mostrado el algoritmo de *Termitas*

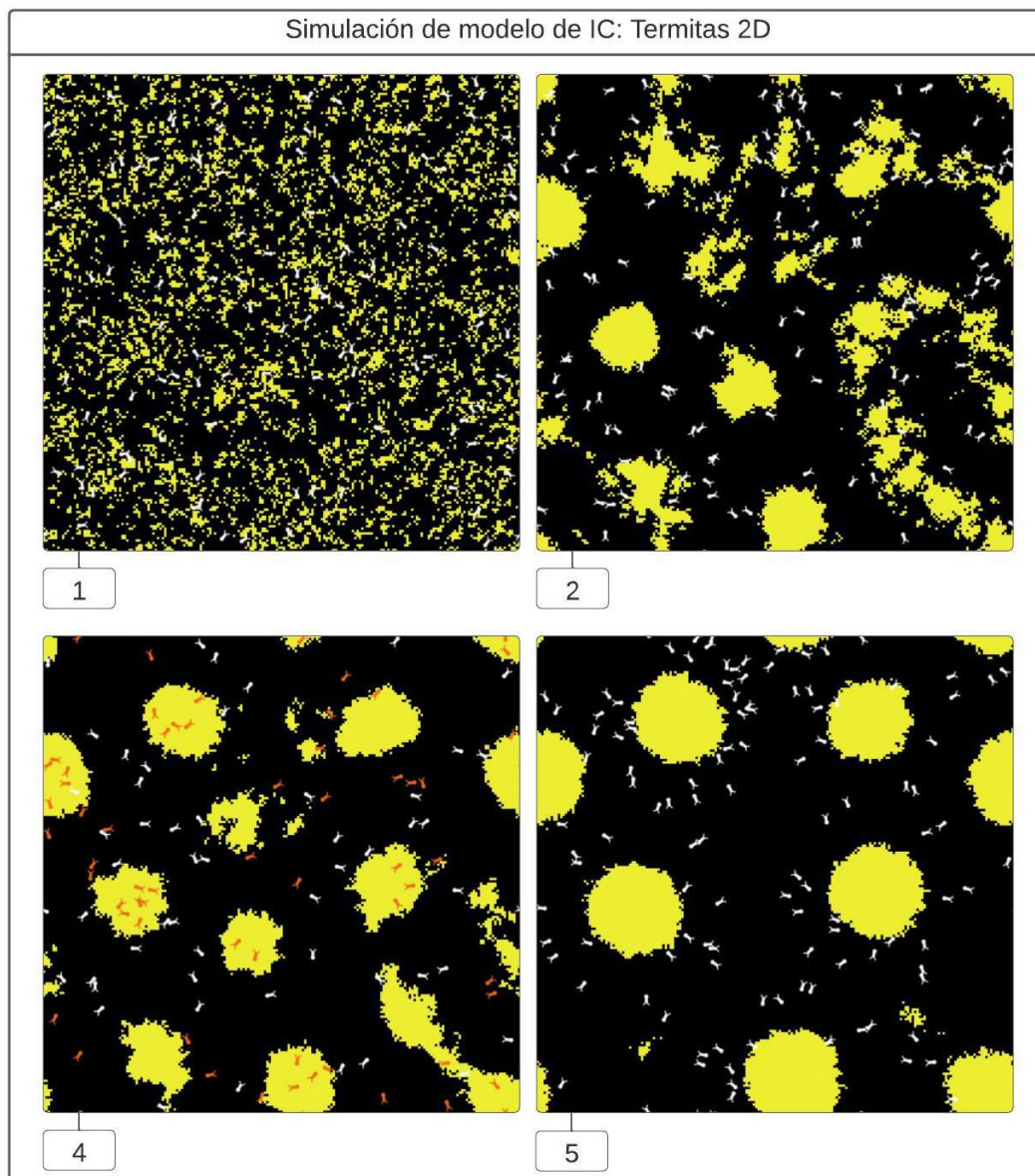
en este entorno (Figura 54a), así como el resultado, en dos dimensiones, de la simulación realizada a través de ser ejecutado (Figura 54b).

Figura 54.

(a) Algoritmo del modelo Termitas desarrollado por Uri Wilensky (1997) en NetLogo -arriba-.

(b) Resultado de la simulación bidimensional realizada por el algoritmo -abajo-.





Nota. Adaptado de “*NetLogo*”, Uri Wilensky (1997). Modificación por elaboración propia (2023).

La actuación de los agentes del algoritmo, bajo la lógica de *Agregación*, es una alternativa prometedora para integrar al modelo de IC, y de esta manera completar los comportamientos necesarios para que las unidades robóticas, con el implemento de los actuadores (motorreductor o servomotor) y manipuladores (articulaciones, pinzas o sujetador por succión) necesarios, puedan cargar elementos de pequeña escala de madera y transportarlos para fines de fabricación aditiva.

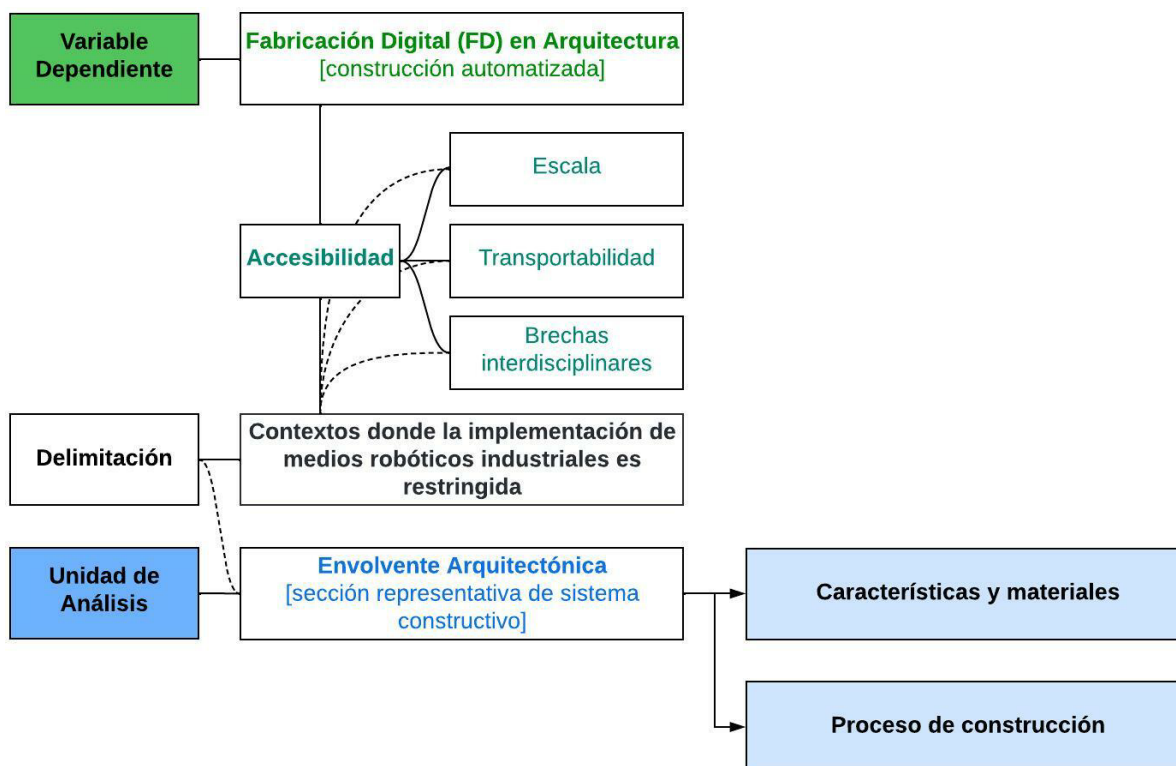
Por otro lado, también será necesario integrar en cada robot, dispositivos de comunicación que permitan enviar señales a nivel local para que cada agente reconozca si el resto lleva o no una carga de material para agregar, como una referencia bio-inspirada de la *estigmergia* con la que las sociedades de hormigas y termitas interactúan. Este mecanismo, es definido como la comunicación local indirecta entre los agentes y su entorno (Andreen et al., 2019) que determinan la interacción global emergente de una sociedad. Sin embargo, este desarrollo corresponde a la segunda etapa del estudio, el cual se propone como un trabajo futuro y como una ampliación a este sistema.

4.5. Envoltente Arquitectónica

El modelo IC aplicado sobre el SMR, se encuentra dirigido a la construcción automatizada de una sección representativa del sistema constructivo que consolidará una Envoltente Arquitectónica (EA), entendida como la unidad de análisis de la presente investigación. Ésta es descrita en este apartado a través de sus (1) *características y materiales* que lo consolidan y que, en conjunto, constituyen un sistema constructivo. También es explicado el (2) *proceso de construcción* del sistema con el objetivo de definir una guía que sirva para el correcto desenvolvimiento de las unidades robóticas en el proceso de construcción automatizada (Figura 55).

Figura 55.

Componentes explicativos de la Envoltente Arquitectónica (EA).



Nota. Elaboración propia (2022).

4.5.1. Características y materiales.

El diseño del Sistema Multi-Robótico (SMR) fue dirigido a la construcción de un sistema constructivo que permita ensamblar elementos discretos de madera, de forma seriada, de carácter endeble y de pequeña escala. En el alcance de esta investigación, no se desarrolla la estrategia de conexión entre elementos, sin embargo, visualiza pueda ser con uniones a base de material termoplástico (polímero) vaciado por deposición fundida, ya sea de forma manual o automatizada, a través de una futura integración de dispositivos actuadores en cada unidad robótica del sistema (ver apartado [3.3. Sistema Multi-Robótico](#) para detalles relacionados con sus características).

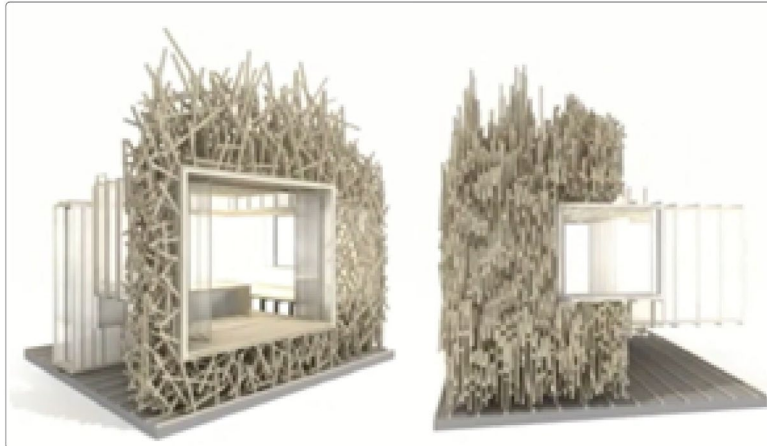
4.5.2. Proceso de construcción.

El ensamblaje múltiple y diferenciado de los elementos de madera, realizado colectivamente por el SMR, permiten generar una estructura orgánica enlazada y apilada que, en conjunto, consolida una capa de tejido horizontal y realizada en el suelo. En el momento que, el sistema finaliza una capa con trabajo automatizado, después manualmente es levantada y posicionada de forma vertical para ser adjuntada junto a otra capa ya terminada. Así, paulatinamente y de forma acumulativa es posible generar un desplazamiento volumétrico de material (Figura 56). La disposición horizontal de múltiples capas verticales permite desarrollar una EA que contempla la fabricación de muros (elementos verticales) que en algún punto se convierten en techos (elementos horizontales).

Esta estructura, constituida por tejidos de madera presenta un carácter constructivo semejante a un nido, en el cual, la estabilidad estructural se da por densidad de elementos endebles entrelazados (Figura 57). Las zonas que necesiten mayor capacidad de soporte de estrés estructural por peso requerirán de mayor densidad de elementos. La optimización topológica del modelo a fabricar será desarrollada por procedimientos de simulación computacional realizados con estrategias algorítmicas (ver apartados 3.2.1.6. Simulación tridimensional e interacción global de la Inteligencia de Enjambre, 3.3. Sistema Multi-Robótico y 3.4. Ampliación metaheurística del modelo de IC para aplicación al Sistema Multi-Robótico).

Figura 56.

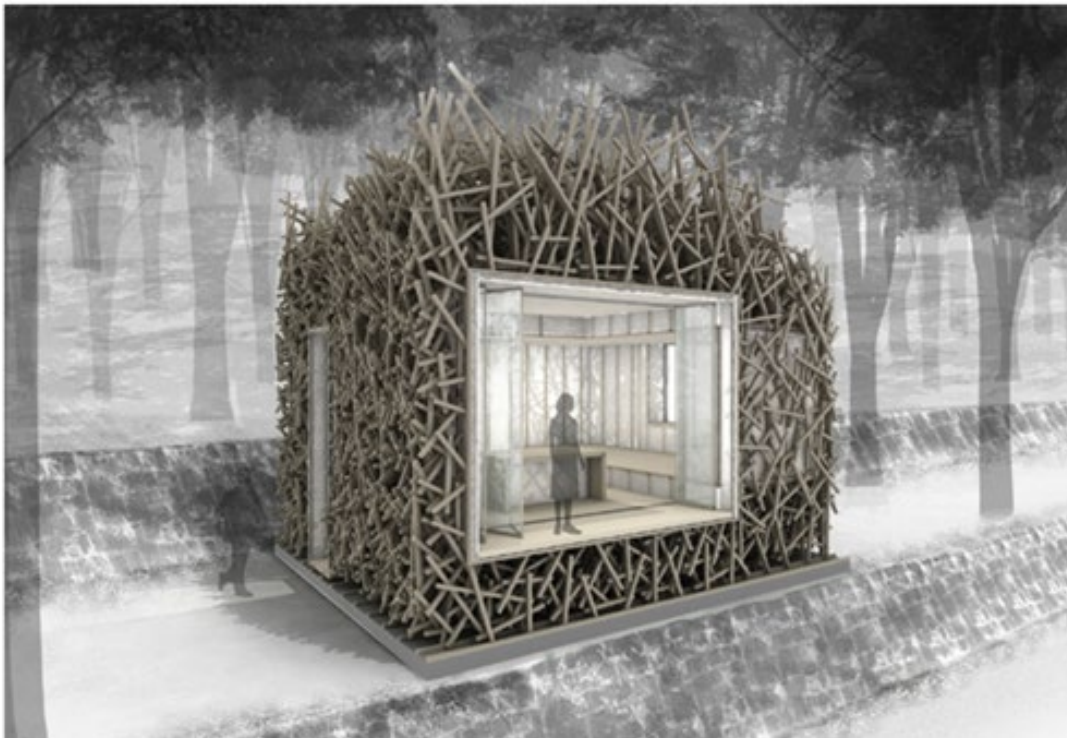
Ejemplo de sistema constructivo constituido por tejido denso de elementos de madera endebles.



Nota. La imagen muestra una estructura constituida por tejidos de elementos de madera endebles entrelazados (semejante a un nido de pájaro) apilados de forma seriada, la estabilidad estructural se da por densidad de elementos. Tomado de *Algorithmic Space [Bungalow]* (p. 21), por Shohei Mutsokawa et al., citado por Hwang (2006), Actar.

Figura 57.

Ejemplo de sistema constructivo constituido por tejido denso de elementos de madera endebles.



Nota. La imagen muestra una estructura constituida por tejidos de elementos de madera endebles entrelazados (semejante a un nido de pájaro) apilados de forma seriada, la estabilidad estructural se da por densidad de elementos. Tomado de *Algorithmic Space [Bungalow]* (p. 21), por Shohei Mutsokawa et al., citado por Hwang (2006), Actar.

4.6. Simulación del modelo de Inteligencia Colectiva

La realización del cuasiexperimento de investigación tuvo un alcance teórico y un carácter virtual a través de estrategias de simulación dinámica computacional que aplicaron métodos metaheurísticos de IA para emular los comportamientos de *Interacción*, *Locomoción* (primera fase) y *Agregación* (segunda fase) del SMR.

Dichos métodos metaheurísticos fueron de tipo poblacional (ver apartado [3.2.1. Diseño del Modelo](#)) y utilizaron estrategias basadas en algoritmos de IC (*Swarm Intelligence*) (Díaz López et al., 2016). Debido a que el SMR se encontró constituido por un conjunto de unidades robóticas terrestres, fue necesario generar el sistema de comportamientos que condicionen el desenvolvimiento del conjunto.

El desempeño del modelo de IC fue analizado mediante la ejecución de simulaciones computacionales del Modelo Basado en Agentes, realizadas con el entorno de programación visual (a) *Grasshopper* del programa CAD *Rhinoceros* (explicado en apartado [3.2.1.6. Simulación tridimensional e interacción global de la Inteligencia de Enjambre](#)), donde se desarrollaron los mecanismos de (a) *Interacción* y (b) *Locomoción* de partículas que emulan robots con características de *Vehículos de Braitenberg*. El modelo, puede ser ampliado con la integración del comportamiento de *Agregación*, de la metaheurística *Termitas* (ver apartado [3.4. Ampliación metaheurística del modelo de IC para aplicación al Sistema Multi-Robótico](#)) en futuras investigaciones.

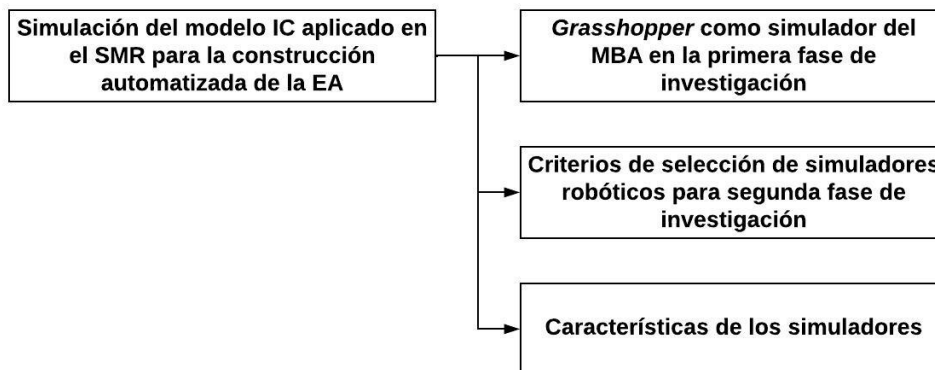
El proceso de validación se relacionó con la evaluación de las simulaciones metaheurísticas ejecutadas, con el fin de evaluar la (1) *reducción de escala* de las unidades robóticas, la (2) *efectividad (relación éxito-fracaso)* del Sistema Multi-Robótico (SMR), y la valoración del (3) *tiempo* que requirió para solventar las tareas inherentes de la construcción automatizada, mediante la correlación de los resultados de acuerdo con las condiciones de multiplicidad del sistema al momento de disponer material constructivo para la fabricación de la EA (ver apartado 3.8.1. Estrategia para la validación de desempeño del modelo para descripción a detalle).

Aunque la simulación del MBA fue realizada con procesos de programación visual en *Grasshopper*, futuras investigaciones requerirán traducir los algoritmos metaheurísticos desarrollados en la primera fase del estudio, a las lógicas de entornos y plataformas para la simulación robótica. El traslado a estos simuladores implicará traducciones de los comportamientos metaheurísticos a los esquemas de funcionamiento de los diversos sensores, actuadores y manipuladores robóticos.

En este sentido, fue necesario visualizar con anticipación, los simuladores que son oportunos para realizar esta migración en la segunda fase de esta investigación, y que tienen la flexibilidad para recibir estos algoritmos mediante módulos de programación textual basados en lenguajes como Python, C++ o C#. Esta evaluación de simuladores es descrita en este apartado, a través de los (1) *criterios de selección de simuladores robóticos para segunda fase de investigación*, y la descripción de las (2) *características de los simuladores* (Figura 58).

Figura 58.

Componentes explicativos de la simulación del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).



Nota. Elaboración propia (2022).

4.6.1. Criterios de selección de simuladores robóticos para segunda fase de investigación.

El presente apartado analiza los *simuladores* potenciales para ser seleccionados en la segunda fase de este trabajo de investigación. Esta información, será importante para futuros trabajos que extenderán el alcance del presente modelo de IC para la construcción automatizada de la EA. Los programas para la simulación robótica revisados fueron: (a) *RoBIM Automated Solutions for the Construction Industry*, (b) *SIEMENS Tecnomatix*, (c) *DS DELMIA*, (d) *Visual Components Robot Simulation Software*, (e) *ROBOTS for Grasshopper*, (f) *Webots: Open-Source Robot Simulator*, (g) *Unity: Robotic Simulation*. Para ver a detalle las *características* (*parámetros – variables de análisis y costos*), *aportaciones*, así como las *limitaciones* de los simuladores analizados, dirigirse al *Apéndice I* del presente documento (Tabla 28).

Los simuladores fueron analizados y evaluados bajo el criterio de que permitan la simulación y el diseño personalizado orientado a los Sistemas Multi-Robóticos (SMR) o Sistemas Robóticos Colectivos (SRC). Para los propósitos de la presente investigación, es importante que dichas plataformas de programación y simulación cumplan con características de ser (1) *gratuitos*, (2) *de uso libre*, y puedan trabajar con (3) *sistemas de robots múltiples* para

resolver un conjunto de tareas (4) *colectivamente* entre sí, y que permitan el (5) *diseño de cada unidad robótica* que constituye el conjunto (Figura 59).

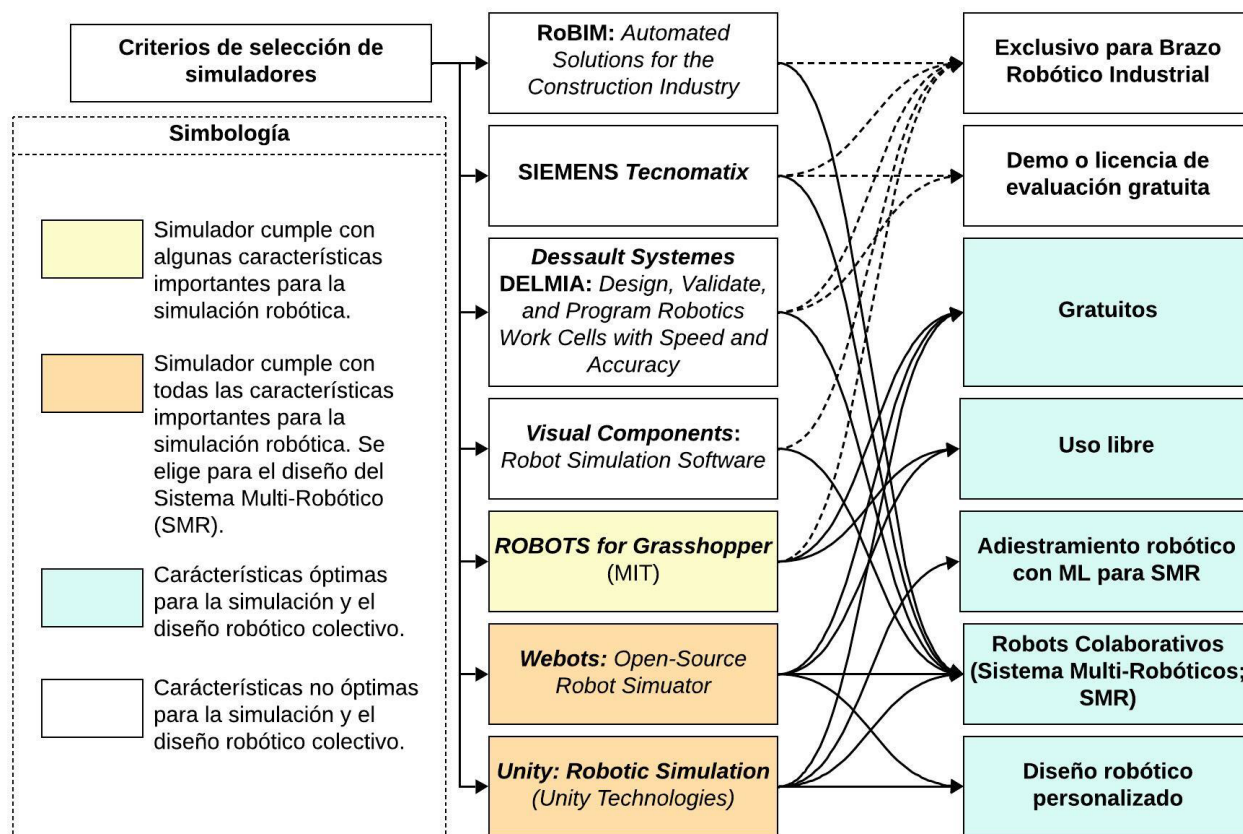
En este sentido, el simulador que es parte de la plataforma de programación (a) *Grasshopper* llamado (b) *ROBOTS* cumplió con las características de ser gratuito y de uso libre, sin embargo, el simulador es exclusivo para Brazos Robóticos Industriales (BRI). Aun así, aunque no aporta al desarrollo del SMR, permite tener acceso al catálogo de unidades de BRI utilizados por las universidades con mayor impacto en la robótica aplicada en la Arquitectura y la FD. Por tanto, es un referente que puede ser útil para investigaciones futuras.

Por otro lado, (c) *Webots: Open-Source Robot Simulator*, es un simulador que cumplió con todas las características óptimas requeridas para la simulación y diseño personalizado de sistemas robóticos, de tal manera que, este programa representa ser la principal plataforma que se utilizará para el desarrollo y simulación del SMR en la segunda fase de investigación. Destacan las características de ser gratuito y de uso libre, así como también, permitir diseñar las unidades robóticas con un módulo integrado de diseño robótico.

Por último, se encuentra (d) *Unity®: Robotic Simulation*, el cual, es un motor de videojuegos y programación multiplataforma que permite la creación y operación de contenido interactivo 3D en tiempo real. Esta plataforma es amplia y requiere de programación computacional especializada. Permite la simulación y el diseño personalizado del sistema robótico y cuenta con una herramienta de adiestramiento robótico mediante *Machine Learning* (ML). Debido estas características, esta plataforma será considerada en esta investigación como un soporte de programación y adiestramiento de IA avanzado para proyectos futuros.

Figura 59.

Criterios de selección de las plataformas de simulación robótica para el desarrollo de la segunda fase de investigación del modelo de Inteligencia Colectiva y el Sistema Multi-Robótico.



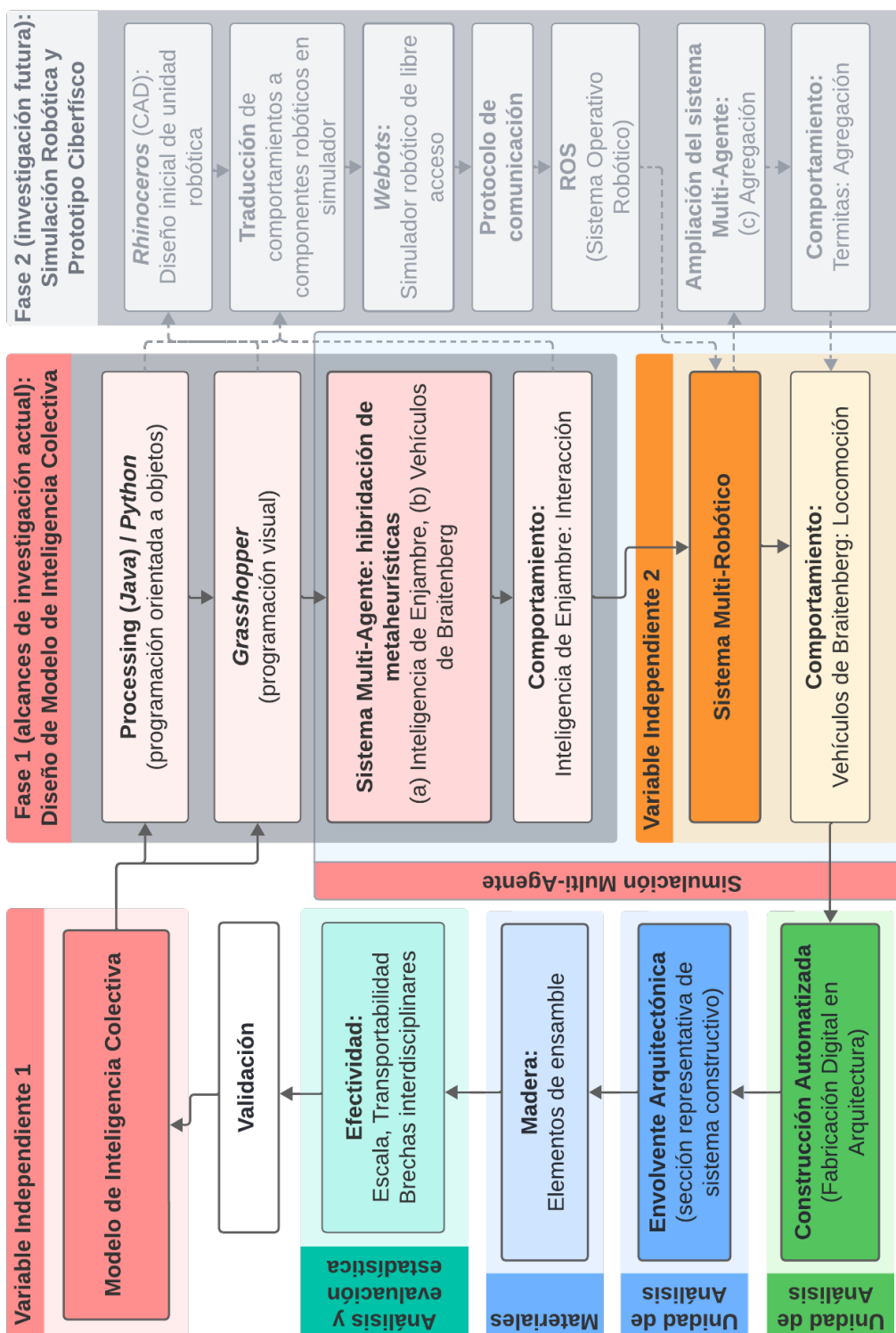
Nota. El diagrama relaciona las plataformas computacionales de simulación robótica, con las características óptimas requeridas para la simulación y diseño del SMR. Elaboración propia (2022).

4.7. Diseño general del cuasiexperimento

La descripción realizada en los apartados previos, desarrollaron en conjunto, un esquema que muestra el diseño general del cuasiexperimento del presente trabajo. Éste no presenta un carácter lineal en su desenvolvimiento, debido a que, la interacción de las variables es paralela y cruzada. También, el diseño tiene un comportamiento recursivo y retroalimentativo en su ejecución, lograda por la iteración cíclica de los grupos experimentales, con fines de optimización según sus resultados (Figura 60).

Figura 60.

Flujograma del diseño general del cuasiexperimento de la investigación.



Nota. Elaboración propia (2022).

El cuasiexperimento se desenvuelve con la relación de variables (independientes; IC y SMR, dependientes; FD), unidad de análisis (EA), evaluación desempeño y accesibilidad de todos sus componentes. De manera global, la *variable independiente 1*, que corresponde al modelo de IC, consolida un sistema Multi-Agente virtual en el que la integración de las lógicas metaheurísticas de *Inteligencia de Enjambre* (IE) y los *Vehículos de Braitenberg*, permiten generar un esquema en el que las partículas pueden desenvolverse en un entorno determinado, para trazar con su recorrido, la generación de elementos estructurales.

Este proceso, requirió del maquetado de los comportamientos de *Interacción y Locomoción* con programación textual con *Processing (Java)*. Después, estos códigos fueron traducidos al lenguaje de programación *Python* para poder ser trasladados a diferentes plataformas a futuro. Estos medios pueden ser programas de simulación robótica como *Webots* o *Unity: Robotic Simulation*. También, la lógica de este maquetado permitió comprender el mecanismo del Modelo Basado en Agentes (MBA) de *Quelea*, que es un complemento de la plataforma de programación visual *Grasshopper*.

Este sistema de *agentes autónomos* fue el mecanismo digital que determinó el funcionamiento del *Sistema Multi-Robótico* (SMR, *variable independiente 2*), el cual simula y puede condicionar a las unidades robóticas que lo constituirán. También, apoyaron al diseño personalizado de los robots y a la *unidad de análisis* que corresponde a la *Envolvente Arquitectónica* (EA).

El alcance del presente trabajo de investigación contempló sólo su *primera fase*, que es el desarrollo del sistema inteligente y digital de los agentes, como un punto de partida para posteriormente trasladar este mecanismo a los requerimientos *ciberfísicos* del SMR. La *segunda fase* de este trabajo visualiza la extensión del sistema propuesto al desarrollo físico, e incluye el

diseño de los prototipos robóticos, la traducción de los comportamientos del modelo a componentes robóticos simulados, el desarrollo de los protocolos de comunicación entre el modelo virtual y los agentes físicos, así como también, la intercomunicación entre las unidades robóticas. Dicho proceso, puede ser empaquetado dentro de un Sistema Operativo Robótico (ROS) para realizar integraciones multiplataforma.

También, en esta segunda fase, es posible ampliar el modelo de IC con la implementación del comportamiento de *Agregación*, bajo el esquema del algoritmo metaheurístico y bio-inspirado *Termitas*, a través del cual, los agentes pueden posicionar elementos de madera en un sistema de complejidad organizada con concentraciones distribuidas y descentralizadas de material constructivo. Esta ampliación, también es una referencia importante para determinar la intercomunicación entre robots mediante una lógica de *estigmergia*, que permite transmitir información localmente entre los agentes a manera de rastro, para consolidar un sistema global de interacción.

Todos estos mecanismos del modelo se enfocaron en procesos de construcción automatizada (Fabricación Digital; FD); por tanto, se consideraron en esta investigación como la *variable dependiente*. Estas afectaciones se manifiestan con el alcance de éxito obtenido al construir virtualmente la sección representativa de un sistema constructivo de la Envolverte Arquitectónica (EA) como *unidad de análisis*, y que se encuentra constituida por elementos discretos de madera.

Posteriormente, los resultados de la evaluación de efectividad del modelo fueron recolectados y analizados con instrumentos de evaluación diseñados en esta investigación (ver apartado 3.7. Diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos). Esta evaluación

consistió en el estudio causal de las variables que constituyen el cuasiexperimento, la validación del desempeño y los niveles de accesibilidad logrados por el SMR.

En los casos que no se pudo lograr, con el modelo de IC, un buen desempeño de construcción automatizada, el proceso metodológico permitió hacer una revisión de todos los elementos y fases que lo constituyen, con el fin de realizar los ajustes necesarios para lograr optimizar su comportamiento y su repercusión sobre toda la metodología, hasta obtener los resultados esperados por los objetivos de investigación del presente trabajo.

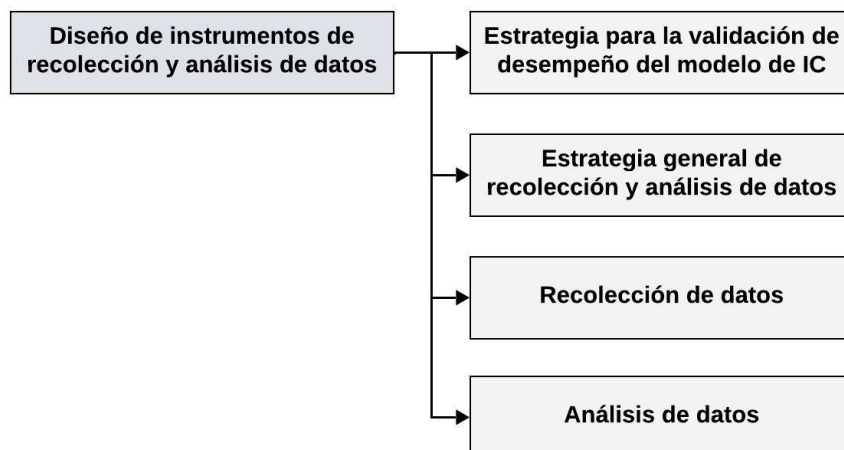
4.8. Diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos

Las variables de análisis específicas del modelo de Inteligencia Colectiva (IC), descritas en el apartado *3.2.2. Variables de análisis*, consistieron en la evaluación de los resultados obtenidos por las simulaciones computacionales del sistema Multi-Agente.

La evaluación requirió de una (1) *Estrategia para la validación de desempeño del modelo* de Inteligencia Colectiva para contrastar su efectividad de acuerdo con su *multiplicidad*; también, de una (2) *Estrategia general de recolección y análisis de datos*, para posteriormente diseñar un (3) *Instrumento de recolección*, y otro de (4) *Análisis de datos* resultantes de las simulaciones. Los siguientes subapartados describen cada uno de estos componentes (Figura 61).

Figura 61.

Componentes explicativos del diseño de instrumentos de recolección y análisis de datos.



Nota. Elaboración propia (2022).

4.8.1. Estrategia para la validación de desempeño del modelo.

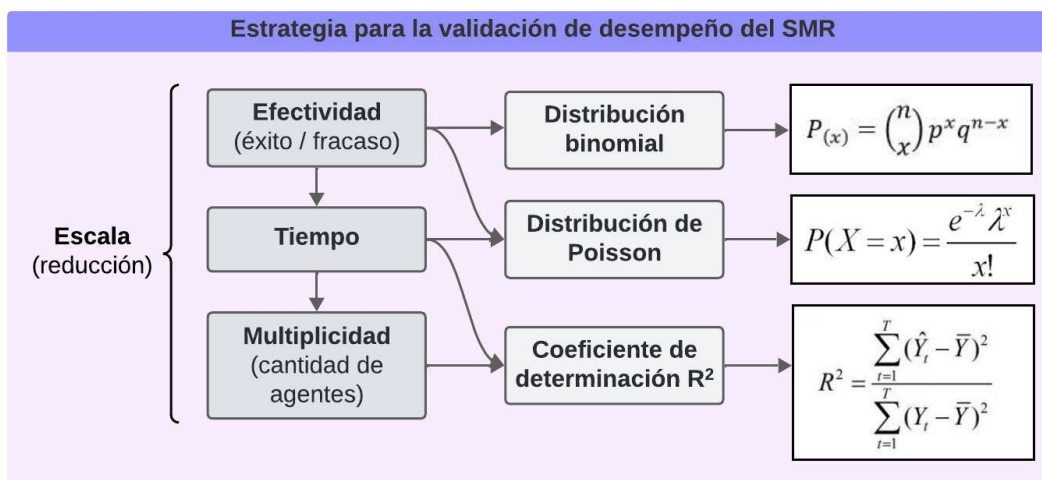
Las variables del modelo de IC, consistentes en (a) *multiplicidad* (b) *efectividad (relación éxito y fracaso)*, y (c) *tiempo de ejecución* (ver apartado [3.2.2. Variables de análisis](#)), requirieron de una evaluación correlacional inherente en la lógica causal del diseño del cuasiexperimento. Esta evaluación correspondió a la estrategia de validación del desempeño del Modelo de IC dirigido a un Sistema Multi-Robótico (SMR), y consideró la comparación de ensayos con respecto a la (1) *cantidad de agentes* dispuestos en el sistema, (2) *los éxitos y fracasos* de cada simulación ejecutada, así como (3) *el tiempo* en el que se desarrolla cada proceso (o ensayo). La relación de estas variables permitió estudiar la pertinencia de la *reducción de escala* del medio tecnológico al momento de construir, de forma automatizada, elementos arquitectónicos de gran escala.

La simulación del proceso automatizado de fabricación de la Envoltura Arquitectónica (EA) por el SMR (representado por la colaboración del sistema Multi-Agente), fue configurada en un entorno con las mismas condiciones y escenarios de ejecución predefinida. A partir del registro de estos resultados, fueron utilizadas estrategias estadísticas que sirvieron tanto para

describir el comportamiento de los agentes en el sistema, como para realizar los cálculos de probabilidad de éxito en las variables de análisis del modelo (Figura 62).

Figura 62.

Estrategias estadísticas para describir el desempeño de los agentes.



Nota. Elaboración propia (2022).

Para poder comprobar los éxitos y fracasos de las variables, fueron procesados los *datos cuantitativos* obtenidos para realizar *gráficas* que muestren las *frecuencias absolutas y relativas* de *efectividad, tiempo y multiplicidad* en el sistema. También, fue calculada la *probabilidad* de éxitos, el fracaso en el tiempo de producción, mediante *diagramas de dispersión múltiple* que permitieron verificar el *modelo matemático* que mejor se ajustó a la inferencia de desempeño del SMR con el *coeficiente de determinación R^2* y con la cantidad de agentes que lo constituyen. Este coeficiente se describe de la siguiente manera (Fórmula 9):

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

Por otro lado, la probabilidad de éxito o fracaso también fue analizada con la *distribución binomial y de Poisson*. La primera distribución, permite graficar la probabilidad de éxitos y fracasos por ensayos de producción, y la segunda con relación a intervalos de tiempo. La *distribución binomial* es definida como una ecuación de probabilidad discreta en donde p es la probabilidad de un éxito y q la probabilidad de fracaso en un solo ensayo; entonces la probabilidad de obtener x éxitos en n ensayos, está dada por la función de probabilidad $f(x) = P(x)$ (Gorgas García y Cardiel López, 2011). De esta manera, la distribución binomial se describe a través de la siguiente ecuación (Fórmula 10):

$$P_{(x)} = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} \quad (10)$$

En cambio, la *distribución de Poisson* es la probabilidad de la variable aleatoria discreta X en donde p es la probabilidad de x ocurrencias en un intervalo de tiempo, distancia, área, volumen u otro; y es resultante de la función de probabilidad $f(x) = P(x)$. Es necesario contar con el promedio o valor esperado λ y la base de los logaritmos naturales e (Gorgas García y Cardiel López, 2011). La distribución de Poisson se describe de la siguiente forma (Fórmula 11):

$$P(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (11)$$

4.8.2. Estrategia general de recolección y análisis de datos.

Para facilitar el trabajo de evaluación requerida por *estrategia para la validación de desempeño del modelo de Inteligencia Colectiva (IC)*, fue necesario diseñar los instrumentos de recolección y análisis de datos (Figura 63). Por tanto, la estrategia consideró el diseño de tres instrumentos que permitirán registrar y analizar la información resultante del cuasiexperimento:

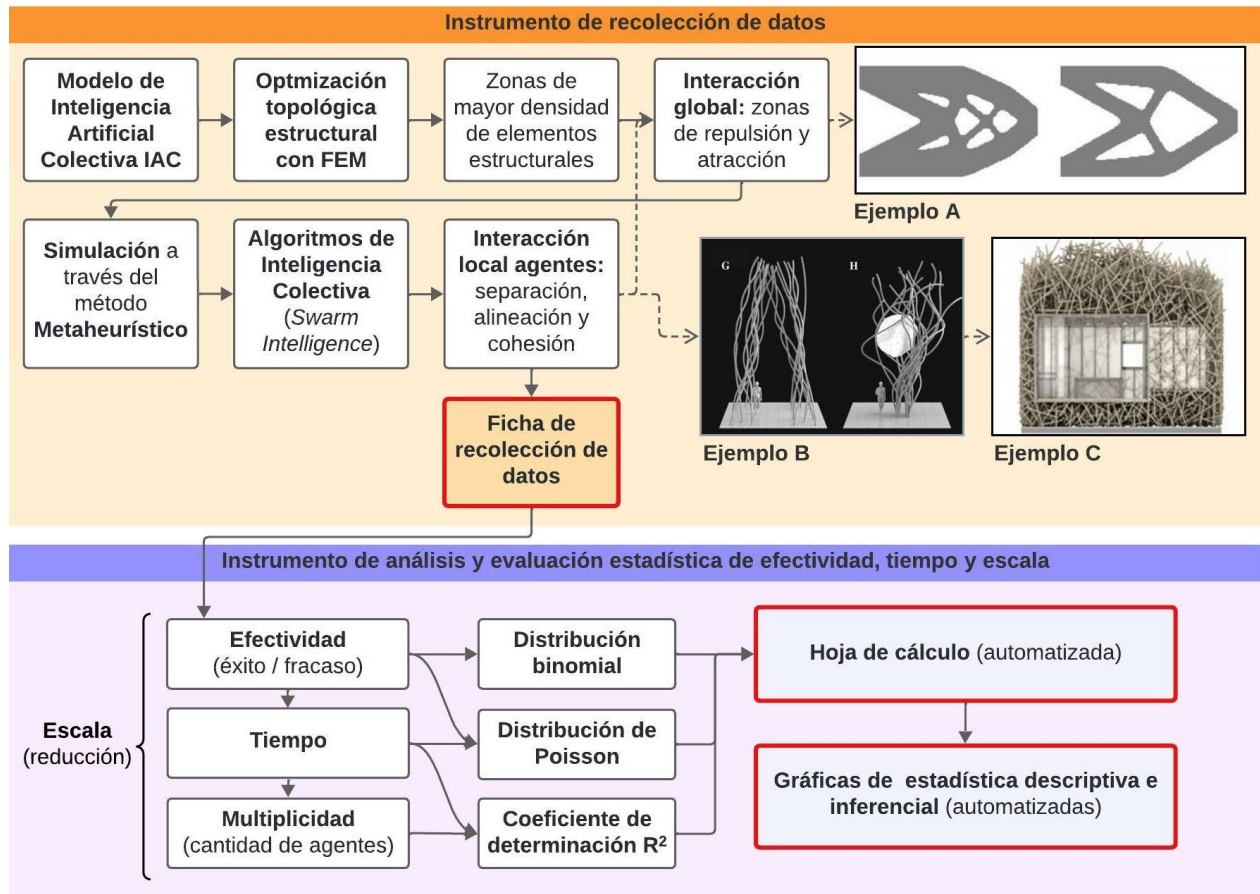
(1) *ficha de recolección de datos*, (2) *hoja de cálculo* (automatizada), y (3) *gráficas de estadística descriptiva e inferencial* (también automatizadas).

En este sentido, la ficha de recolección de datos fue el instrumento que sirvió para el registro de datos resultantes de cada simulación realizada con los *métodos metaheurísticos* que constituyen al modelo (ver apartado 3.2.3. Estrategia de aplicación), para optimizar el diseño formal y estructural de la Envolvente Arquitectónica (EA), así como para condicionar el comportamiento del SMR.

Por otro lado, la hoja de cálculo y las gráficas de estadística descriptiva e inferencial (automatizadas), fueron los instrumentos para el análisis y evaluación de las variables en cuestión. Así, en la hoja de cálculo fueron vaciados los registros de la ficha de recolección de datos, donde a través de una preconfiguración programada, fueron interrelacionados los datos para generar las gráficas de estadística (descriptiva e inferencial), que manifiestan la probabilidad correlacional del éxito y fracaso, con respecto a la cantidad de agentes en el sistema. Esta preconfiguración automatizada de los instrumentos permite actualizar las gráficas a partir de los cambios de datos introducidos en la hoja de cálculo.

Figura 63.

Estrategia general de recolección, análisis y evaluación de datos.



Ejemplo A: BESO Simulation Result, Bao et al. (2022); Ejemplo B: Fiberbots, Kayser et al. (2018); Ejemplo C: Algorithmic Space, Matsukawa (2006)

Nota. Imágenes adjuntadas en diagrama recuperadas de “SwarmBESO: Multi-agent and Evolutionary Computational Design based on the Principles of Structural Performance” (p.244), por Bao et al. (2021) (Ejemplo A); “Design of a multi-agent, fiber composite digital fabrication system” (p.6), por Kayser et al. (2018); “Algorithmic Space [Bungalow]” (p. 21), por Shohei Mutsokawa et al., citado por Hwang (2006), Actar. Diagrama por elaboración propia (2023).

4.8.3. Recolección de datos.

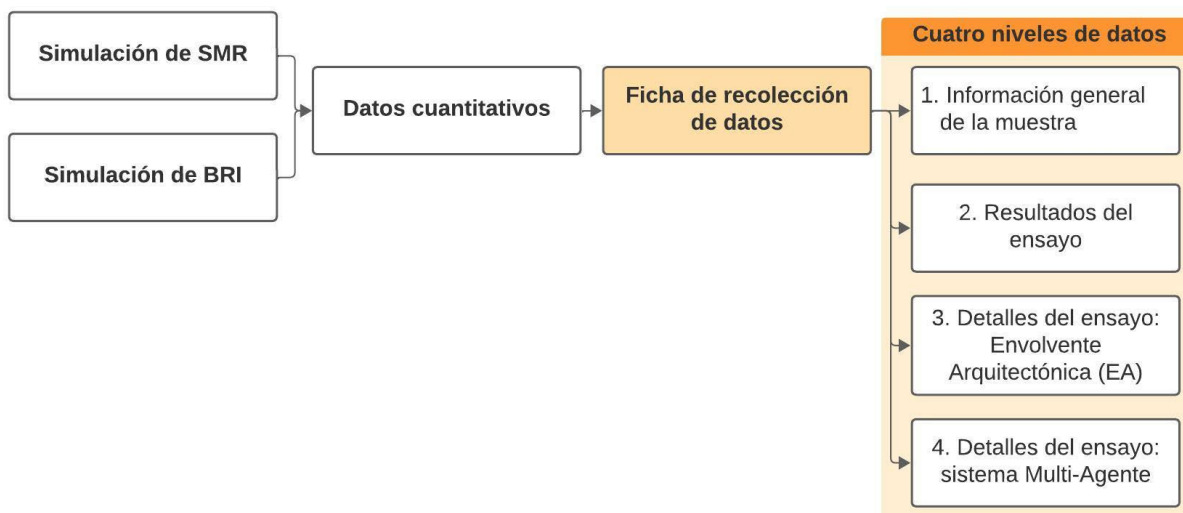
La recolección de datos resultantes, de las simulaciones a evaluar en este trabajo de investigación, fueron registradas en la ficha de recolección de datos, la cual, es representante de uno de los instrumentos de evaluación de las variables de *efectividad, tiempo y multiplicidad*.

Los datos registrados en este instrumento fueron de tipo cuantitativo y su diseño presenta un carácter estructurado en el que se desarrollan cuatro niveles para la recolección de información.

Estos niveles son: la (1) *información general de la muestra*, los (2) *resultados del ensayo*, los (3) *detalles del ensayo correspondientes a los elementos de la Envolvente Arquitectónica*, los (4) *detalles del ensayo referidos al sistema Multi-Agente* (Figura 64).

Figura 64.

Diseño del instrumento de recolección de datos: ficha de registro de información resultante del cuasiexperimento.




Nota. Elaboración propia (2022).


En esta investigación, una muestra fue equivalente a un conjunto de ensayos realizados en un intervalo definido de tipo temporal. La periodicidad de la muestra, por tanto, fue de una muestra por día (1 mu/día). Un ensayo fue igual a una simulación del sistema Multi-Agente (del modelo de IC). La ficha de recolección de datos fue realizada en formato de formulario de archivo PDF. En ella se encuentran configuradas casillas predefinidas para la ágil respuesta de los reactivos que corresponden a los cuatro niveles de información. Algunas casillas son de

respuesta textual numérica o alfanumérica, otras son de tipo condicional, así como las restantes, de tipo selectivo (Figura 65).


Figura 65.

Ficha de recolección de datos como instrumento de registro de información (página 1).





**ARQUITECTURA
URBANISMO Y DISEÑO**
MAESTRÍA Y DOCTORADO
"Investigación de frontera en diseño"




Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Arquitectura y Diseño
 Doctorado en Arquitectura Urbanismo y Diseño | Modelo Accesible de Inteligencia Colectiva para la
 Fabricación Automatizada de la Envolvente Arquitectónica

Ficha para análisis de efectividad de un Sistema Robótico
 Diseño: M.Arq. Aarón Tadeo Onchi Rascón | Versión: 002A

01	1. Información general de la muestra	
1.1. Etiqueta de muestra (índice)		1.2. Número de muestra
1.3. Fecha de ejecución		1.4. Número de ensayo
1.5. Cantidad global de muestras		1.6. Cantidad de ensayos por muestra
1.7. Periodicidad de muestra	Una muestra por día (1 mu/día)	
1.8. Definición de muestra	Una muestra equivale a un conjunto de ensayos realizados en un intervalo definido (temporal)	
1.9. Definición de ensayo	Un ensayo equivale a una simulación del modelo Multi-Agente de IC (representa a un Sistema Multi-Robótico; SMR) en el ejercicio de construir una sección representativa de la Envolvente Arquitectónica (EA)	

02	2. Resultados generales de ensayo	
2.1. Sistema Robótico:		
2.1.1. Sistema Multi-Robótico (SMR)		
2.2. Resultado general:		
2.2.1. Éxito	<input type="radio"/>	2.2.2. Fracaso <input type="radio"/>
2.3. Duración (h:min:seg):		
2.4. Cantidad de robots en el SMR		
2.5. Cantidad de elementos ensamblados esperados (constructivos)		

03	3. Detalles del ensayo: Envolvente Arquitectónica	
3.1. Cantidad de elementos exitosos		3.2. Cantidad de elementos no exitosos



Nota. Elaboración propia (2022).

El primer nivel de registro de datos obedeció a la *información general de la muestra*, en ésta fueron habilitados nueve reactivos: (1) etiqueta de muestra (índice), (2) número de la muestra, (3) fecha de ejecución, (4) número de ensayo, (5) cantidad global de muestras, (6) cantidad de ensayos por muestra, (7) periodicidad de muestra, (8) definición de muestra, y (9) definición de ensayo (Tabla 8).

Tabla 8.

Descripción de reactivos del primer nivel de registro de datos: información general de la muestra.

Reactivo	Descripción	Tipo de respuesta
1. Etiqueta de muestra (índice)	Es el índice que caracteriza la muestra (A, B, C, X, Y, etc.)	Textual alfanumérica
2. Número de la muestra	Es el número correspondiente a la muestra (1, 2, 3, 10, 20, etc.)	Textual numérica
3. Fecha de ejecución	Fecha en la que se realiza el ensayo.	Textual alfanumérica
4. Número de ensayo	Es el número correspondiente al ensayo (1, 2, 3, 10, 20, etc.)	Textual numérica
5. Cantidad global de muestras	Cantidad predefinida de muestras a realizar de forma global en el cuasiexperimento.	Textual numérica
6. Cantidad de ensayos por muestra	Cantidad predefinida de ensayos a realizar por muestra.	Textual numérica
7. Periodicidad de muestra	Define la periodicidad en la que se repite una muestra	Estática - descriptiva
8. Definición de muestra	Define el significado de muestra en el cuasiexperimento.	Estática - descriptiva
9. Definición de ensayo	Define el significado de ensayo en el cuasiexperimento.	Estática - descriptiva

Nota. Elaboración propia (2022).

El segundo nivel de registro de datos correspondió a los resultados generales del ensayo, en el cuál, fueron habilitados cinco reactivos: (1) Sistema Robótico (SR), (2) resultado general, (3) duración del ensayo, (4) cantidad de robots en el SMR, (5) cantidad de elementos ensamblados esperados (constructivos) (Tabla 9).

Tabla 9.

Descripción de reactivos del segundo nivel de registro de datos: resultados generales del ensayo.

Reactivo	Descripción	Tipo de respuesta
1. Sistema Robótico (SR)	Define el SR con el que se realizó el ensayo (SMR).	Estática - descriptiva
2. Resultado general	Define si el ensayo fue exitoso o un fracaso.	Condicional (éxito o fracaso)
3. Duración	Indica el tiempo que duró el ensayo	Textual alfanumérica
4. Cantidad de robots en el SMR	Indica la cantidad de unidades robóticas que constituyen el sistema Multi-Agente, que representa al SMR.	Textual numérica
5. Cantidad de elementos ensamblados esperados (constructivos)	Indica la cantidad de elementos constructivos esperados a ensamblar por el SR, para que se determine que la sección representativa de la EA construida fue exitosa.	Textual numérica

Nota. Elaboración propia (2022).

El tercer nivel de registro de datos fueron los detalles del ensayo referidos a la EA como la unidad de análisis de la investigación, en éste se habilitaron dos reactivos: (1) cantidad de elementos ensamblados (exitosos), (2) cantidad de elementos no ensamblados (fracasos) (Tabla 10).

Tabla 10.

Descripción de reactivos del tercer nivel de registro de datos: detalles del ensayo referidos a la Envolvente Arquitectónica (EA).

Reactivo	Descripción	Tipo de respuesta
1. Cantidad de elementos ensamblados (exitosos)	Indica la cantidad de elementos constructivos ensamblados de manera exitosa por el SR.	Textual alfanumérica
2. Cantidad de elementos no ensamblados (fracasos)	Indica la cantidad de elementos constructivos no ensamblados por el SR.	Textual alfanumérica

Nota. Elaboración propia (2022).

El cuarto nivel de registro de datos correspondió a los detalles del ensayo referidos al sistema Multi-Agente, en el cuál, fueron habilitados cinco reactivos: (1) falla en el modelo de IC, (2) cantidad de robots fallidos, (3) tipo de falla en el modelo de IC, (4) tipo de falla en el SMR, (5) Parámetros de configuración del sistema Multi-Agente (Tabla 11).

Tabla 11.

Descripción de reactivos del cuarto nivel de registro de datos: detalles del ensayo referidos al Sistema Robótico (SR).

Reactivo	Descripción	Tipo de respuesta
1. Falla en el modelo de IC	Indica si existió una falla en el modelo de IC durante la ejecución del ensayo.	Condicional (falso, verdadero)
2. Cantidad de robots fallidos	Indica la cantidad de robots fallidos en el proceso de construcción automatizada.	Textual numérica
3. Tipo de falla en el modelo de IC	Indica el tipo de falla en el modelo del IC.	Casilla selectiva entre cuatro posibles respuestas acumulables (<i>error de programación, error de parámetros, problema con la computadora, otro</i>).
4. Tipo de falla en el SMR	Indica el tipo de falla que sufrieron los componentes del SMR al momento de disponer elementos constructivos.	Casilla selectiva entre nueve posibles respuestas acumulables (<i>desvío, colisión, agentes sin movimiento, agentes desorientados, falla en sensores de los agentes</i>).
5. Parámetros de configuración del sistema Multi-Agente.	Configuración del sistema Multi-Agente, al momento de realizar la simulación	Textual alfanumérica

Nota. Elaboración propia (2022).

El quinto nivel correspondió a las observaciones que pueden surgir en el proceso de cada ensayo. El espacio es de tipo textual alfanumérico y puede establecerse cualquier nota necesaria que se observe en las simulaciones. Un aspecto importante que se registró en este apartado fue el tiempo en minutos decimales y el recuento específico de fallos en el modelo de IC y en el SMR, ya que las casillas del cuarto nivel sólo indican el tipo y no la cantidad de errores que sucedieron en cada uno de los ensayos (Figura 66).

Figura 66.

Ficha de recolección de datos como instrumento de registro de información (página 2).



04	4. Detalles del ensayo: Sistema Multi-Agente			
4.1. Falla en modelo de Inteligencia Colectiva (IC):				
4.1.1. Falso (0)	<input type="radio"/>	4.1.2. Verdadero (1)	<input type="radio"/>	
4.2. Cantidad de robots fallidos:				
4.3. Tipo de falla en modelo de IC:				
4.3.1. Error de programación	<input type="checkbox"/>	4.3.2. Error de parámetros	<input type="checkbox"/>	
4.3.3. Problema con computadora	<input type="checkbox"/>	4.3.4. Otro	<input type="checkbox"/>	
4.4. Tipo de falla en agentes del SMR:				
4.4.1. Desvío de ruta de agente(s)	<input type="checkbox"/>	4.4.2. Colisión de agente(s)	<input type="checkbox"/>	
4.4.3. Agente(s) sin movimiento	<input type="checkbox"/>	4.4.4. Agente(s) desorientados	<input type="checkbox"/>	
4.4.5. Falla en sensores de agente(s)	<input type="checkbox"/>			
4.5. Parámetros del sistema Multi-Agente:				
05	5. Observaciones del ensayo			
5.1.				



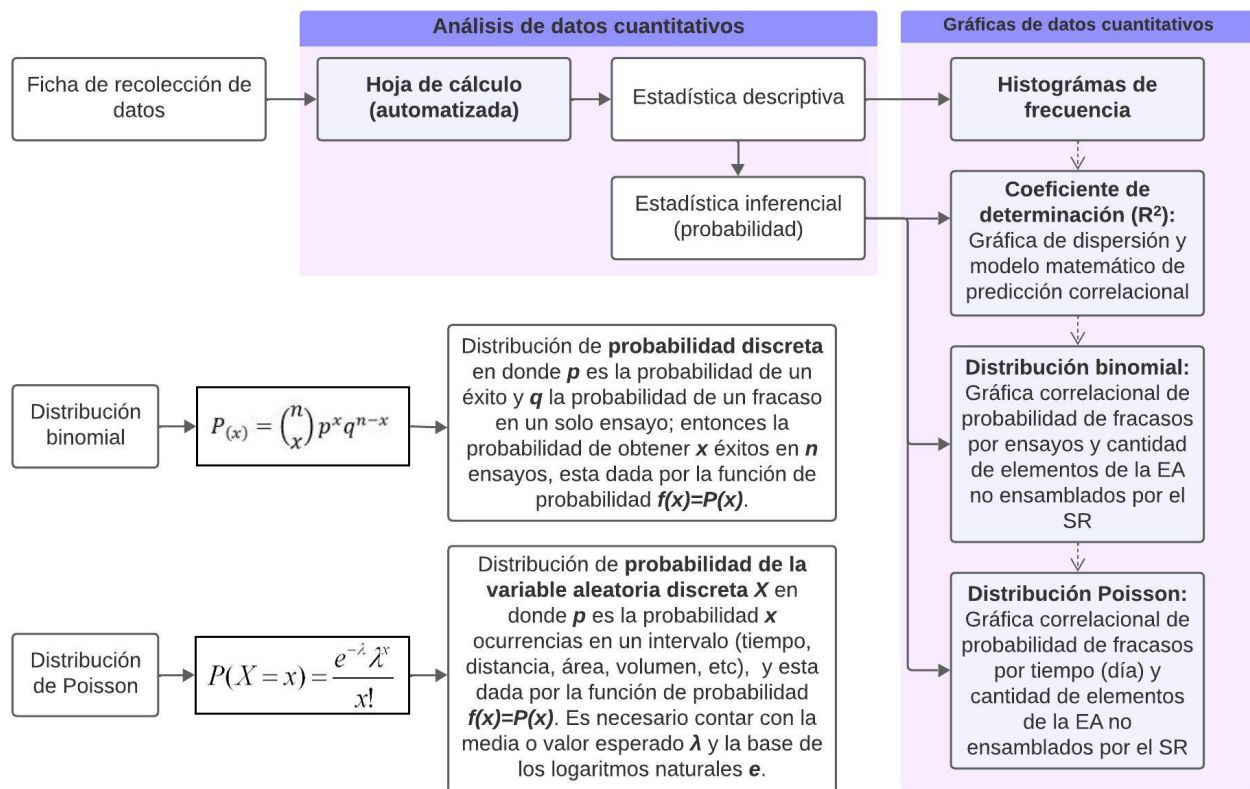
Nota. Elaboración propia (2022).

4.8.4. Análisis de datos.

La evaluación de los datos registrados en la ficha de recolección de datos, fueron analizados en una hoja de cálculo programada para la automatización de cálculos estadísticos descriptivos e inferenciales, a partir de la actualización o cambios en la información introducida. Esta hoja de cálculo es representante de los instrumentos de evaluación de las variables de efectividad, tiempo y multiplicidad, tiene un carácter cuantitativo y estructurado. También incluyó secciones programadas para automáticamente generar gráficas correlacionales descriptivas y de probabilidad entre las variables a estudiar (Figura 67).

Figura 67.

Diseño del instrumento de análisis y evaluación de datos: hoja de cálculo automatizada y gráficas de datos cuantitativos.



Nota. Elaboración propia (2022).

La hoja de cálculo fue programada para poder vaciar todos los reactivos de las fichas de recolección de datos en los cuatro niveles descritos en el apartado anterior. Cada archivo generado correspondió a una muestra, en la cual, se registró una cantidad determinada de ensayos (equivalentes en cada muestra) del modelo (Figura 68). También, la tabla fue programada para actualizar la información de acuerdo con los cambios de datos registrados en cada celda. Los colores de la celda automáticamente indican los niveles máximos y mínimos de los registros, así como, alertan sobre los éxitos, fracasos, falsos y verdaderos ocurridos en cada ensayo.

Figura 68.

Ejemplar de tabla de la hoja de cálculo automatizada para el vaciado de información registrada en las fichas de recolección de datos.



Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Arquitectura y Diseño
 Doctorado en Arquitectura Urbanismo y Diseño | Modelo Accesible de Inteligencia Artificial Colectiva
 para la Fabricación Automatizada de la Envolvente Arquitectónica

Hoja de cálculo para el análisis de efectividad de un Sistema Robótico (SR)

Diseño: M.Arq. Aarón Tadeo Onchi Rascón | Versión: 004A

Etiqueta de muestra	Número de Muestra	Fecha de ejecución	Cantidad global de muestras	Cantidad de ensayos por muestra	Muestras por día	Sistema robótico	Cantidad de robots en el SMR	Cantidad de elementos ensamblados esperados	Resultado general de muestra
A	1	14/04/2024	15	20	1	Sistema Multi-Robótico (SMR)	10	200	ÉXITO

No. Ensayo	Resultado General	Duración (hh:mm:ss)	Cantidad de elementos ensamblados	Cantidad de elementos no ensamblados	Falla en modelo de IC	Falla en SR (SMR)	Cantidad de robots fallidos	Observaciones
Ensayo 1	FRACASO	00:30:28	196	4	VERDADERO	VERDADERO	1	Texto
Ensayo 2	FRACASO	00:40:05	193	7	VERDADERO	VERDADERO	2	Texto
Ensayo 3	ÉXITO	01:02:03	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 4	ÉXITO	01:20:02	200	0	FALSO	VERDADERO	0	Texto
Ensayo 5	ÉXITO	01:40:05	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 6	ÉXITO	00:59:06	192	8	VERDADERO	VERDADERO	2	Texto
Ensayo 7	ÉXITO	00:59:58	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 8	ÉXITO	00:59:40	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 9	ÉXITO	01:10:10	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 10	ÉXITO	01:08:05	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 11	ÉXITO	01:12:15	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 12	ÉXITO	01:15:58	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 13	FRACASO	00:32:46	200	0	VERDADERO	VERDADERO	2	Texto
Ensayo 14	ÉXITO	01:07:33	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 15	ÉXITO	01:25:02	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 16	ÉXITO	01:10:15	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 17	ÉXITO	01:02:57	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 18	ÉXITO	01:05:42	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 19	ÉXITO	01:09:25	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Ensayo 20	ÉXITO	01:20:32	200	0	FALSO	FALSO	0	Texto
Promedios		01:05:36	199.05	0.95			0.35	
Total de ensayos								20

Nota. Elaboración propia (2022).

Las gráficas de análisis estadístico generadas por la hoja de cálculo, incluyeron (a) *histogramas de frecuencia absoluta y relativas* de las variables de efectividad (éxito, fracaso), tiempo de acuerdo a la cantidad de agentes; también, (b) *gráficas de dispersión* para encontrar el

modelo matemático que mejor ajuste para predicción correlacional mediante el *coeficiente de determinación R^2* , (c) *gráficas correlacionales de probabilidad* de éxito y fracasos por ensayo a través de la *distribución binomial*, y finalmente, (d) *gráficas de probabilidad* de éxito y fracasos por intervalos de tiempo (una muestra por día) con la *distribución de Poisson*.

Aparte de graficar la *frecuencia relativa* de efectividad, también fue mostrada la *frecuencia absoluta* de duración de los ensayos exitosos en una muestra con *gráficas de dispersión*, el objetivo fue correlacionar los ensayos con respecto a su duración en minutos decimales en una muestra. Las *gráficas de distribución binomial* tuvieron el objetivo estudiar la probabilidad de fracaso de los agentes en cada ensayo (de la muestra) mediante *histogramas de frecuencia*. Para analizar la *distribución binomial acumulada*, el tipo de gráfica utilizada fue la de *dispersión*.

Con respecto al estudio de probabilidad de elementos constructivos (material) dispuestos de manera fallida por los agentes en cada ensayo, fue trabajada la *distribución de Poisson*, debido a la gran cantidad de elementos manejados en cada ensayo y la baja cantidad de errores que surgen en cada proceso. De la misma manera, fueron utilizados *histogramas de frecuencia* y *gráficas de dispersión* para las *distribuciones acumuladas*.

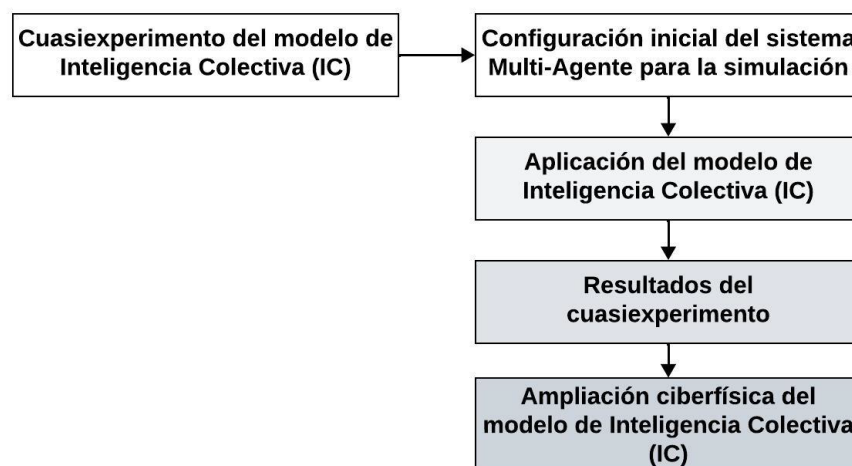
5. CAPÍTULO V. CUASIEXPERIMENTO DEL MODELO DE INTELIGENCIA COLECTIVA

Como respuesta al tercer objetivo particular de investigación, el cual consiste en evaluar las capacidades de automatización del modelo de Inteligencia Colectiva (IC) y las propiedades de accesibilidad del medio robótico para la Fabricación Digital (FD) de la Envolvente Arquitectónica (EA), el presente capítulo expone la ejecución del cuasiexperimento, bajo los lineamientos marcados por la previa metodología. Este objetivo, surge como consecuencia de la tercera pregunta secundaria de investigación: ¿En qué circunstancias puede ser implementado un modelo de IC para la construcción automatizada de la EA?

Por tanto, en los siguientes subapartados, serán descritas las fases en las que el cuasiexperimento fue aplicado, así como los resultados obtenidos a través de los procesos de recolección y análisis de datos (Figura 69). De esta manera, el capítulo se encuentra conformado por la siguiente estructura de contenido: (1) Configuración inicial del sistema Multi-Agente para la simulación, (2) Aplicación del modelo de Inteligencia Colectiva, (3) Resultados del cuasiexperimento, (4) Ampliación ciberfísica del modelo de Inteligencia Colectiva.

Figura 69.

Estructura de contenido del cuasiexperimento del modelo de Inteligencia Colectiva (IC).



Nota. Elaboración propia (2023)

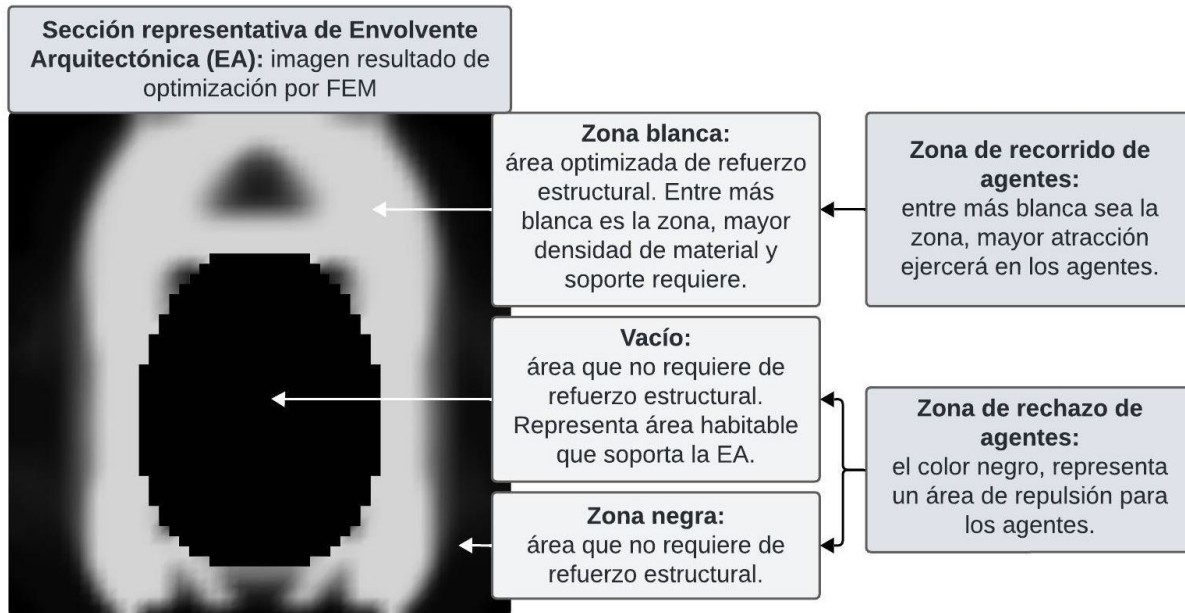
5.1. Configuración inicial del sistema Multi-Agente para la simulación

El sistema Multi-Agente es el motor del modelo de IC descrito en el capítulo de *Metodología* y desarrollado en esta investigación. La configuración inicial de este sistema inició con la ejecución de la simulación del algoritmo para la optimización topológica estructural mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). El resultado de este análisis sirvió para determinar las zonas donde las unidades robóticas (representadas por agentes virtuales) deben establecer sus rutas de recorrido, para de esta manera, disponer el material que van a agregar.

Por tanto, la simulación generó como respuesta una imagen que representa una sección representativa de la EA y señala, con color blanco y negro, las zonas de recorrido y densidad de disposición de material (Figura 70). La zona de color blanco da forma a una topología estructural optimizada, la cual, indica el área de refuerzo dirigida a una carga determinada que, transfiere su energía a una zona de soporte. Esta área, es una atracción para los agentes, de tal manera que, entre más blanca sea la zona mayor atracción ejercerá sobre éstos, por tanto, mayor será la probabilidad de su recorrido y agregación de material. Por otro lado, las zonas de color negro indican el área que no requiere refuerzo estructural y por donde los agentes no deben pasar. También, es posible determinar un vacío (color negro) que interpreta la zona habitable que soporta la sección representativa.

Figura 70.

Componentes de imagen resultante de la simulación para la optimización topológica estructural realizada por el algoritmo FEM.



Nota. Elaboración propia (2024).

Este resultado, es el punto de partida para generar el espacio de interacción del sistema Multi-Agente, ya que representa el *entorno virtual de desenvolvimiento* y los límites de trabajo de las unidades robóticas en el suelo. Este espacio, es un área controlada donde los agentes no tienen obstáculos (ni interferencias) más que los determinados en el cuasiexperimento. Una vez configurado el entorno de trabajo del sistema, fue necesario configurar los componentes del algoritmo que lo constituye para proceder con la simulación. La evaluación del cuasiexperimento contempla la correlación de efectividad con respecto a la multiplicidad del Sistema Multi-Robótico. Para lograr este objetivo, fue configurado el algoritmo para comparar ejecuciones con *diez, quince y veinte* agentes (unidades robóticas).

En términos generales, cada *simulación* correspondió a un *ensayo* para que los agentes hagan los recorridos de agregación de material a través del *entorno de virtual de desenvolvimiento*. Fue desarrollada una *política de interacción* para los agentes, con el fin de generar las pautas de referencia para la evaluación comparativa de desempeño y multiplicidad del sistema. La política incluyó condiciones de *tiempo, recorrido y disposición de material* para

determinar si el ensayo fue exitoso o fallido. Al terminar cada simulación, fue registrada la información resultante en la *ficha de recolección de datos*.

Fueron contemplados *veinte* ensayos por cada *muestra*, la cual, es equivalente a un día de simulaciones. Una muestra correspondió al conjunto de ensayos con *diez agentes*, otra para *quince*, y finalmente, otra para *veinte*. Las relaciones comparativas de éxito entre los ensayos (y las muestras) consideraron como referencia la tasa del intervalo de confianza del 0.95 (95%) establecida por la estadística. Es decir, los eventos serían considerados estadísticamente significativos cuando los valores resultantes P sean menores que su nivel de significación 0.05 (5%) (Triola, 2006).

Por ejemplo, como en las simulaciones los desvíos de ruta de los agentes implican la disposición errónea de material constructivo en el sistema, se espera que la tasa de desvío de las unidades robóticas sobre la ruta optimizada del *entorno virtual de desenvolvimiento* sea menor del 5%. Es importante aclarar que, aunque esta proporción no se refiere a una magnitud poblacional por cada evento, sino a una tasa de probabilidad global, en este cuasiexperimento fue tomada como referencia para establecer límites en la política de fallo por parte de cada agente. También, es relevante considerar que el sistema Multi-Agente es complejo y se encuentra constituido por múltiples variables interrelacionadas, de tal manera que, la probabilidad de superar el nivel de significación puede ser alto.

A partir de la ejecución de todas las muestras y la recolección de información en las fichas, fueron vaciados todos los datos en la hoja de cálculo automatizada para que se generaran las gráficas de análisis, y así se interpretaran los resultados. A continuación, es descrita con más detalle cada una de las partes de este proceso.

5.1.1. Configuración del algoritmo para la optimización topológica estructural con el Método de Elementos Finitos.

El algoritmo para la optimización topológica estructural mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), primeramente, se encontró constituido por las variables (o función) y parámetros que consolidaron los elementos que entran en juego para realizar el análisis. Éstas fueron: (1) el elemento que funciona como soporte en el sistema estructura, luego (2) el área de análisis (bidimensional), (3) el vacío (opcional) que entra en juego en el análisis, y (4) la carga que el elemento estructural debe soportar. En este orden de variables, los parámetros determinados en el algoritmo fueron (Tabla 12):

Tabla 12.

Parámetros iniciales establecidos en las variables del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
1. Soporte	2 m x 0.8 m	NA	Elemento estructural de soporte, representado por una sección rectangular. El primer parámetro interpreta el largo y el segundo la altura de la sección.
2. Área de análisis	4 m x 4 m	NA	Representa el área de análisis del sistema estructural. El primer parámetro interpreta el largo y el segundo la altura de la sección.
3. Vacío (opcional)	2 m x 2.5 m	NA	Elemento opcional que representa un vacío en el sistema estructural. La simulación no considera esta superficie para realizar el análisis. El ejemplar utilizado tuvo forma de sección elipsoide. El primer parámetro interpreta el largo y el segundo la altura de la sección.
4. Carga	2 m x 0.8 m	▪ Carga: 2160 N/m ²	Elemento de carga que debe soportar el sistema estructural. Fue representado mediante una sección rectangular con una carga en N/m ² como parámetro secundario. El primer parámetro interpreta el largo y el segundo la altura de la sección.

Nota. Elaboración propia (2024).

Posterior a la determinación anterior, siguieron las variables y parámetros centrales del algoritmo, que fueron: (5) el motor de optimización topológica en dos dimensiones, y (6) el solucionador de la simulación. Los parámetros que fueron establecidos en estos motores fueron (Tabla 13):

Tabla 13.

Parámetros centrales establecidos en las variables de los motores de simulación del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
5. Motor de optimización topológica (2D)	Resultado de variables iniciales del algoritmo	▪ Eje X: 50 celdas	Motor que determina el método de análisis que realizará el algoritmo. Fue elegida optimización topológica 2D. Como parámetro primario necesita el resultado de las variables iniciales. El parámetro secundario requiere la cantidad de celdas en el eje X de la retícula de análisis.
6. Solucionador de la simulación	Resultado del motor de optimización topológica (2D)	▪ Iteraciones de optimización: 5 ▪ Densidad de objetivo: 0.332	Motor solucionador del Método de Elementos Finitos. Como parámetro primario requiere el resultado de la optimización topológica (2D). El parámetro secundario necesita la cantidad de iteraciones de análisis y la densidad del objetivo para el resultado.

Nota. Elaboración propia (2024).

Las variables finales del algoritmo correspondieron al (7) generador de malla e imagen de solución y (8) el generador de curvas de contorno de la zona de refuerzo estructural resultante.

Los parámetros establecidos en estas variables se describen a continuación (Tabla 14):

Tabla 14.

Parámetros finales establecidos en las variables del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
7. Generador de	Resultado	NA	Función generadora de la malla e imagen de

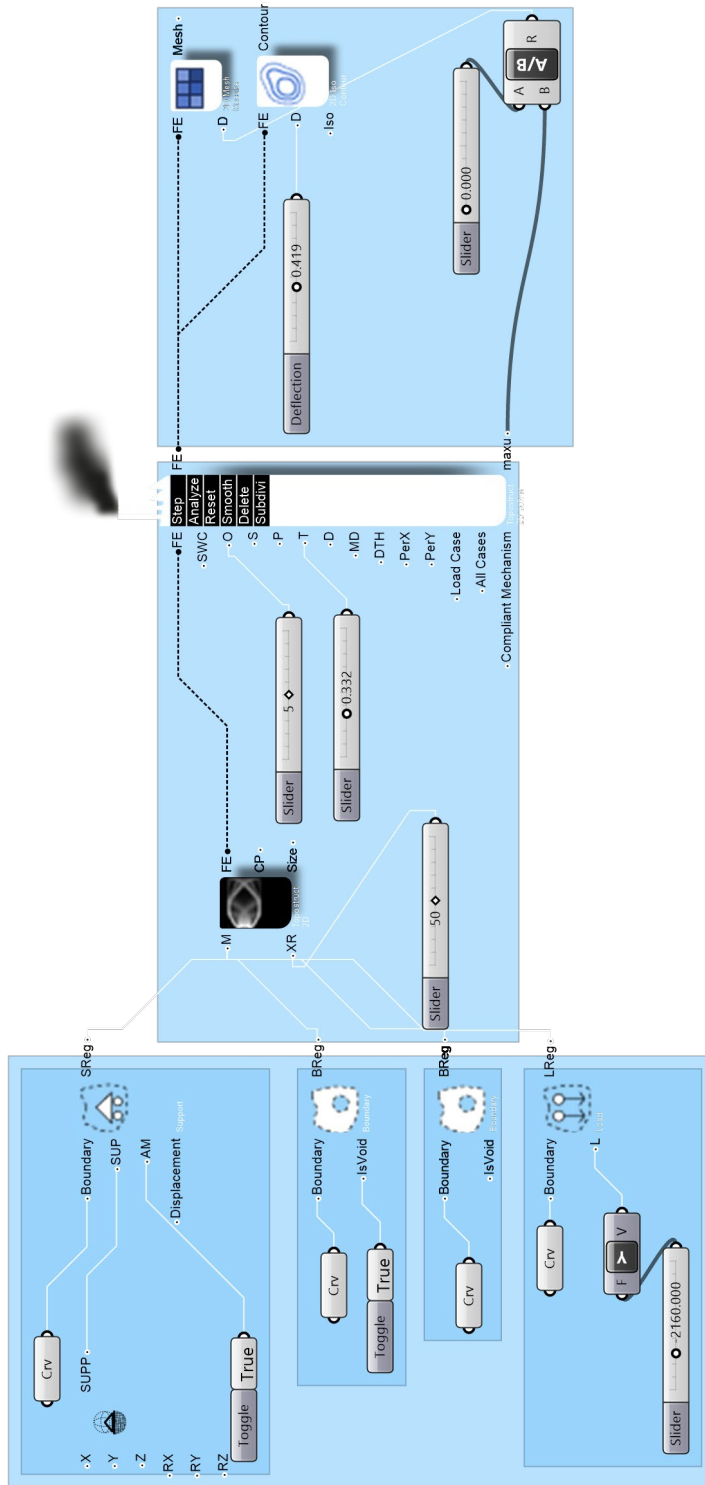
Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
mallado e imagen de solución	del motor solucionador de la simulación		solución del análisis. Como parámetro primario requiere del resultado del motor solucionador de la simulación.
8. Generador de curvas de contorno de la zona de refuerzo estructural	Resultado del motor solucionador de la simulación	▪ Factor de desviación: 0.419	Función generadora de curvas que delimitan la zona de refuerzo estructural en el resultado de la simulación. Como parámetro primario requiere del resultado del motor solucionador de la simulación. El parámetro secundario necesita un factor de desviación para la realización del contorno.

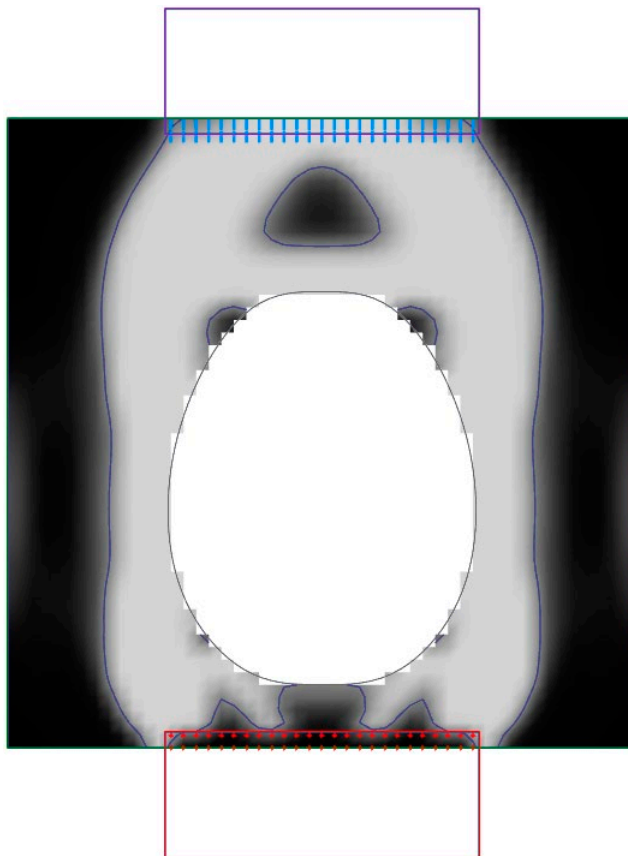
Nota. Elaboración propia (2024).

A continuación, es mostrado el flujograma del algoritmo para la optimización topológica estructural FEM, realizado con el complemento *Millipede* de la plataforma de programación visual *Grasshopper* con la configuración de variables descritas con anterioridad (Figura 71a). También, es expuesto el resultado de la simulación, que funcionó como punto de partida para la configuración del *entorno virtual de desenvolvimiento* de los agentes (Figura 71b).

Figura 71.

(a) *Flujograma de Grasshopper configurado para la optimización topológica estructural FEM realizado con Millipede -arriba-. (b) Resultado de la simulación ejercida por el algoritmo -abajo-.*





Nota. Elaboración propia (2024).

5.1.2. Determinación del entorno virtual de desenvolvimiento de los agentes.

El *entorno virtual de desenvolvimiento* es el espacio de interacción para el sistema Multi-Agente en su simulación. En este sentido, representa tanto los límites de trabajo para las unidades robóticas en el suelo, como el área controlada donde los agentes no tienen algún tipo de interferencias más que las determinadas en el cuasiexperimento. También, es la superficie donde se dispone la imagen resultante de la simulación para la optimización topológica estructural FEM, para generar el campo de flujo vectorial a partir de la zona de refuerzo que expone la imagen (en color blanco) y que interpreta la sección representativa de la EA.

Para realizar las simulaciones comparativas entre las diversas condiciones de multiplicidad del sistema Multi-Agente, fue configurada una sola sección representativa de la EA

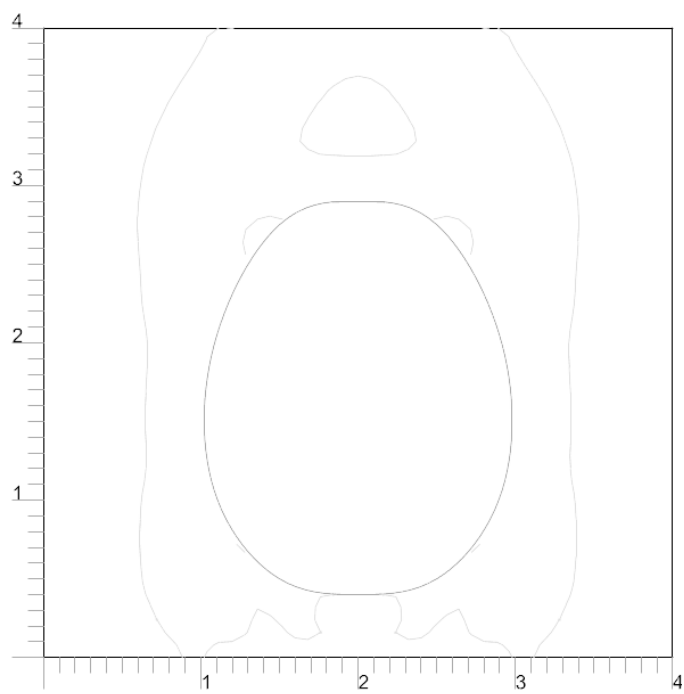
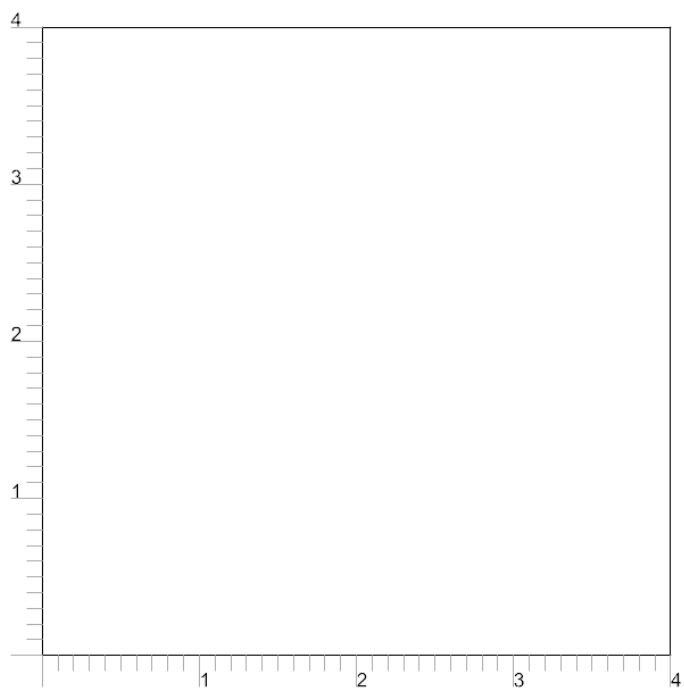
que, a través de las zonas de interacción establecidas por la simulación FEM, se determinó un área ideal de aplicación de material y de espacio habitable. La configuración de este entorno de desenvolvimiento para los agentes fue determinada de la siguiente manera:

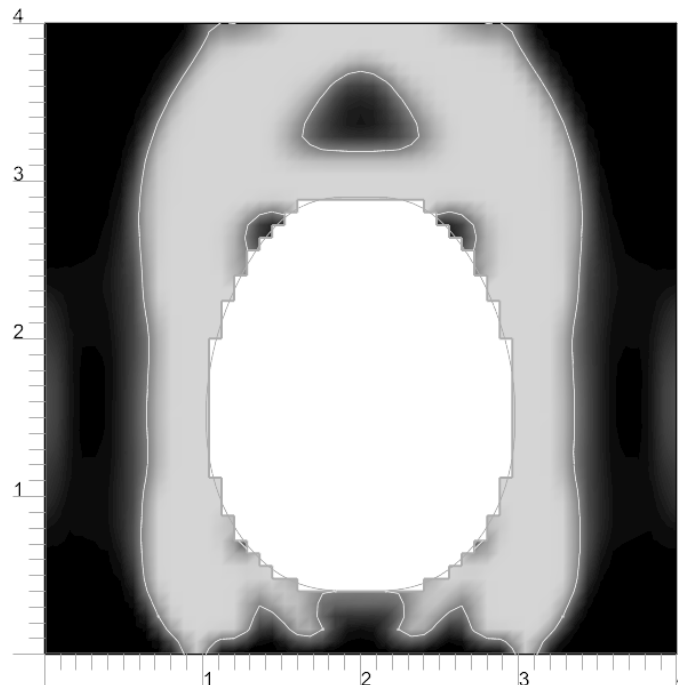
- a) *Dimensiones*: la delimitación fue de 4 m x 4 m. El área consecuente de estas dimensiones es de 16 m², y es el espacio suficiente para desarrollar una sección representativa de EA para una edificación de un solo nivel.
- b) *Visualización*: las dimensiones fueron indicadas mediante numeración y reglas que indican las dimensiones en decímetros y metros en el eje X e Y. Esta disposición, permitió analizar gráficamente el desenvolvimiento de los agentes en el espacio con respecto a la imagen que contiene la topología estructural optimizada.
- c) *Referencias*: en el espacio de interacción fue implementada la imagen resultante de la optimización topológica estructural FEM, también el vacío que representa el área habitable de la sección y los contornos que delimitan la topología de la EA, así como la zona de disposición de material por los agentes.

A continuación, es mostrado los componentes del entorno virtual de desenvolvimiento de los agentes, como el espacio destinado a la interacción de éstos y de aplicación para las simulaciones que se ejecutaron en el presente trabajo de investigación (Figura 72).

Figura 72.

Componentes del entorno virtual de desenvolvimiento de los agentes: (a) dimensiones delimitadoras -arriba-, (b) contorno y vacío que dan forma a la topología que representa la sección de la EA -medio-, (c) imagen resultante de la optimización topológica estructural FEM -abajo-.





Nota. Elaboración propia (2024).

5.1.3. Configuración del sistema Multi-Agente.

El sistema Multi-Agente es el mecanismo medular del modelo de IC que estudia este trabajo de investigación. Es el algoritmo que concentra el conjunto de comportamientos que estimulan y condicionan a los agentes que representan a las unidades robóticas que constituyen al Sistema Multi-Robótico (SMR). En este caso, el sistema Multi-Agente integra los comportamientos de *Interacción* y *Locomoción* producto de las lógicas de *Inteligencia de Enjambre* (IE) y *Vehículos de Braitenberg*.

Por tanto, las variables (o funciones) y parámetros que constituyeron la primera parte de este algoritmo fueron: (1) configurador de partículas, (2) configurador de agentes, (3) configurador de vehículos, (4) generador de partículas (representan a los agentes), (5) generador del *entorno de desenvolvimiento de agentes*. A continuación, es mostrada la relación de parámetros establecidos en esta primera sección del flujograma algorítmico (Tabla 15):

Tabla 15.

Parámetros iniciales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
1. Configurador de partículas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Orientación inicial: 0,0,1 ▪ Aceleración inicial: 0,0,0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lapso de vida: -1 ▪ Masa: 1 ▪ Tamaño de cuerpo: 0.12 ▪ Historial de trazo: 200 	Función que determina las características de las partículas que sean generadas. Los parámetros primarios son la orientación y aceleración inicial de cada partícula expresadas en vectores (X,Y,Z). Los parámetros secundarios consisten en el periodo de vida, masa, tamaño de cuerpo e historial de trazo de las partículas. El primer parámetro se expresa en movimiento, si el valor es negativo el lapso es infinito. El segundo parámetro se expresa en factor. Los últimos parámetros son expresados en unidades (m).
2. Configurador de agentes	Configurador de partículas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Máxima velocidad: 0.05 ▪ Máxima fuerza: 0.01 ▪ Radio de visión: 0.5 ▪ Ángulo de visión: 360 	Función que determina las características de los agentes (depende de las partículas existentes). El parámetro primario es el configurador de partículas. Los parámetros secundarios son la velocidad, fuerza, radio y ángulo máximo de interacción de los agentes. Estos parámetros se expresan en unidades (m), a excepción del ángulo de visión que es en grados (°).
3. Configurador de vehículos	Configurador de agentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tamaño de rueda: 0.05 	Función que determina las características de los vehículos (depende de los agentes existentes). El parámetro primario es el configurador de agentes. El parámetro secundario es el tamaño de rueda de los vehículos expresado en unidades (m).
4. Generador de partículas	Determinación de puntos geométricos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisión continua: falso ▪ Tasa de creación: 10 ▪ Número de agentes en el sistema: 1 ▪ Velocidad inicial mínima: 0,0.01,0 ▪ Velocidad inicial máxima: 0,0.01,0 	Función que genera partículas en el entorno de desenvolvimiento. La generación de partículas puede ser manual o automática. Sí la emisión es automática, puede ser establecida una tasa de creación y la cantidad de agentes creados. El parámetro primario es la determinación de puntos geométricos como partículas (sólo para creación manual). Los parámetros secundarios incluyen establecer la velocidad inicial mínima y máxima expresados en vectores (X,Y,Z).

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
5. Generador del entorno de desenvolvimiento de agentes	Contorno bidimensional delimitador del espacio: rectángulo de 4 m x 4 m	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superficie generada por el contorno ▪ Determinar si los agentes colisionan con o reaparecen continuamente en el espacio: falso 	Función que establece los límites del entorno de desenvolvimiento para los agentes. Como parámetro primario requiere el dibujo del contorno espacial expresado en unidades (m). Como parámetros secundarios requiere de la generación de una superficie a partir del contorno y determinar si los agentes colisionan con el contorno.

Nota. Elaboración propia (2024).

Las variables de la segunda parte (central) del algoritmo fueron: (6) la consolidación del sistema Multi-Agente, y (7) el motor simulador. Los parámetros que fueron establecidos en estas funciones fueron (Tabla 16):

Tabla 16.

Parámetros centrales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
6. Consolidación del sistema Multi-Agente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Configuración de las partículas, agentes y vehículos ▪ Generador de partículas ▪ Generador del entorno de desenvolvimiento de agentes 	NA	Función que consolida el sistema Multi-Agente a partir de la configuración de partículas, agentes y vehículos, el generador de partículas y el generador del entorno de desenvolvimiento para los agentes.
7. Motor simulador	Consolidación del sistema Multi-Agente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar reinicio del motor: falso / verdadero ▪ Disparador temporal del motor 	Motor que ejecuta la simulación Multi-Agente. Requiere de la función que consolida el sistema Multi-Agente, un reiniciador y un disparador.

Nota. Elaboración propia (2024).

Finalmente, la tercera parte de variables del algoritmo correspondieron a (8) la red de agentes vecinos, (9) el control de colisión entre vehículos, (10) el control de colisión con el entorno de desenvolvimiento de agentes, (11) el control de colisión con obstáculos en el sistema (vacío), (12) los sensores de atracción por campo de flujo vectorial de los agentes. Los parámetros establecidos en estas variables se describen a continuación (Tabla 17):

Tabla 17.

Parámetros finales establecidos en las variables para el algoritmo del sistema Multi-Agente con el complemento Quelea de Grasshopper.

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
8. Red de agentes vecinos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema Multi-Agente ▪ Red de agentes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Multiplicador de radio de visión: 0.5 ▪ Multiplicador de ángulo de visión: 0.8 	Función para el reconocimiento de la red de agentes en el sistema Multi-Agente. Requiere de la consolidación del sistema Multi-Agente, y la red de agentes existentes. Como parámetros secundarios es posible manipular el factor multiplicador de radio y ángulo de visión.
9. Control de colisión entre vehículos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema Multi-Agente ▪ Red de agentes vecinos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desactivador: falso ▪ Peso multiplicador: 1 ▪ Tiempo mínimo de colisión: 6 ▪ Distancia de colisión potencial: 0.4 	Función para controlar la colisión entre agentes (vehículos). Los parámetros primarios son el sistema Multi-Agente y la red de agentes vecinos. Los parámetros secundarios consisten en un desactivador, un factor multiplicador de fuerza para cada agente, el tiempo mínimo de colisión y la distancia de colisión potencial entre agentes. El parámetro de tiempo se expresa segundos (seg), el parámetro de distancia en unidades (m).
10. Control de colisión con el entorno de desenvolvimiento de agentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema Multi-Agente ▪ Generador del entorno de desenvolvimiento de agentes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desactivador: falso ▪ Peso multiplicador: 1 ▪ Multiplicador de radio de visión: 0.5 	Función para controlar la colisión de los agentes con el entorno de desenvolvimiento. Los parámetros primarios son el sistema Multi-Agente y el entorno de desenvolvimiento de agentes. Los parámetros secundarios consisten en un desactivador, un factor multiplicador de fuerza para cada agente y el factor multiplicador de radio de visión.
11. Control de colisión con obstáculos en el	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema Multi-Agente ▪ Obstáculo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desactivador: falso ▪ Peso 	Función para controlar la colisión de los agentes con obstáculos determinados. En el caso de esta investigación, el obstáculo

Variable / Función	Parámetro	Parámetro secundario	Descripción
sistema (vacío)	determinado por un volumen geométrico: vacío	multiplicador: 1 ▪ Multiplicador de radio de visión: 0.5	es el vacío determinado en la simulación para la optimización topológica estructural FEM y el entorno de desenvolvimiento para los agentes. Los parámetros primarios son el sistema Multi-Agente y el obstáculo determinado por un volumen. Los parámetros secundarios consisten en un desactivador, un factor multiplicador de fuerza para cada agente y el factor multiplicador de radio de visión.
12. Sensores de atracción por campo de flujo vectorial de los agentes	▪ Sistema Multi-Agente ▪ Imagen producto de la simulación para la optimización topológica estructural FEM	▪ Desactivador: falso ▪ Peso multiplicador: 1 ▪ Multiplicador de radio de visión: 0.6 ▪ Multiplicador de ángulo de visión: 0.125	Función para controlar la atracción a las zonas blancas del producto de la simulación para la optimización topológica FEM. El control es para los sensores de los agentes, los cuales, se desenvuelven en el campo de flujo vectorial producido por esta función. Los parámetros primarios son el sistema Multi-Agente y la imagen resultante de la optimización. Los parámetros secundarios consisten en un desactivador, un factor multiplicador de fuerza para cada agente, el factor multiplicador de radio de visión y el factor multiplicador de ángulo de visión.

Nota. Elaboración propia (2024).

A continuación, es mostrado el flujograma del algoritmo para la simulación del sistema Multi-Agente del modelo de IC, realizado con el complemento *Quelea* de la plataforma de programación visual *Grasshopper* con la configuración de variables descritas con anterioridad (Figura 73).

Figura 73.

Flujograma de Grasshopper configurado para la simulación del sistema Multi-Agente realizado con Quelea.

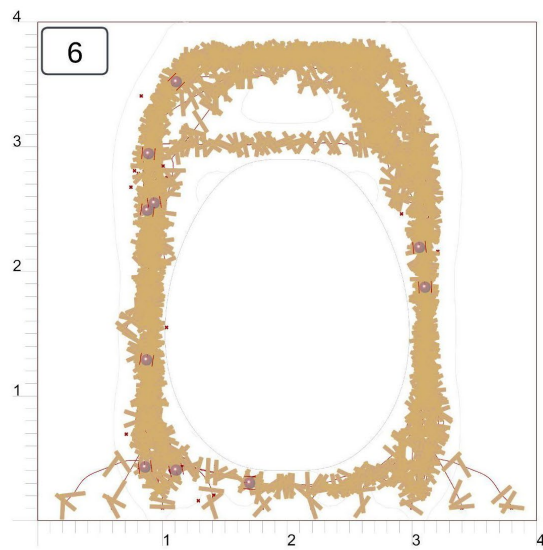
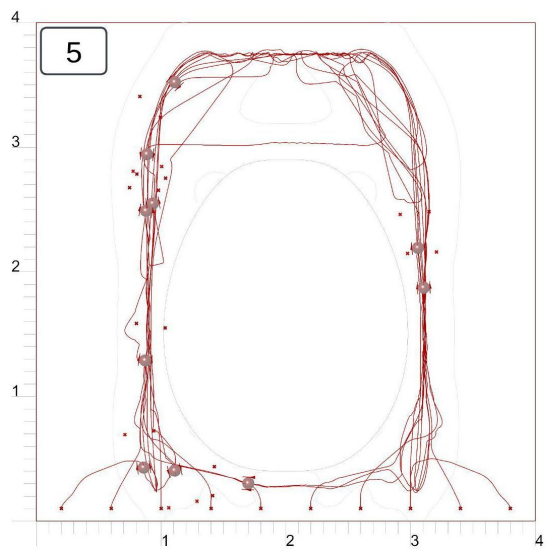
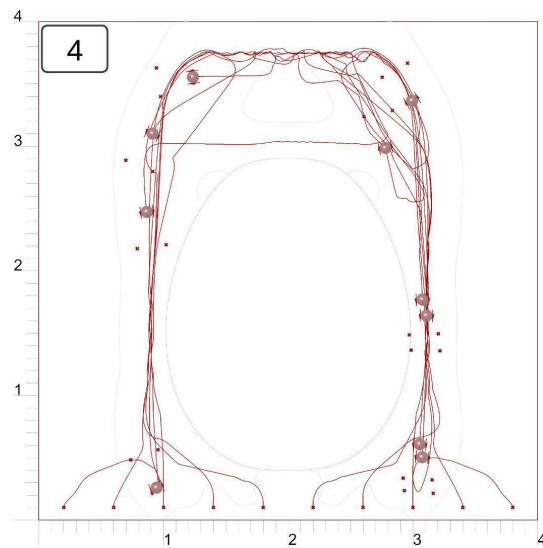
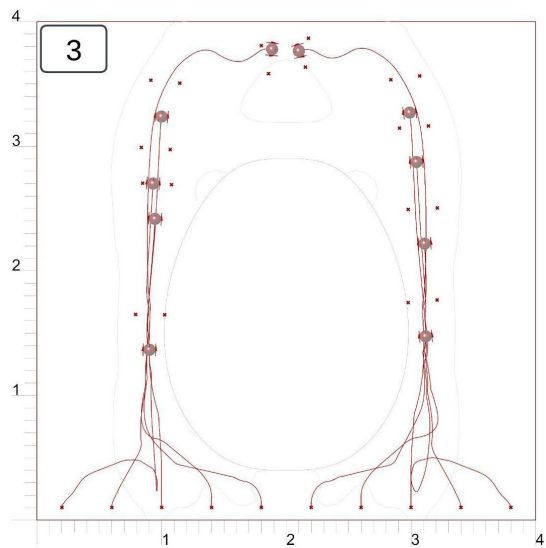
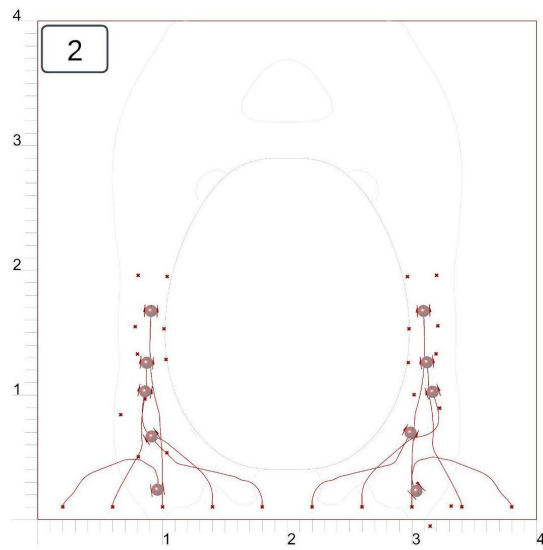
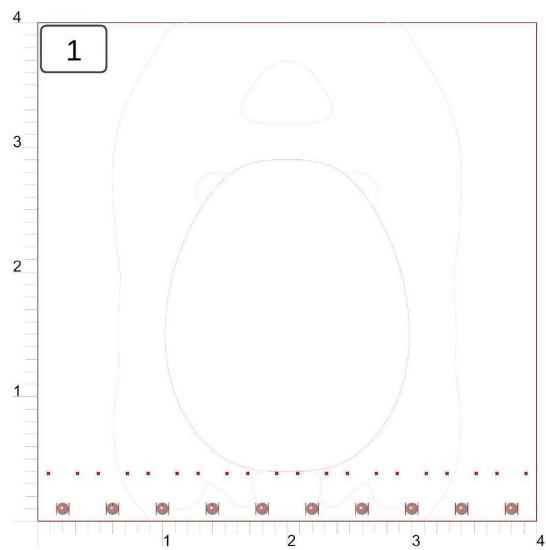
5.1.4. Simulación del sistema Multi-Agente.

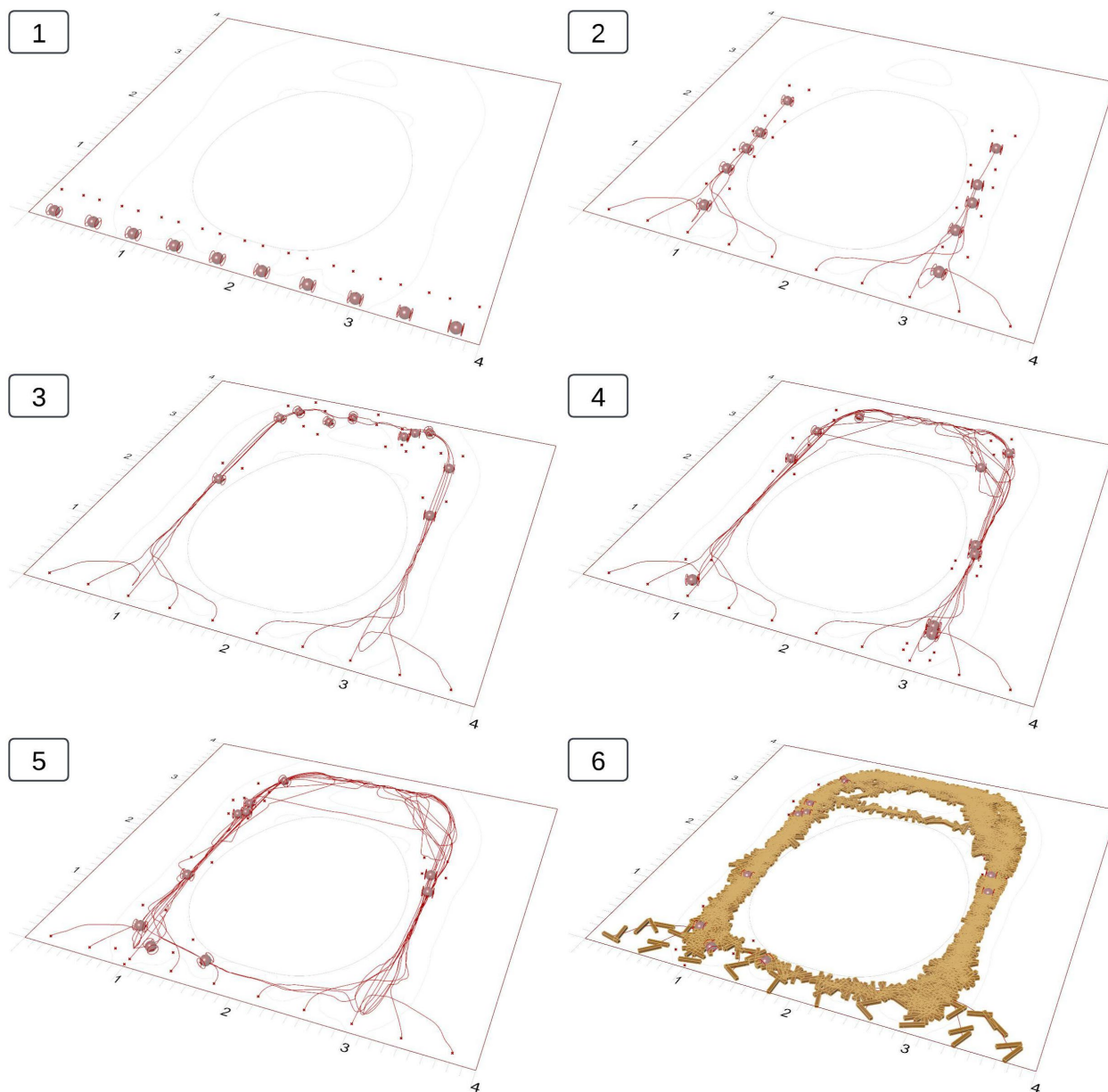
La simulación del sistema Multi-Agente, bajo los parámetros establecidos con anterioridad, muestran el desenvolvimiento del conjunto de agentes en dos y tres dimensiones en el entorno configurado. Por otro lado, el algoritmo expone el tiempo de ejecución al momento de parar cada simulación. También dispone la cantidad de material constructivo (madera) sobre el trazo del recorrido de los agentes.

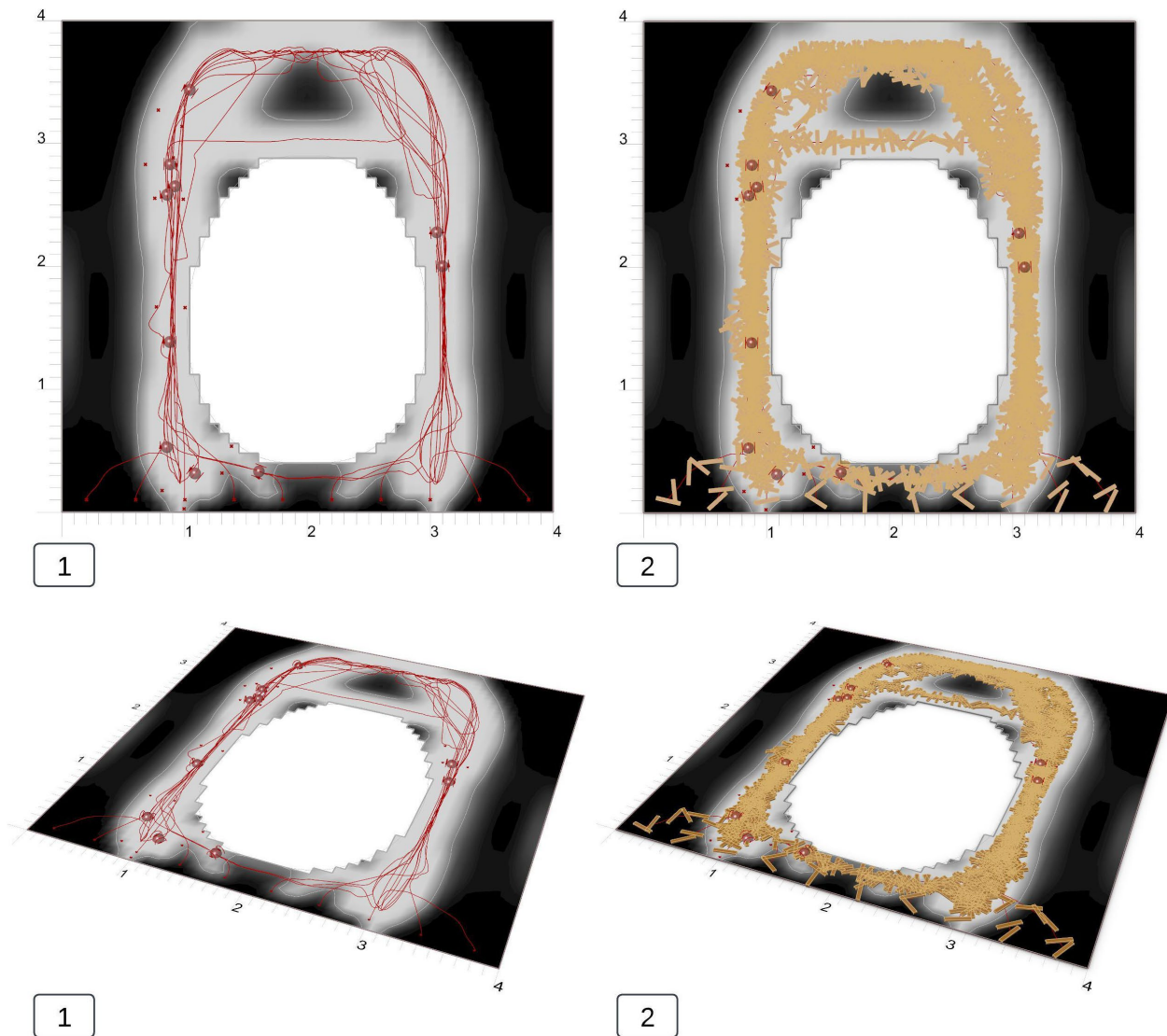
En las imágenes de la simulación, las esferas rojas representan a un *Vehículo de Braitenberg*. Cada robot (interpretado por los vehículos) incluye sus llantas, los vectores de velocidad indicados por las flechas rojas y los dos sensores que lo constituyen (señalados por dos cruces). La posición de origen de cada robot también es indicada por una cruz y el trazo de su recorrido es interpretado por una curva geométrica roja. En la imagen final de cada secuencia, es mostrada la disposición de material constructivo (elementos de madera) y su densidad con los prismas rectangulares de color café. A continuación, se expone un ejemplar resultante de la simulación con la interacción de diez agentes (Figura 74).

Figura 74.

(a) Resultado de simulación en dos dimensiones -arriba-, (b) resultado en tres dimensiones del sistema Multi-Agente realizado con Quelea -medio-, (c) resultado con la imagen de la optimización topológica estructural FEM -abajo-.







Nota. Elaboración propia (2024).

Las simulaciones fueron realizadas en un equipo computacional de tipo portátil (laptop) con las siguientes características: procesador Intel® Core i7-9750H CPU @ 2.60 GHz, con 32 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica GPU NVIDIA GeForce GTX 1650 con una velocidad de la memoria de 8 Gbps. La cantidad de agentes a comparar en el cuasiexperimento fue determinada de acuerdo con las capacidades de simulación del equipo de cómputo. Futuras investigaciones realizarán análisis comparativos de mayor amplitud con equipo computacional de mayor capacidad y especializado.

5.1.5. Política de interacción del sistema Multi-Agente.

Para poder realizar la evaluación comparativa del desempeño del Sistema Multi-Robótico, representado por el sistema Multi-Agente, de acuerdo con sus condiciones de multiplicidad, fue necesario establecer una *política de interacción* en la que se determinen los aspectos a tomar en cuenta en el comportamiento de los agentes, como puntos de referencia para realizar las mediciones correspondientes por cada simulación ejercida.

Los aspectos considerados en la política incluyen (a) determinar a qué es equivalente una muestra de análisis, (b) determinar a qué es equivalente un ensayo, (c) la cantidad de ensayos realizados por cada muestra, (d) la cantidad máxima de elementos constructivos a disponer en el entorno, (e) las características de los elementos constructivos y su disposición.

También se tomó en cuenta aspectos que determinan si cada ensayo fue exitoso o fallido, en ese sentido, las penalizaciones fueron de acuerdo con: (f) el tiempo límite para realizar cada simulación, (g) la tasa de desvío de los agentes con respecto a las zonas de atracción establecidas por la optimización topológica estructural, (h) la tasa de elementos dispuestos fuera de las zonas correspondientes, producto del desvío de los agentes; finalmente, aparte de los ensayo penalizados con los aspectos anteriores, se incluyeron (i) aquellos que presentaron mayor cantidad de desvíos y elementos constructivos fallidos por cada muestra. En este orden de aspectos, la política de interacción del sistema Multi-Agente fue establecida de la siguiente manera (Tabla 18):

Tabla 18.

Descripción de aspectos que considera la política de desenvolvimiento del sistema Multi-Agente en las simulaciones.

Aspecto	Regla
a. Muestra	Una muestra es equivalente a un día de ensayos.

Aspecto	Regla
b. Ensayo	Un ensayo es equivalente a una simulación. Los ensayos son agrupados en sistemas de 10, 15 y 20 agentes.
c. Cantidad de ensayos realizados por cada muestra	Cada muestra se encuentra constituida por 20 ensayos. Fue determinada una muestra por cada índice de multiplicidad de agentes en el sistema. Una muestra es para las simulaciones constituidas por un sistema de 10 agentes. Otra para un sistema de 15 y una más para 20 agentes.
d. Cantidad máxima de elementos constructivos a disponer en el entorno	Por cada simulación (ensayo) se dispondrán hasta 2,500 elementos de madera. Cada agente puede llegar a posicionar hasta 500 elementos en una simulación. Esta cantidad es variable (puede ser menor), y dependerá de la multiplicidad del sistema.
e. Características de los elementos constructivos y su disposición	Cada elemento constructivo es de carácter discreto. Es un barrote de madera de pino con dimensiones de 0.06 m x 0.06 m x 0.40 m. La disposición de los barrotes es aleatoria, tanto en su ubicación como en su rotación (con respecto a su centro).
f. <i>Penalización 1</i> : tiempo límite por cada ensayo	El tiempo límite para cada simulación (ensayo) es de 2 min. Ensayos fuera de este límite se consideran como fallidos.
g. <i>Penalización 2</i> : tasa de desvío de los agentes con respecto a las zonas de atracción establecidas por la optimización topológica estructural	La tasa de desvío del sistema Multi-Agente es de 0.05 (5%). Esta tasa fue tomada como referencia del nivel de significación estadística. Ensayos en los que los agentes superen esta tasa se consideran como fallidos.
h. <i>Penalización 3</i> : tasa de elementos dispuestos fuera de las zonas de atracción establecidas por la optimización topológica estructural	La tasa de disposición fallida de elementos constructivos por los agentes es de 0.05 (5%). Esta tasa fue tomada como referencia del nivel de significación estadística. Ensayos en los que los agentes superen esta tasa se consideran como fallidos.
i. <i>Penalización 4</i> : ensayo que en una muestra presentó mayor cantidad de desvíos y elementos constructivos fallidos	Aparte de las penalizaciones anteriores, es penalizado aquel ensayo que, por cada muestra, presentó mayor cantidad de desvíos en sus agentes y mayor cantidad de elementos constructivos fallidos en su disposición.

Nota. Elaboración propia (2024).

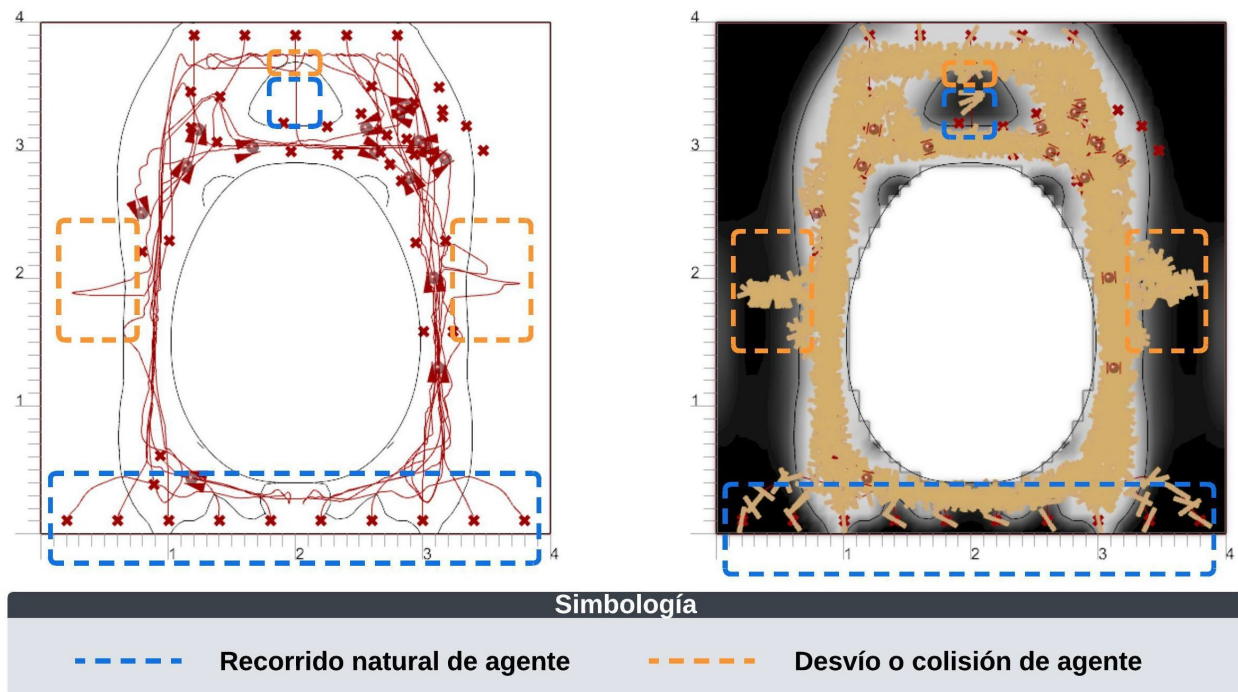
La ubicación inicial de los agentes en el entorno de desenvolvimiento fue en el extremo inferior y superior del espacio, con una disposición equidistante de 0.4 m, distribuidos equilibradamente cerca de la zona de atracción (estipulada por la optimización topológica estructural).

Otra consideración importante fue que, en la cuenta de elementos constructivos, sólo fueron elegidos como fallidos, los materiales que con claridad tuvieron una localización errónea por desvío, colisión, desorientación, inmovilidad o falla en sensor del agente. No fueron tomados

en cuenta los elementos que se encontraron fuera de la zona de atracción del entorno, por incorporación natural del inicio de recorrido de la unidad robótica (Figura 75).

Figura 75.

Ejemplar de selección de elementos fallidos en una simulación (ensayo) del sistema Multi-Agente.



Nota. Elaboración propia (2024).

5.2. Aplicación del modelo de Inteligencia Colectiva

De acuerdo con todos los aspectos determinados en la *Configuración inicial del sistema Multi-Agente para la simulación*, el siguiente apartado expone el resultado de todas las muestras y ensayos realizados para la evaluación de desempeño del modelo de IC que el presente trabajo de investigación desarrolló. Es importante mencionar que el cuasiexperimento evaluó la efectividad (éxito / fracaso), con respecto al tiempo y la multiplicidad (cantidad de agentes en el

sistema Multi-Agente). Estas relaciones de análisis permitieron estudiar la pertinencia de la *reducción de escala* del medio robótico al momento de construir arquitectónicamente.

Por tanto, a continuación, se muestran las imágenes del resultado final de las simulaciones ejecutadas, segmentadas por las muestras con sistemas Multi-Agente con diez, quince y veinte unidades robóticas.

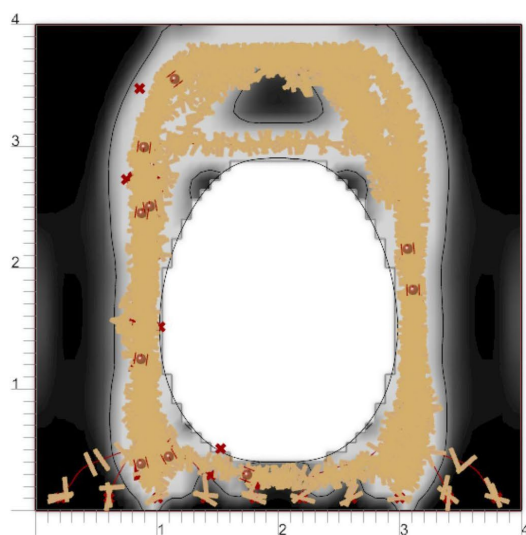
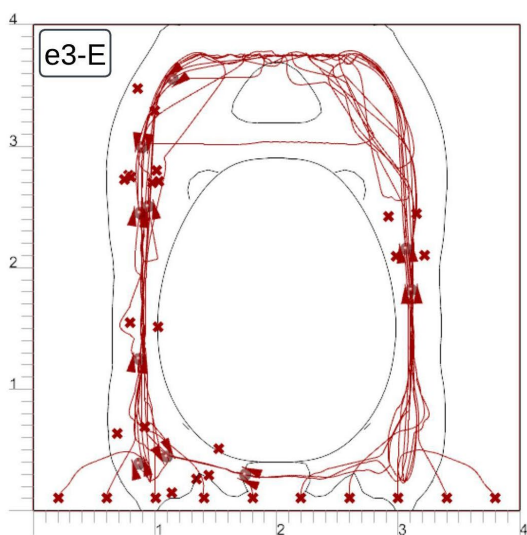
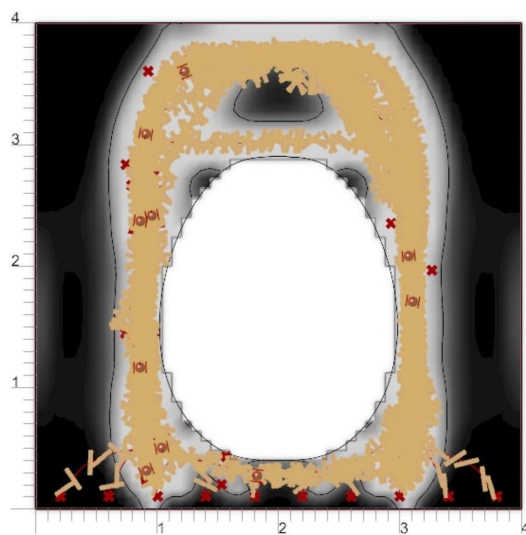
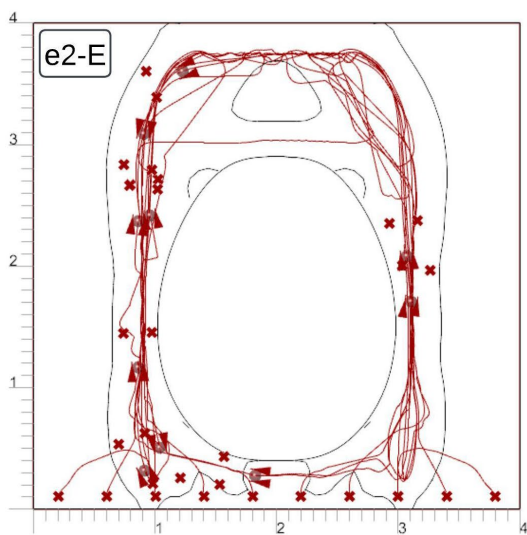
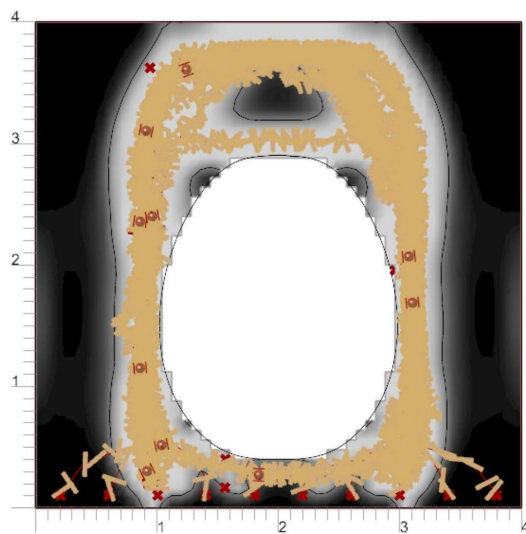
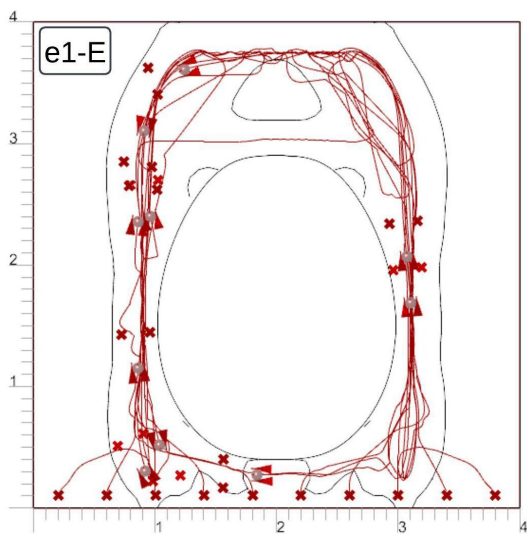
5.2.1. Aplicación del sistema Multi-Agente con diez unidades robóticas.

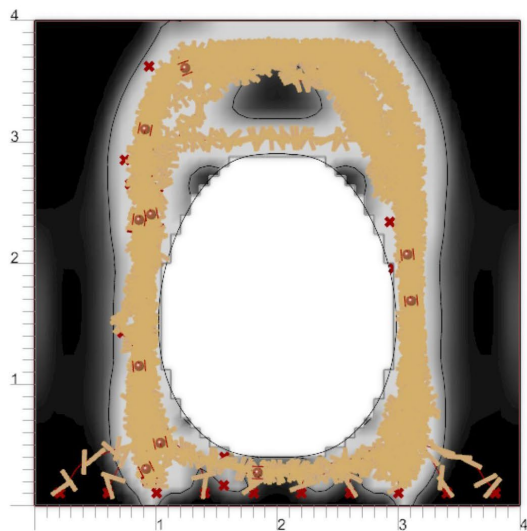
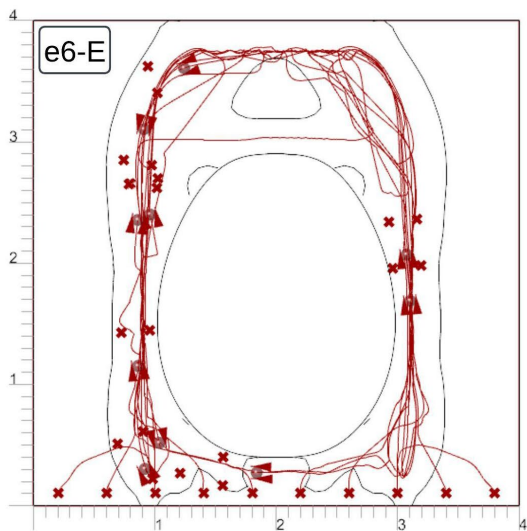
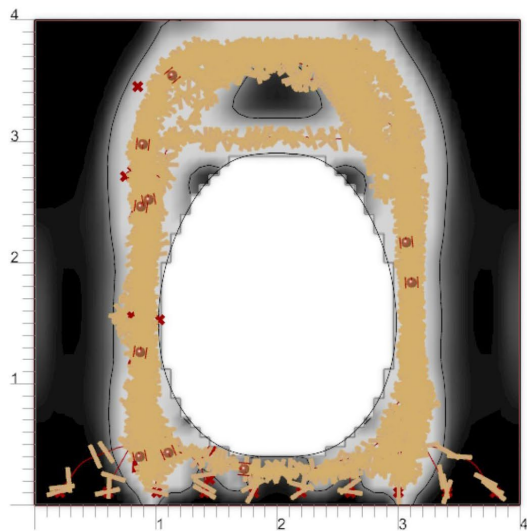
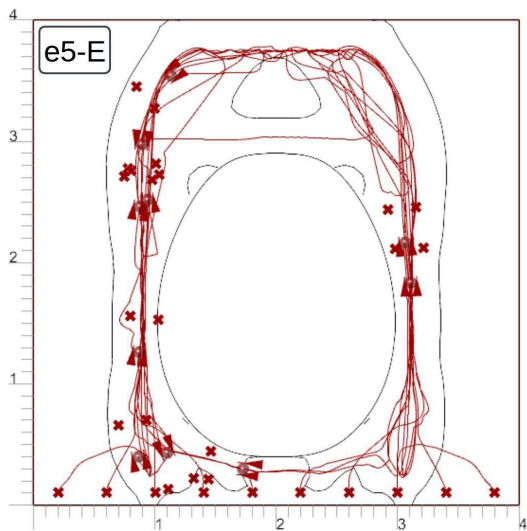
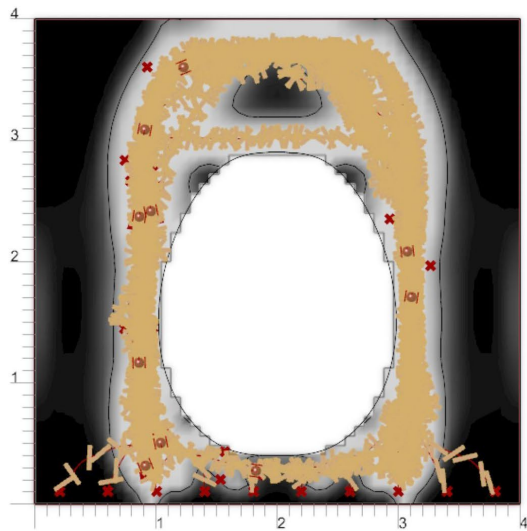
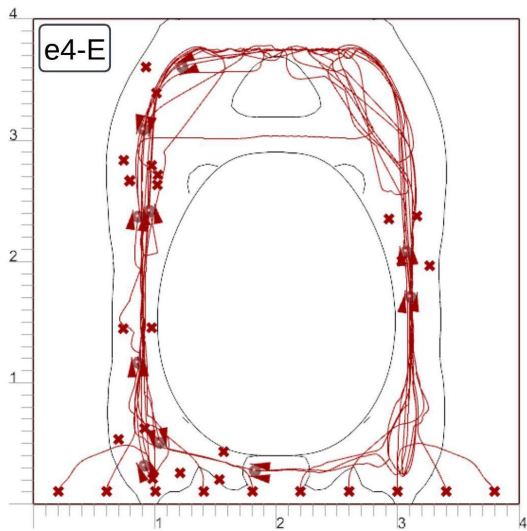
La primera muestra de aplicación del sistema Multi-Agente del modelo de IC, incluyó veinte ensayos (simulaciones) con diez agentes que representan a las unidades robóticas del SMR (Figura 76). Los ensayos, son expuestos a continuación de la siguiente manera:

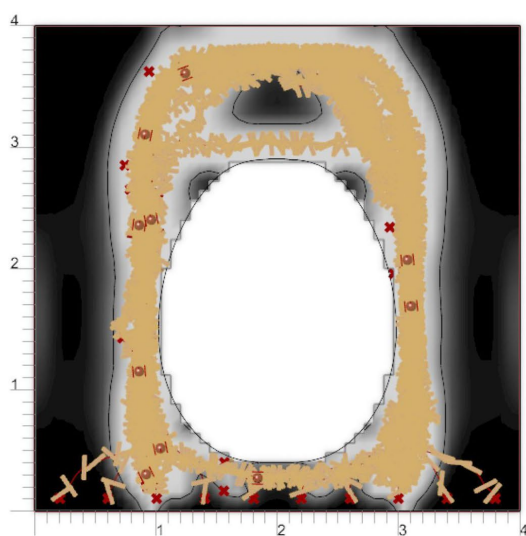
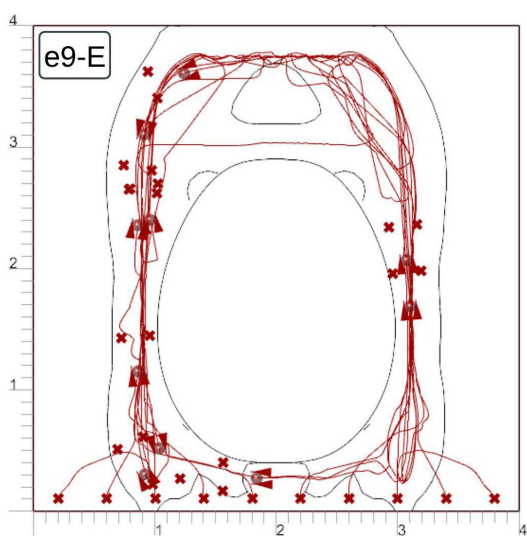
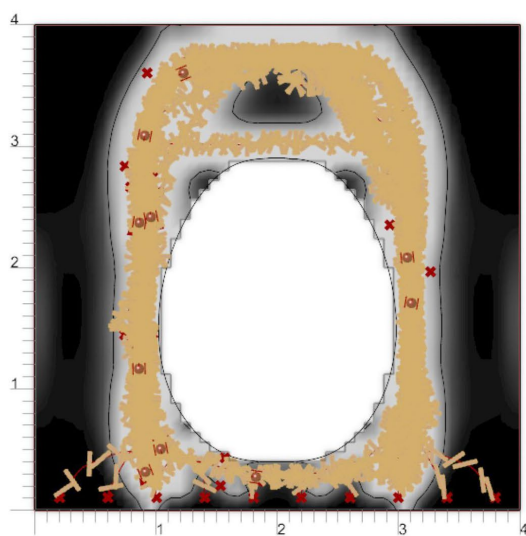
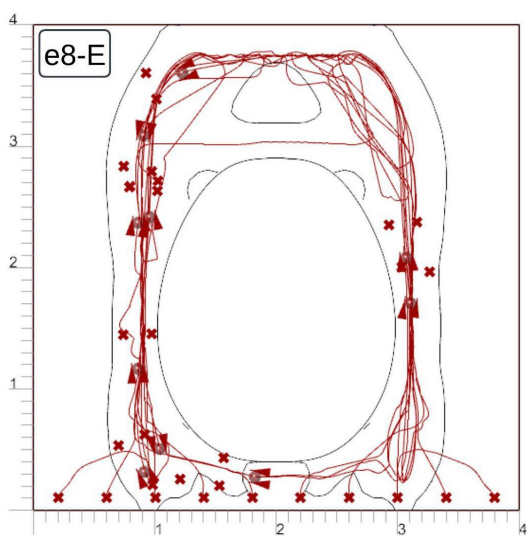
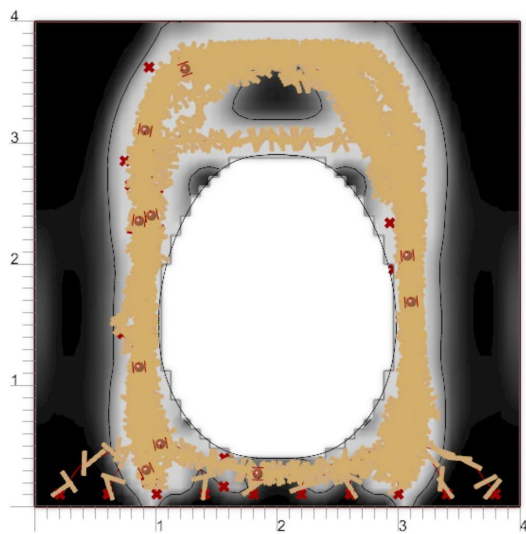
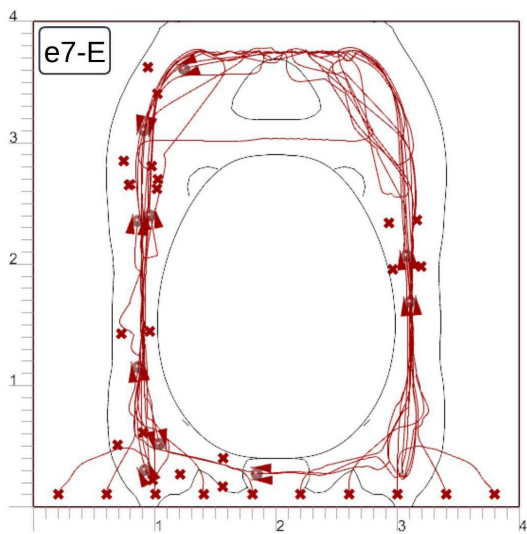
- a) Nueve simulaciones de la muestra se presentan con vistas bidimensionales desde planta.
- b) Las otras once simulaciones restantes se muestran con vistas tridimensionales desde perspectiva.
- c) Cada ensayo es indicado con la letra “e” y el número que le corresponde y una leyenda que indica si el ensayo fue exitoso o no (“E” = éxito, “F” = fracaso).
- d) Cada ensayo es mostrado en su resultado final, una imagen corresponde a el trazo generado por los agentes, otra a la disposición de elementos constructivos sobre la imagen resultante de la optimización topológica estructural.

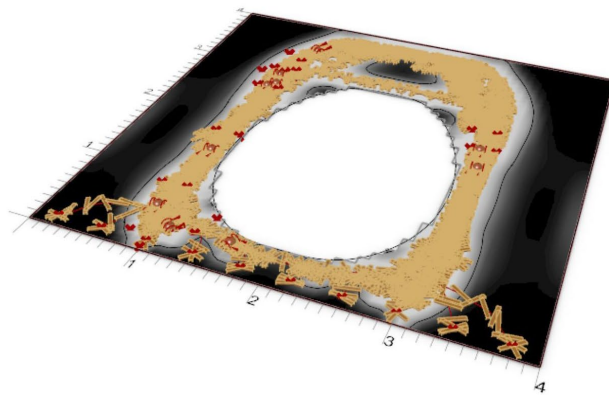
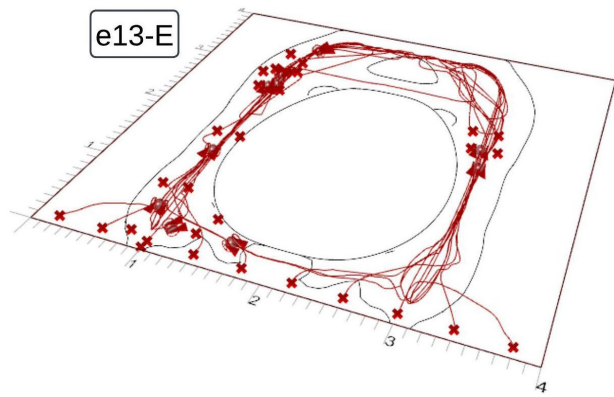
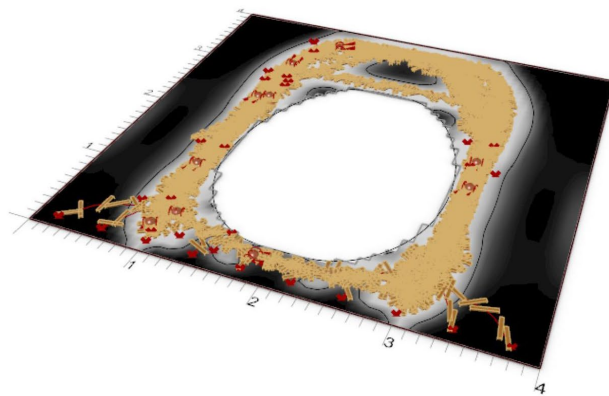
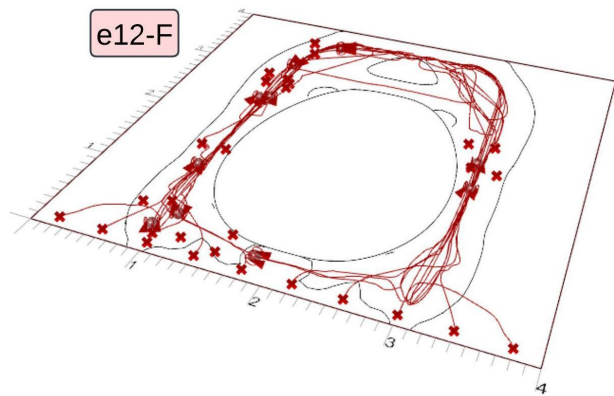
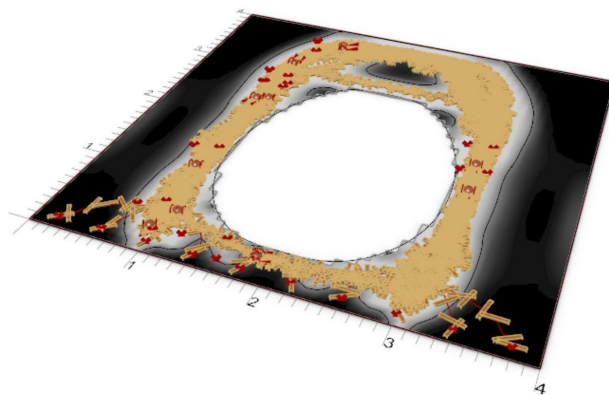
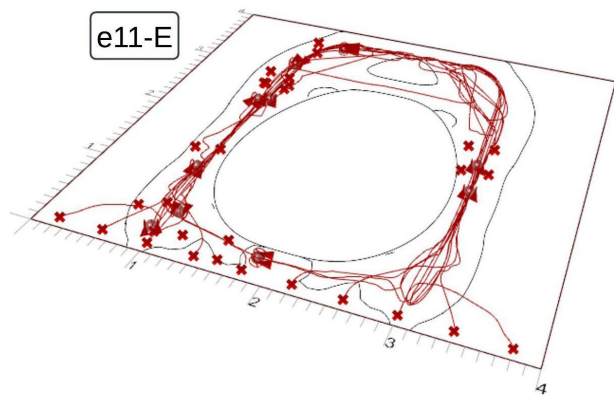
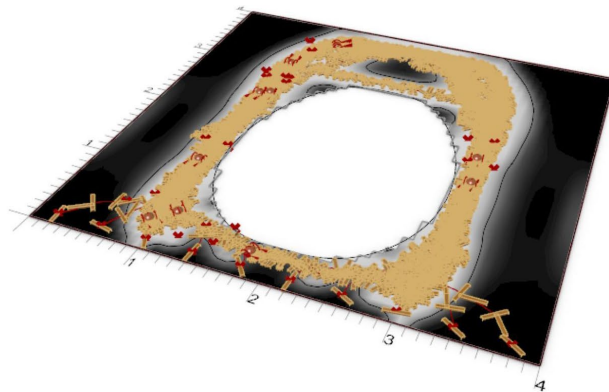
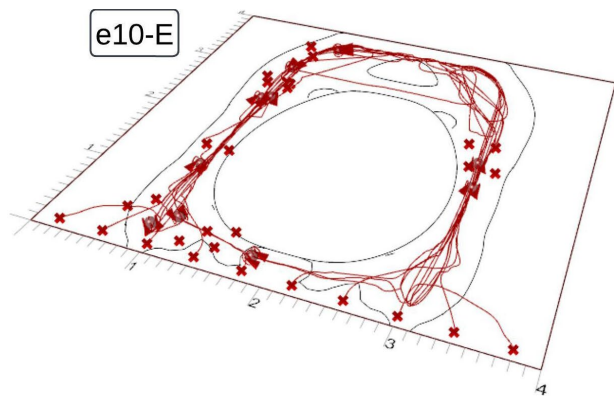
Figura 76.

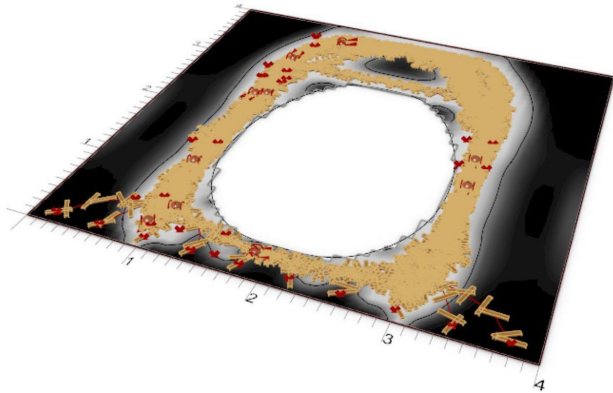
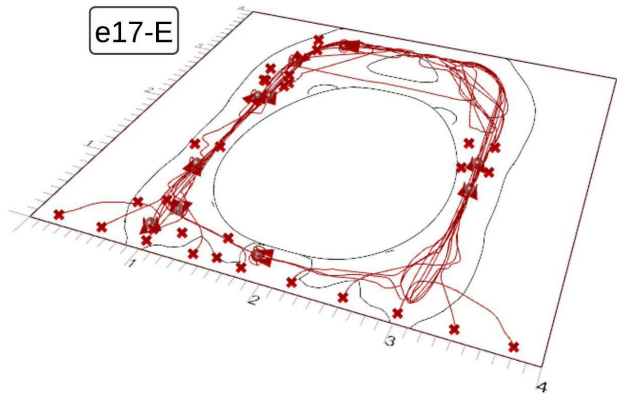
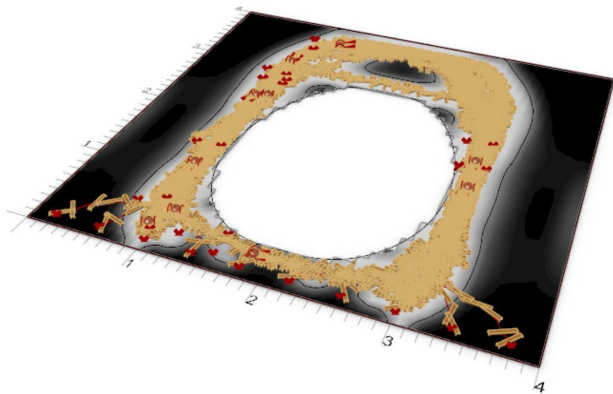
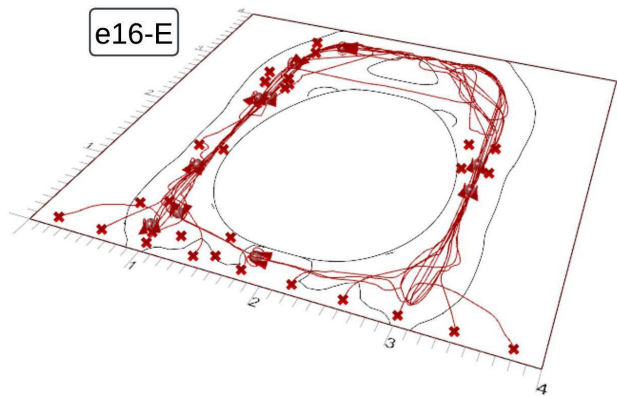
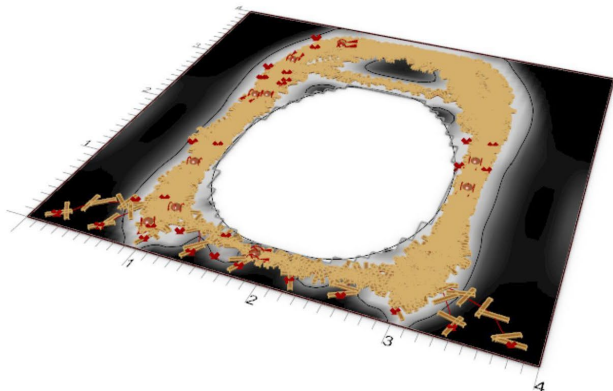
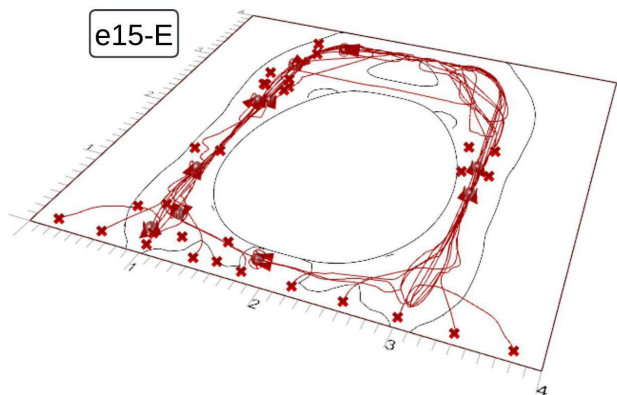
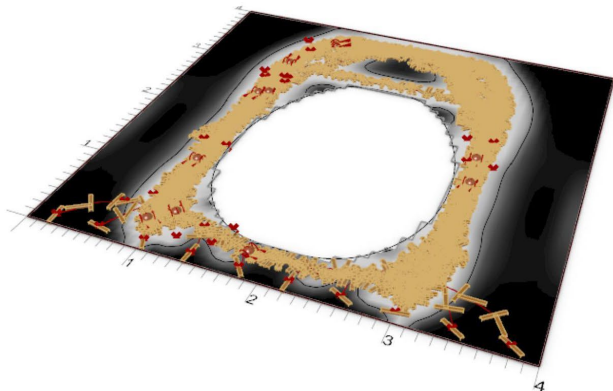
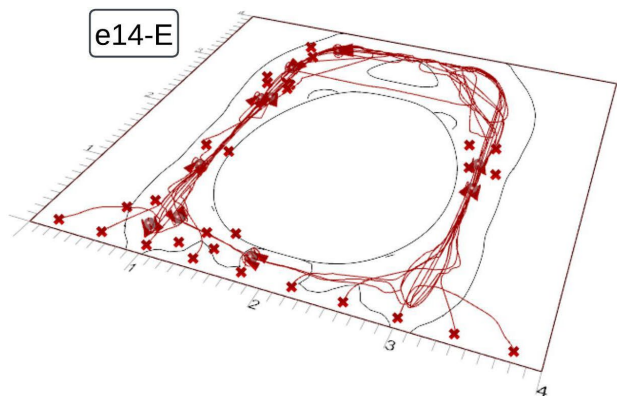
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la primera muestra del cuasiexperimento.

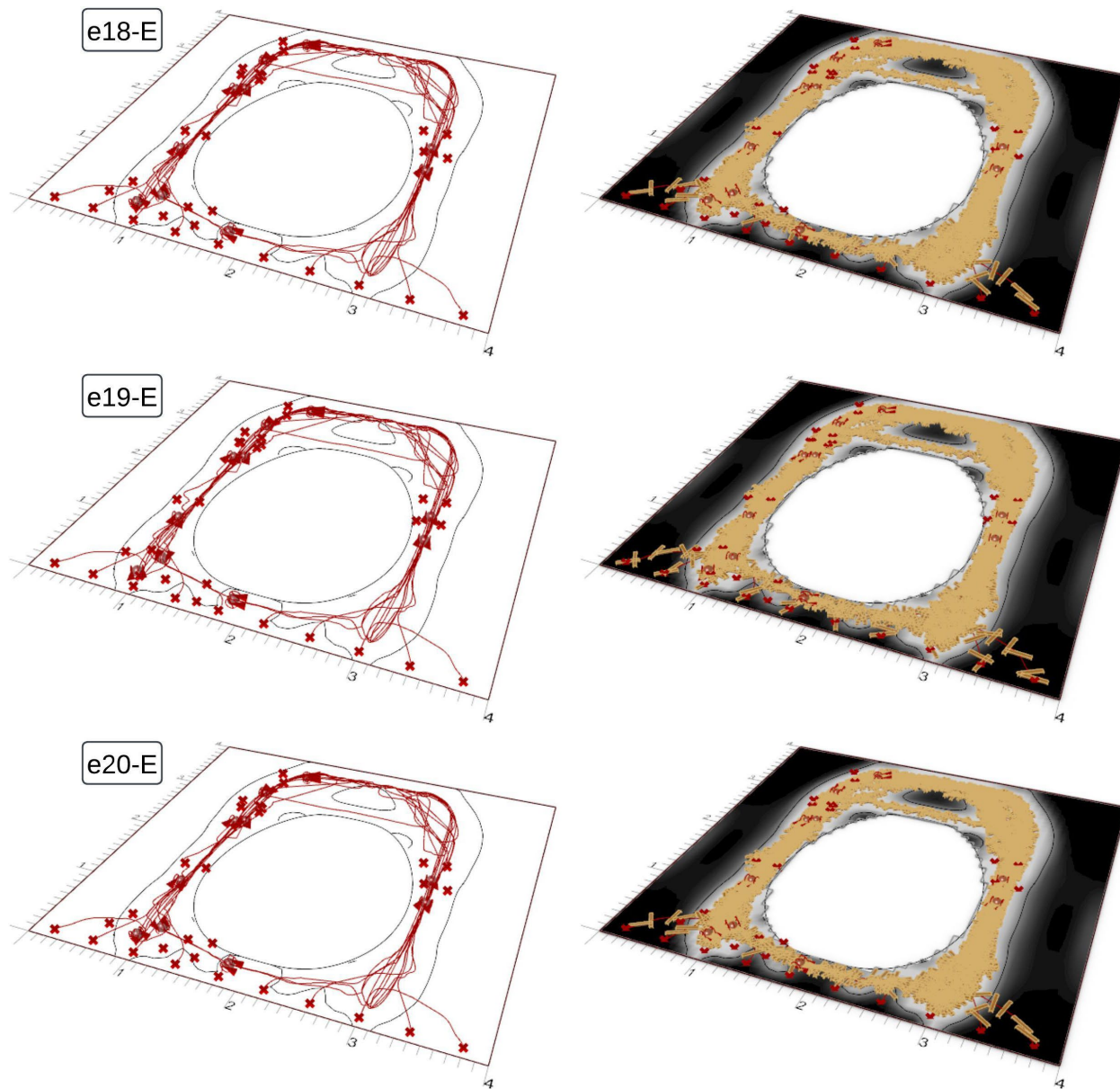












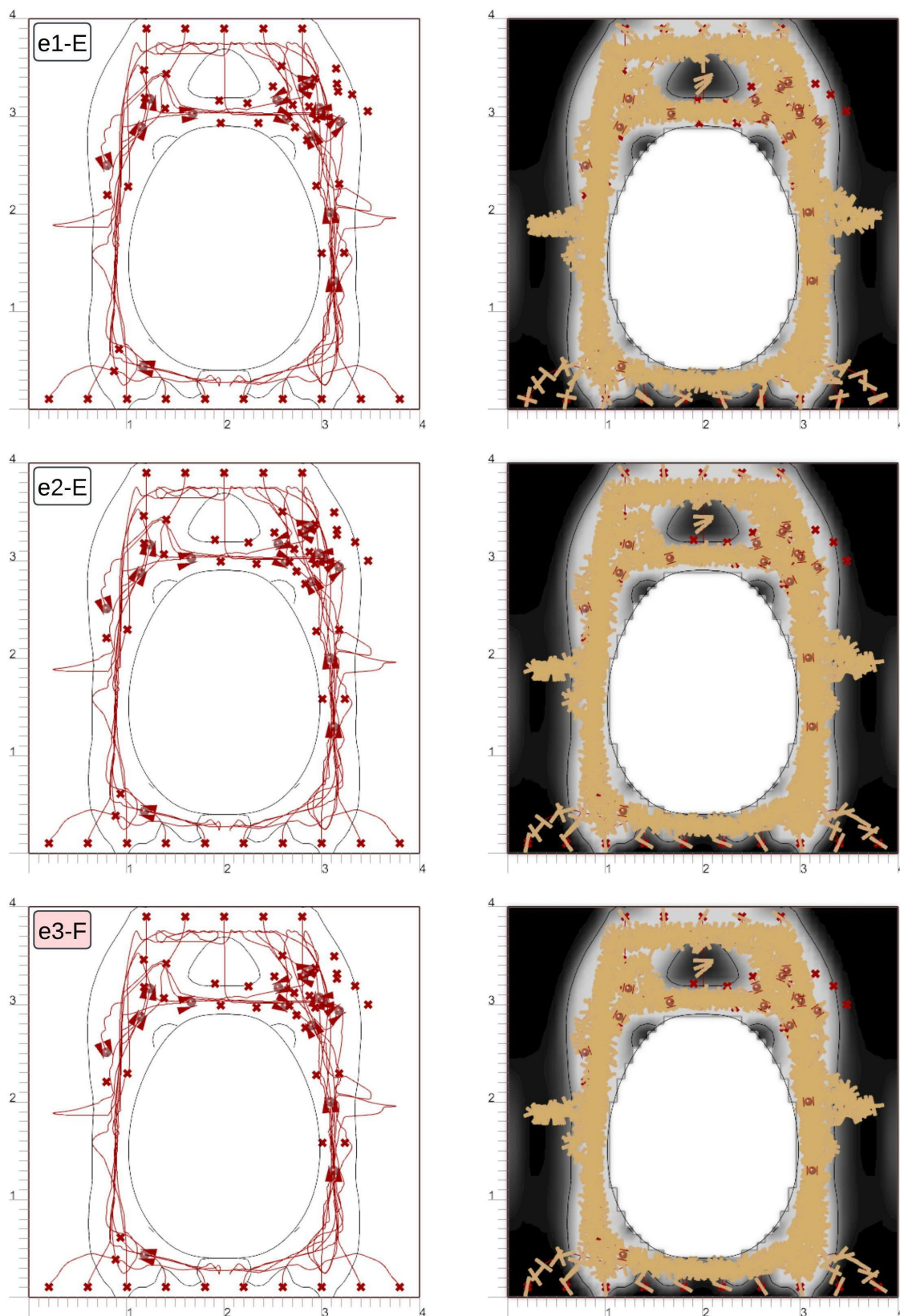
Nota. Elaboración propia (2024).

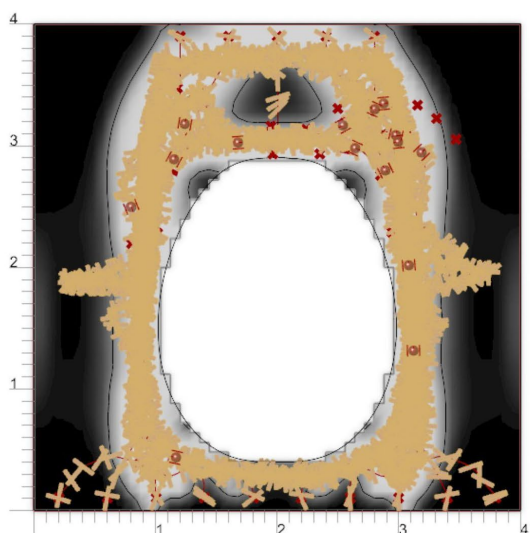
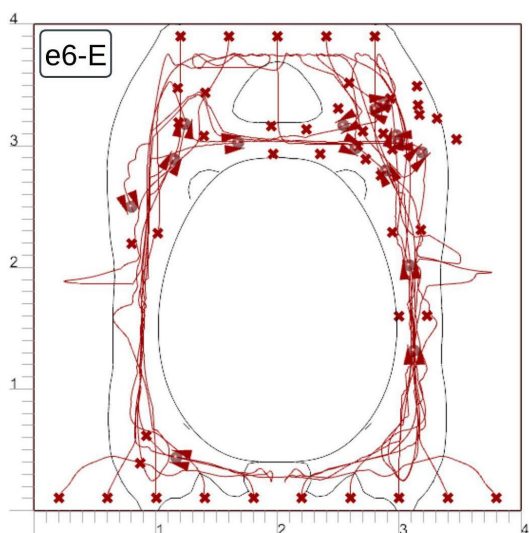
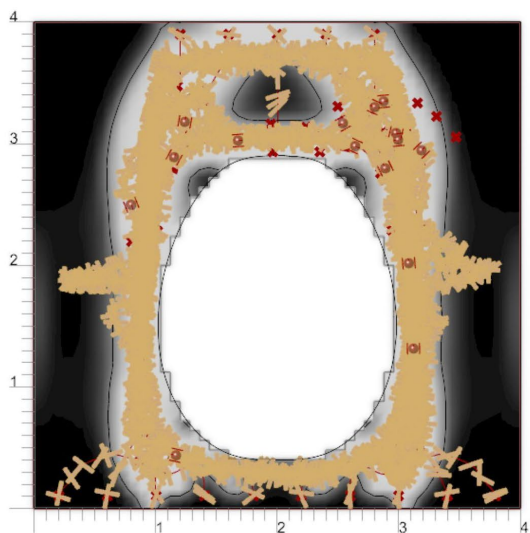
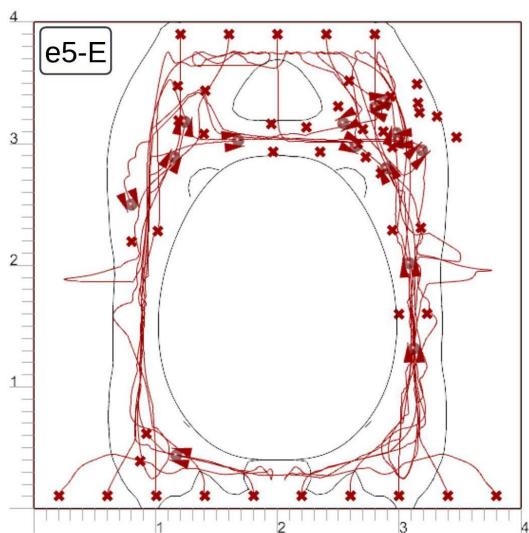
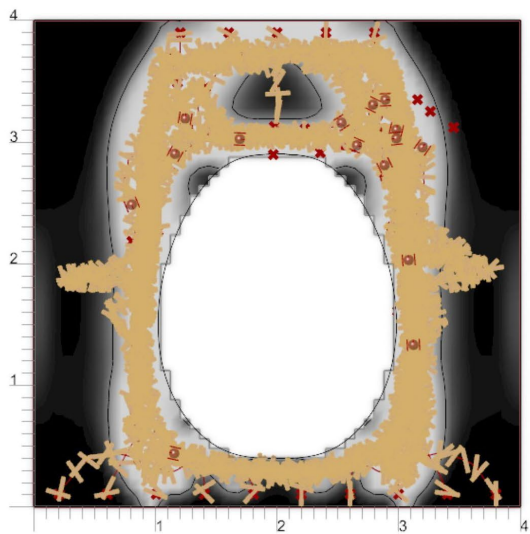
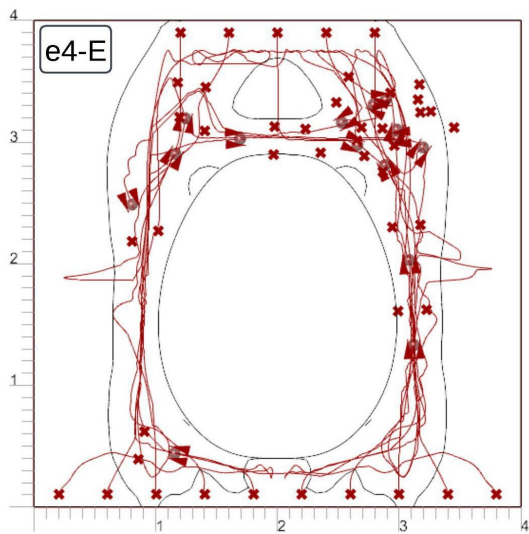
5.2.2. Aplicación del sistema Multi-Agente con quince unidades robóticas.

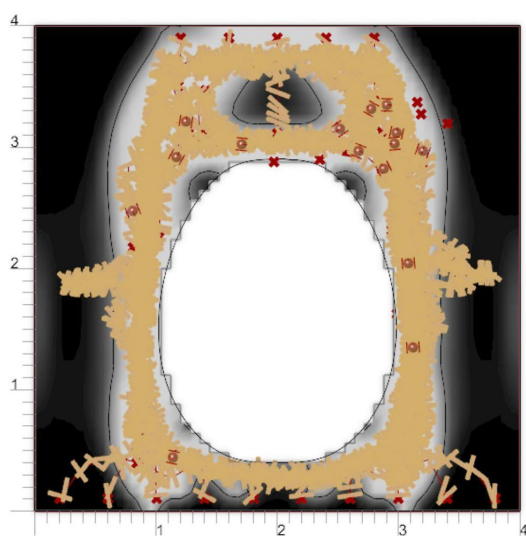
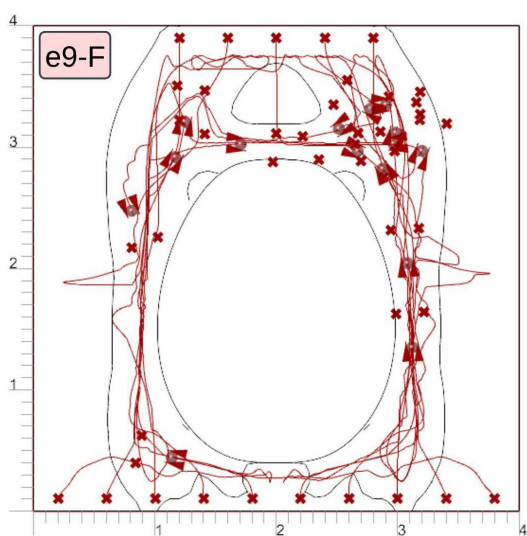
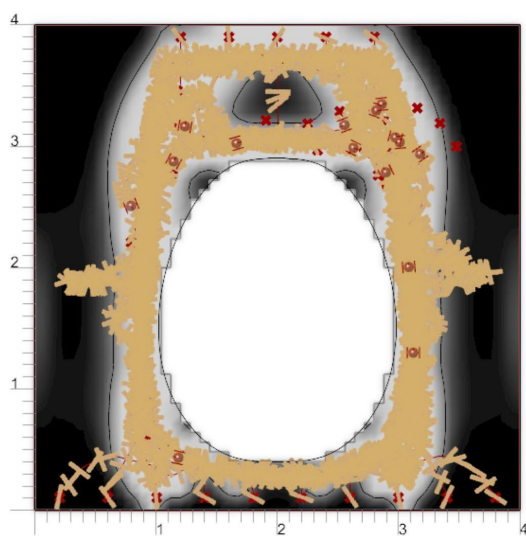
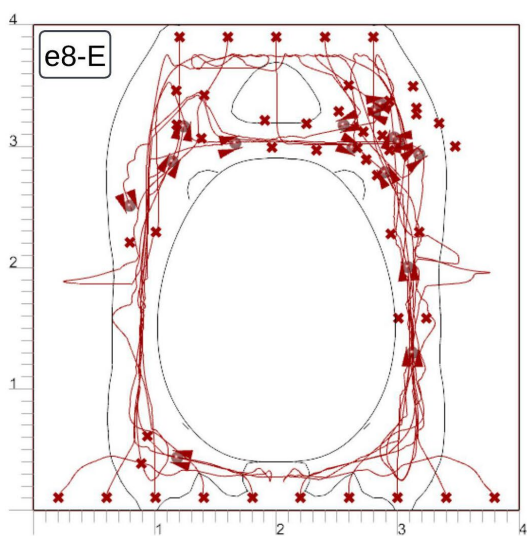
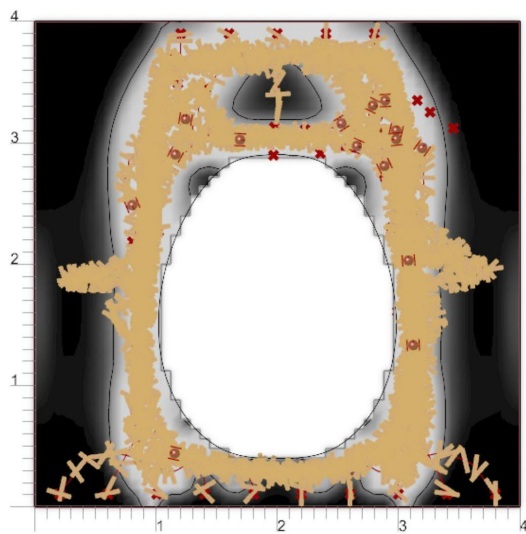
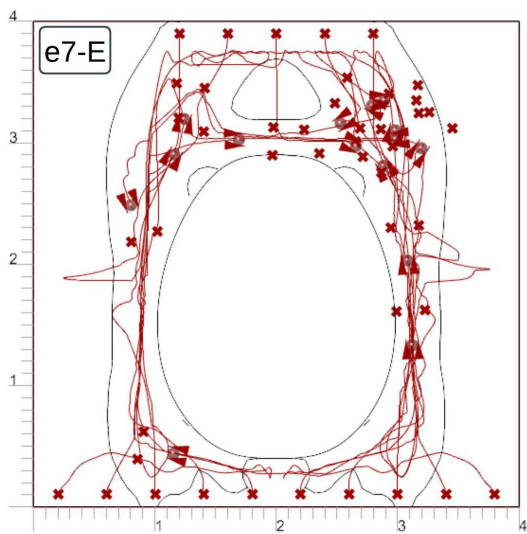
La segunda muestra de aplicación del sistema Multi-Agente del modelo de IC, incluyó veinte ensayos (simulaciones) con quince agentes que representan a las unidades robóticas del SMR (Figura 77). Los ensayos, se exponen a continuación bajo los criterios descritos con anterioridad (en la primera muestra).

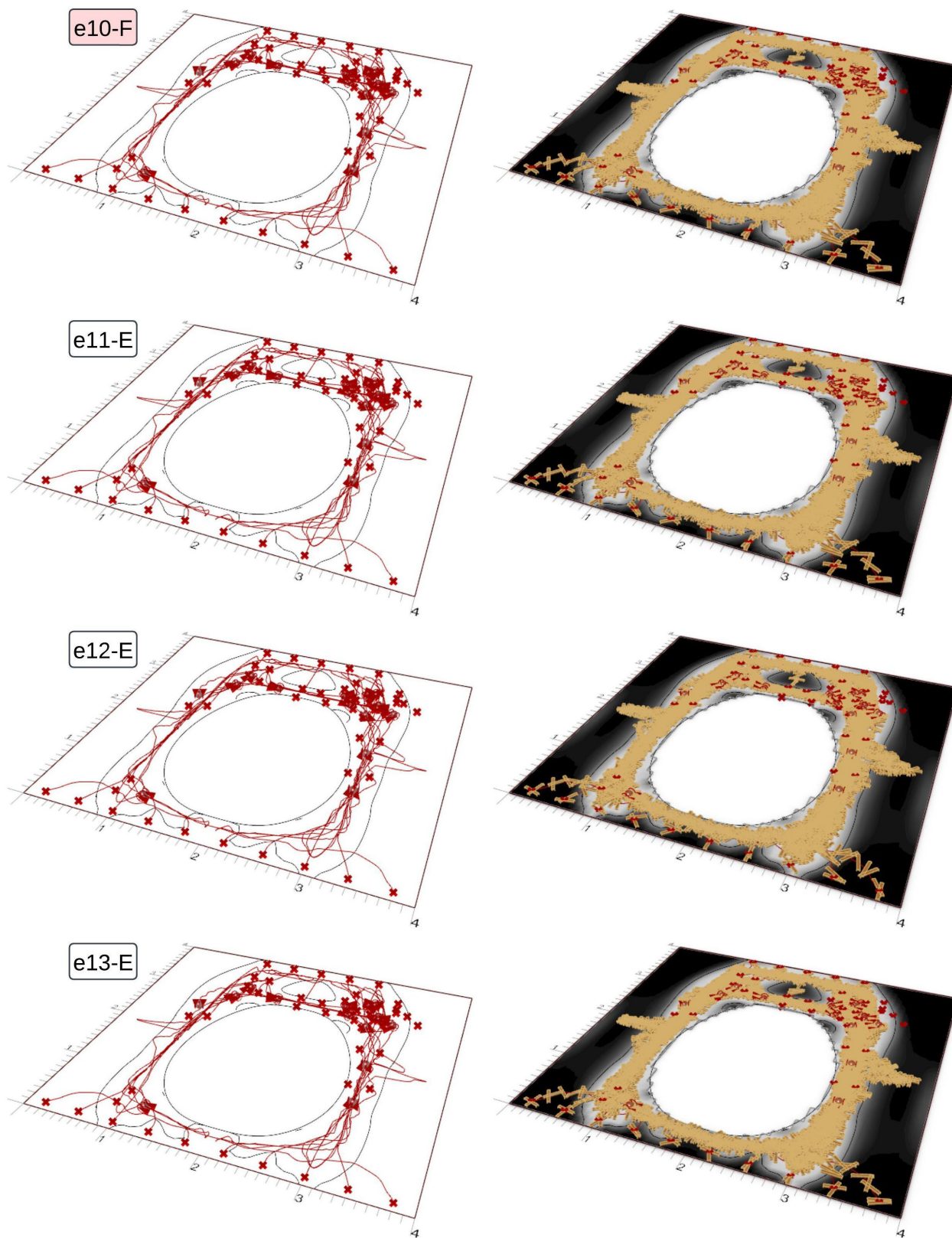
Figura 77.

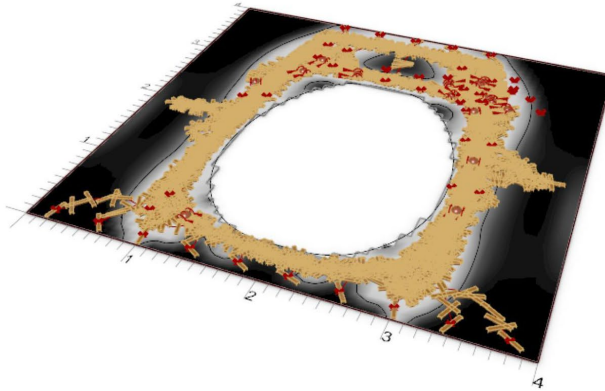
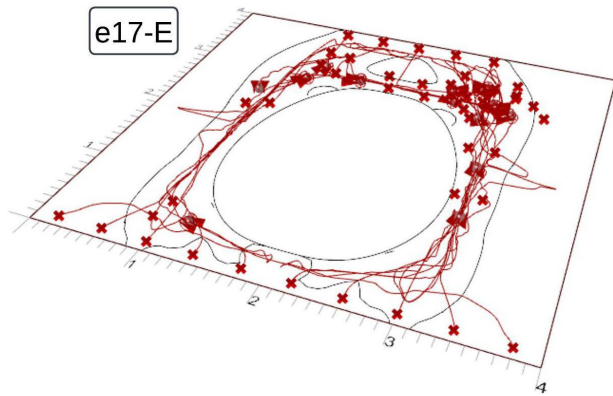
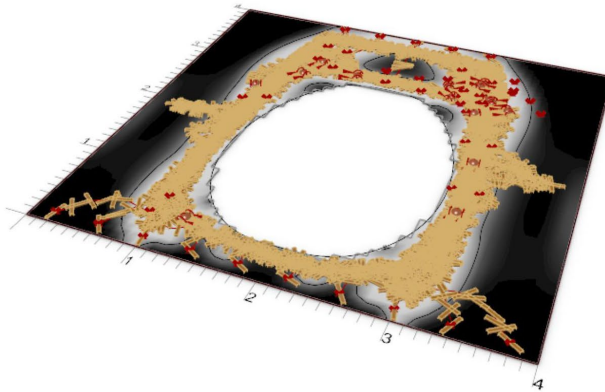
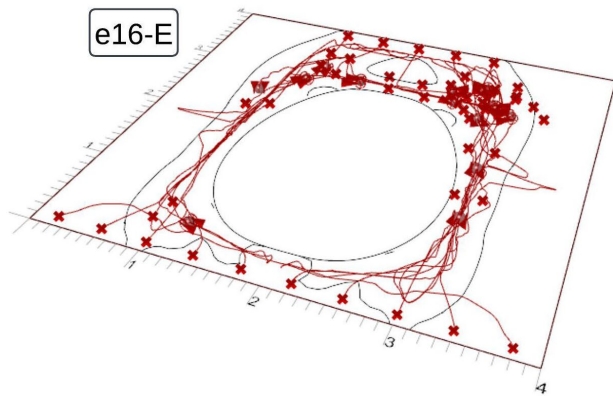
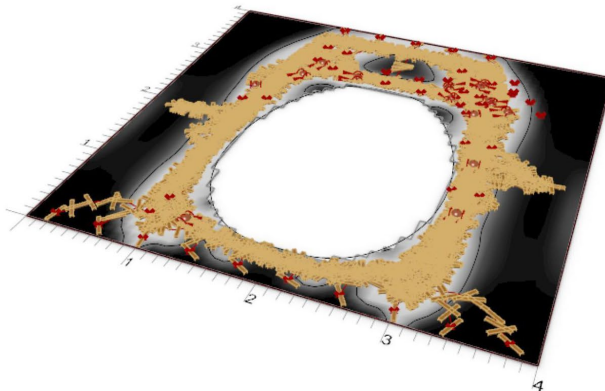
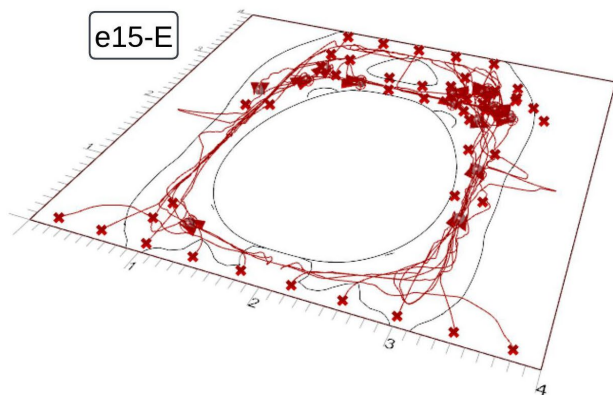
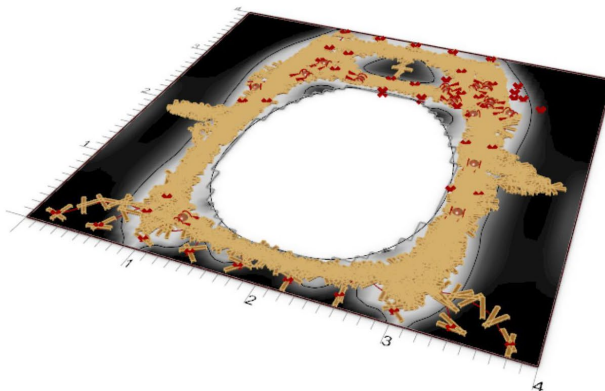
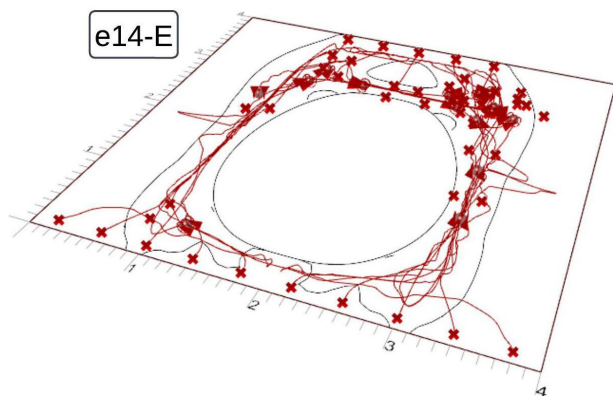
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la segunda muestra del cuasiexperimento.

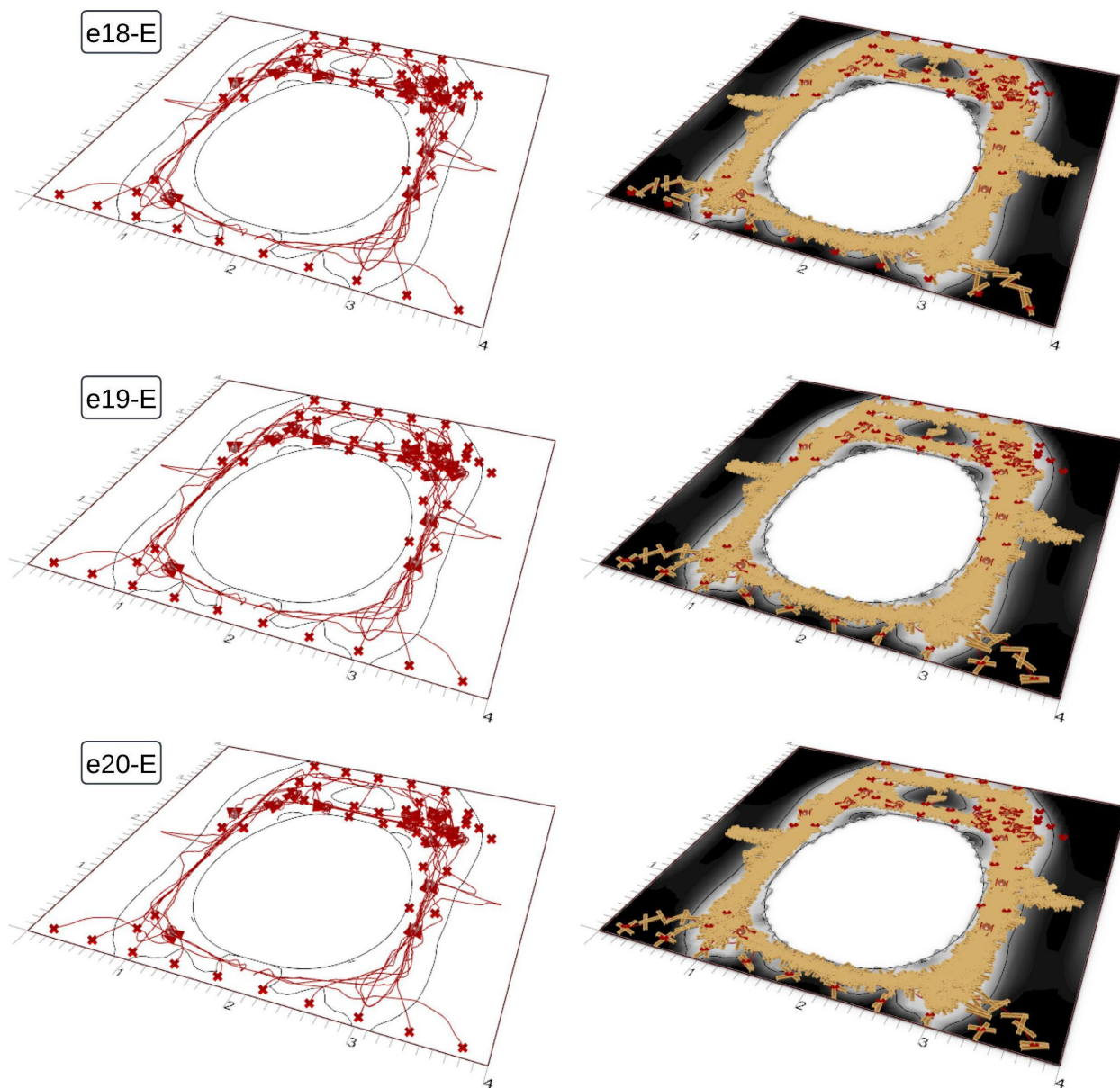












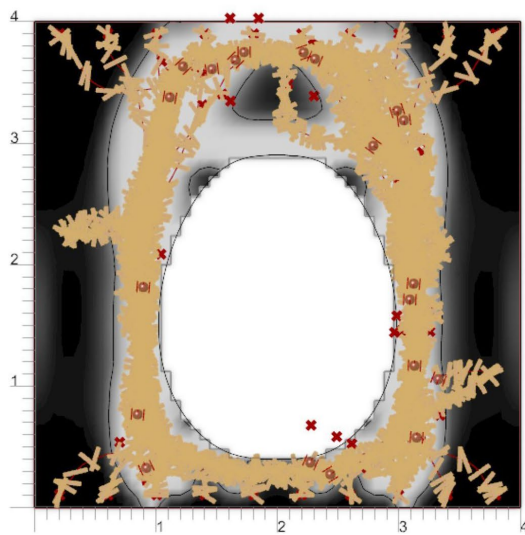
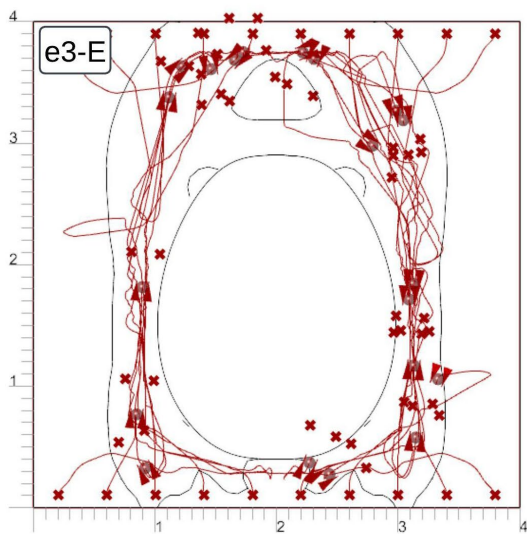
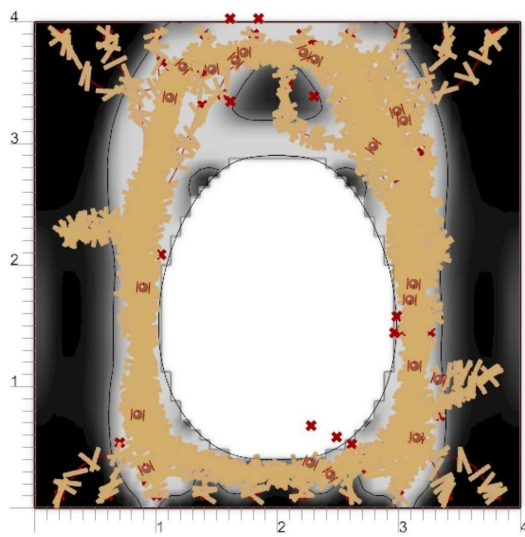
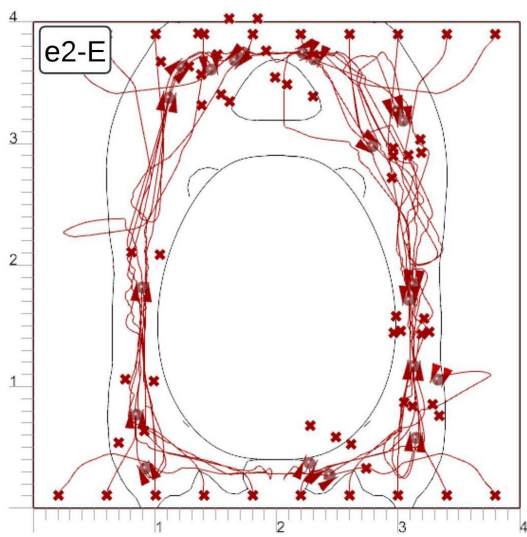
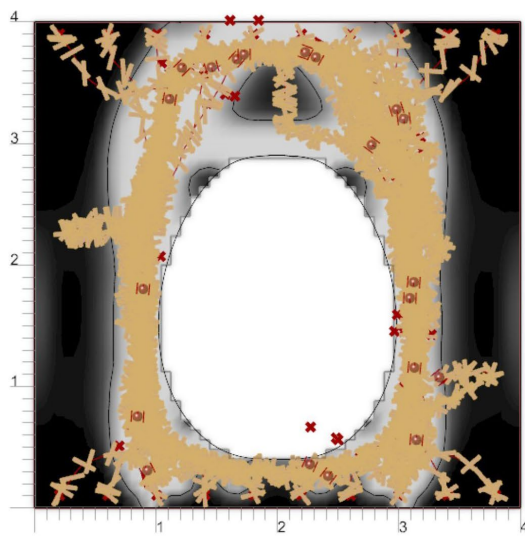
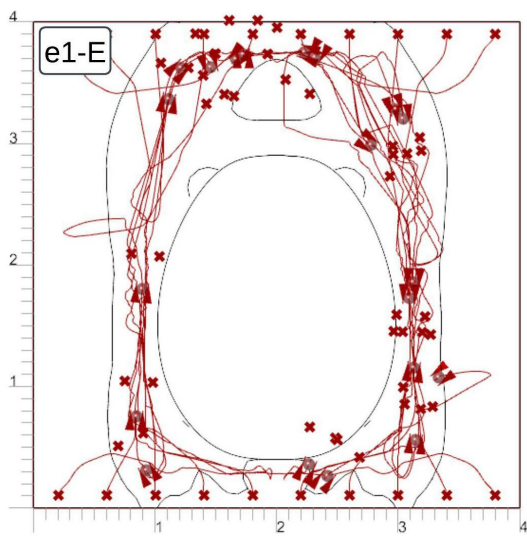
Nota. Elaboración propia (2024).

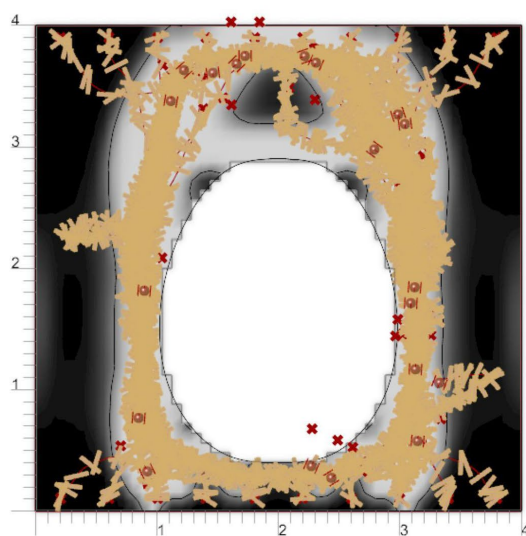
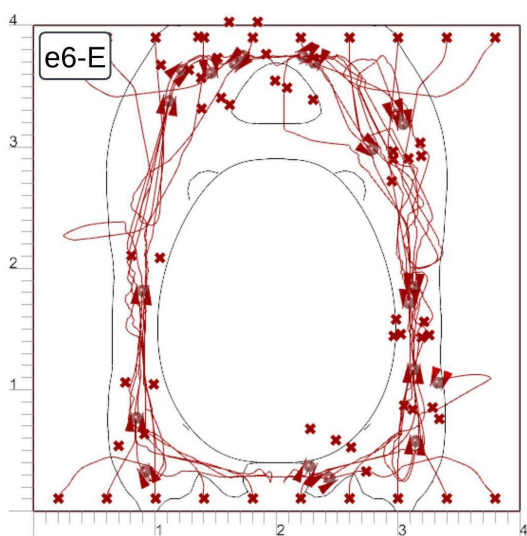
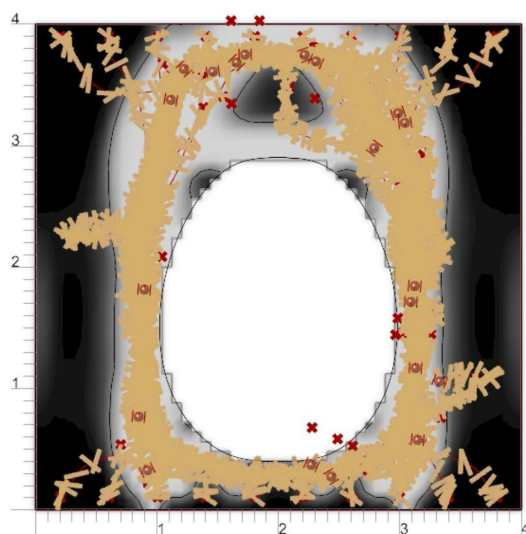
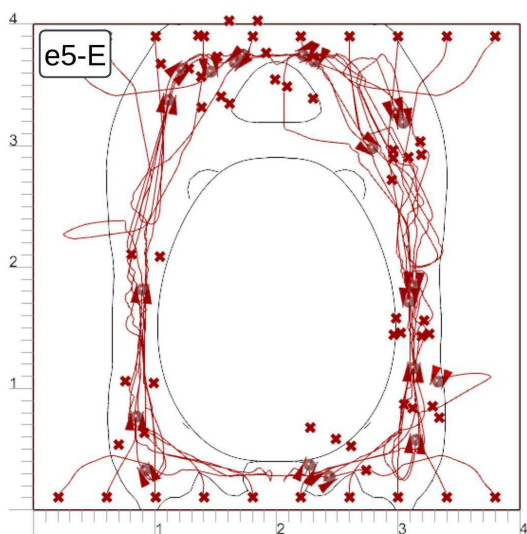
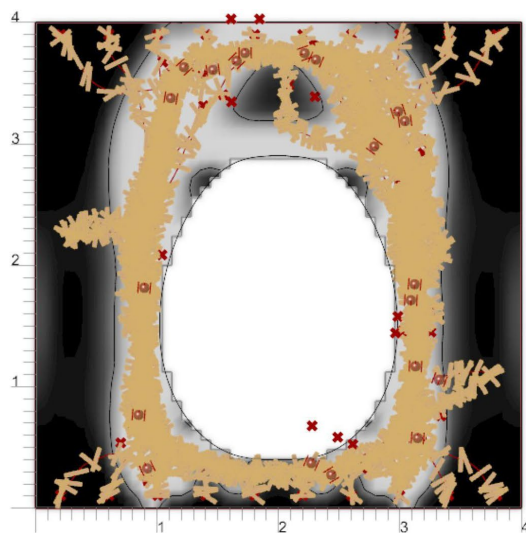
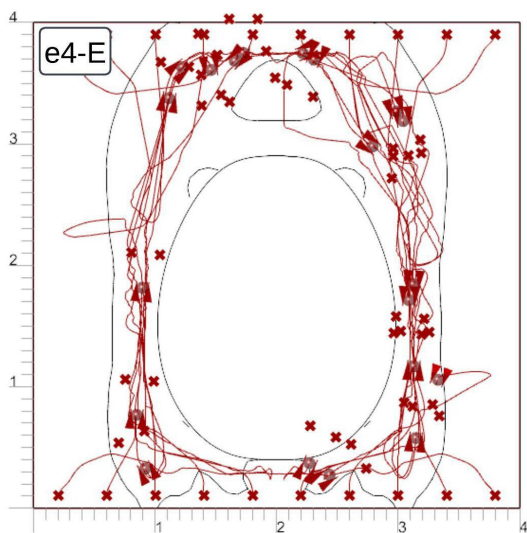
5.2.3. Aplicación del sistema Multi-Agente con veinte unidades robóticas.

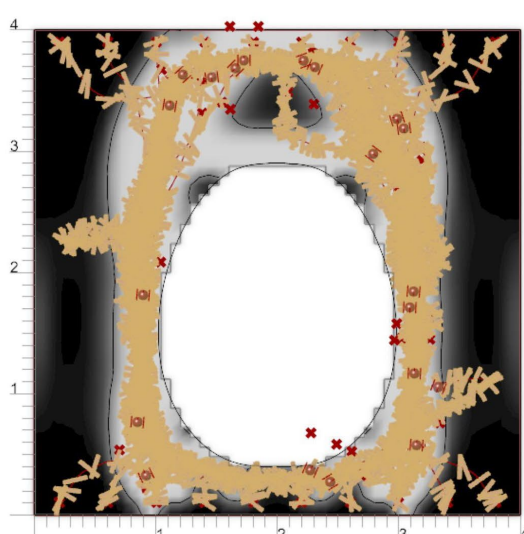
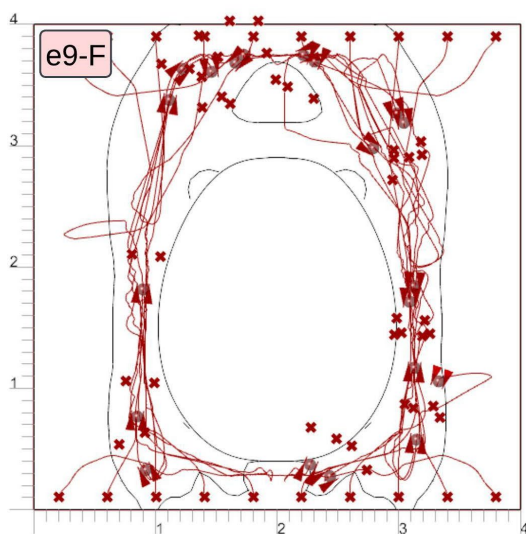
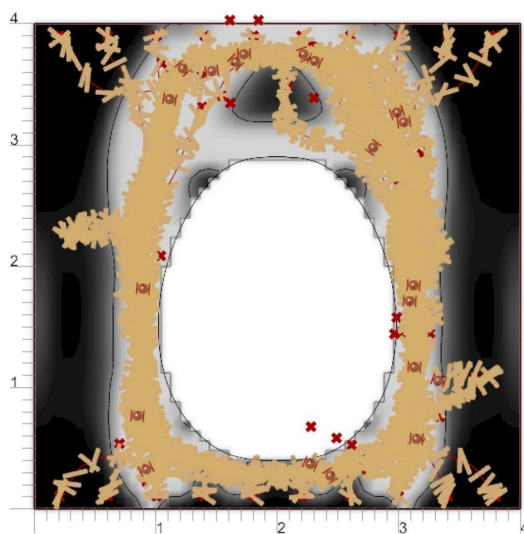
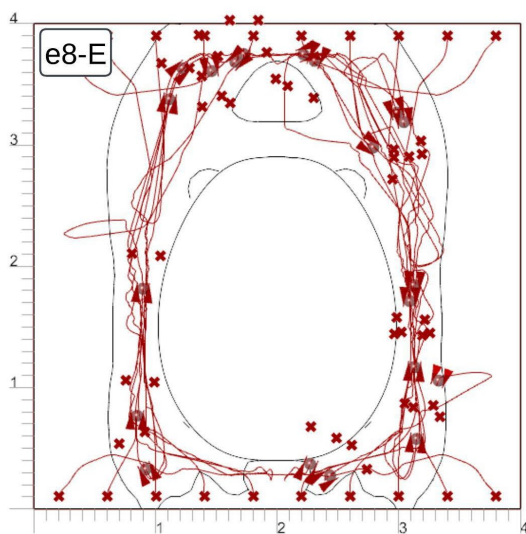
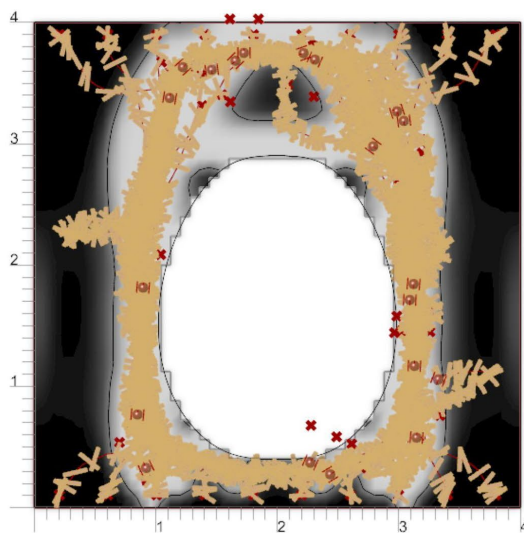
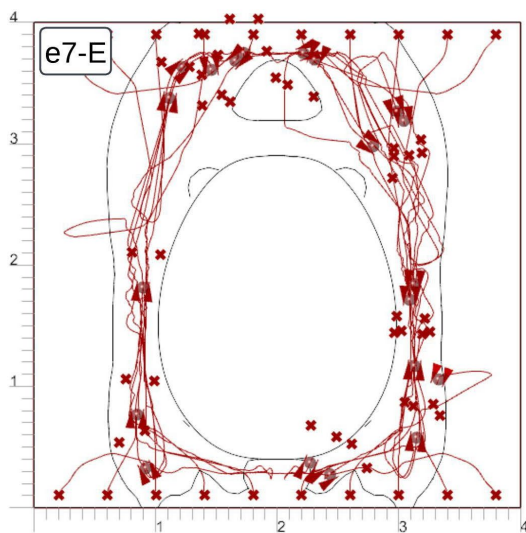
La tercera muestra de aplicación del sistema Multi-Agente del modelo de IC, incluyó veinte ensayos (simulaciones) con veinte agentes que representan a las unidades robóticas del SMR (Figura 78). Los ensayos, se exponen a continuación bajo los criterios descritos con anterioridad (en la primera muestra).

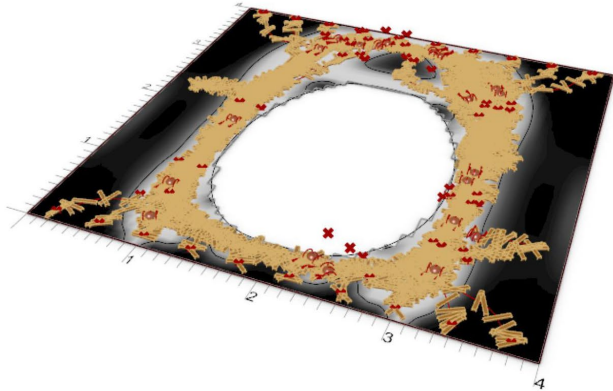
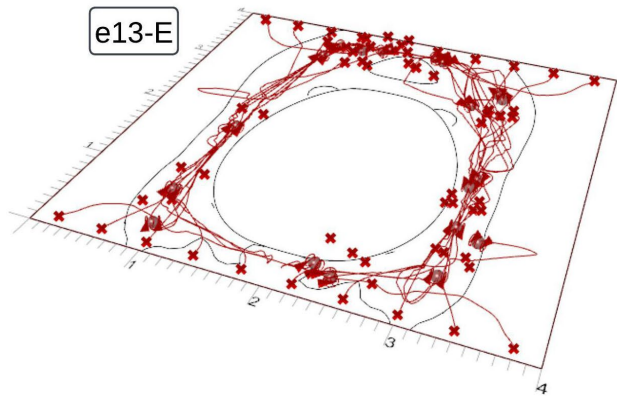
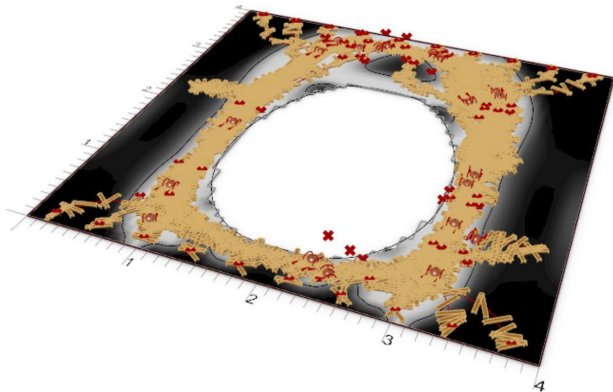
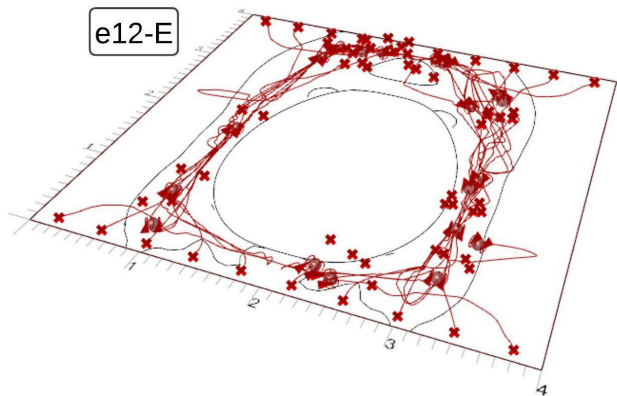
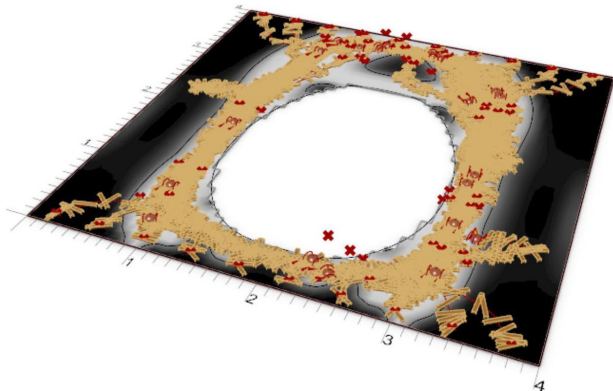
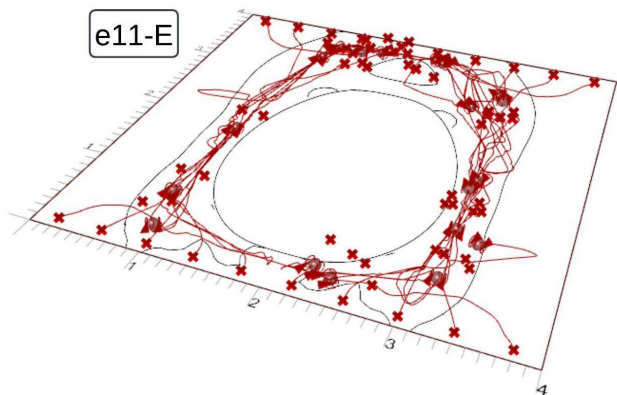
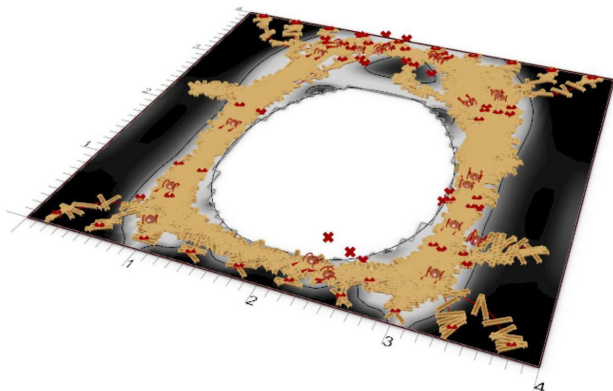
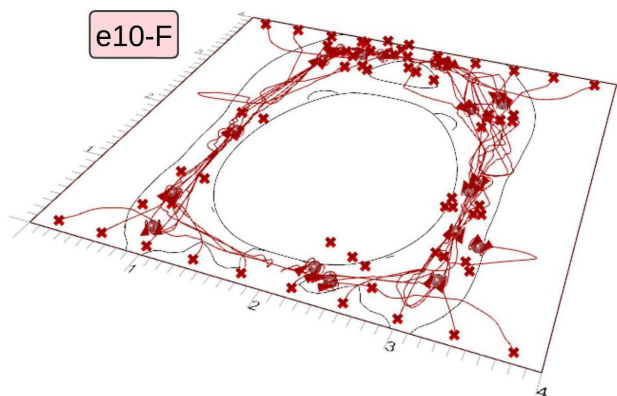
Figura 78.

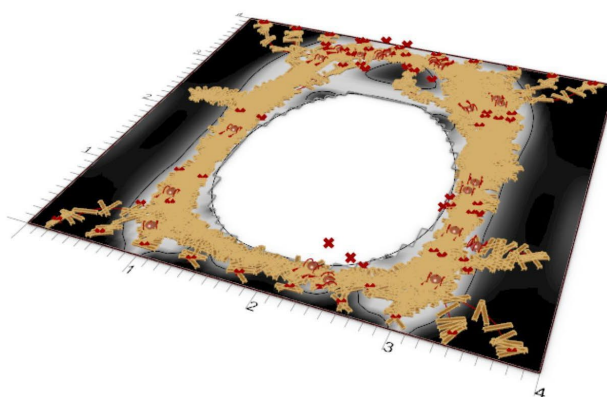
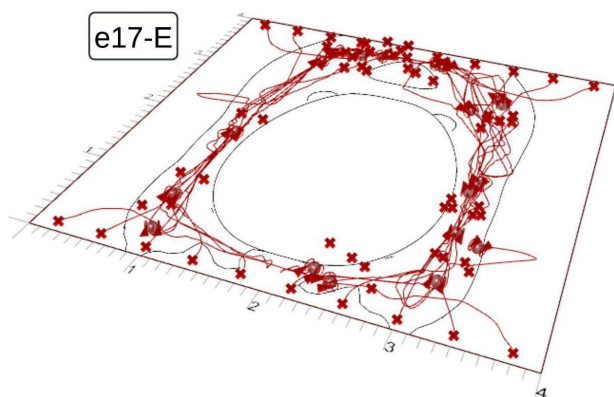
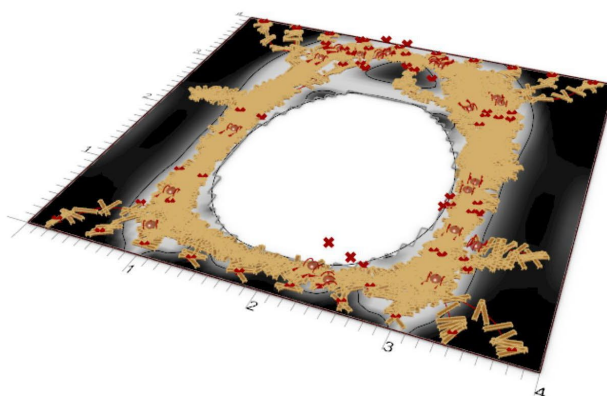
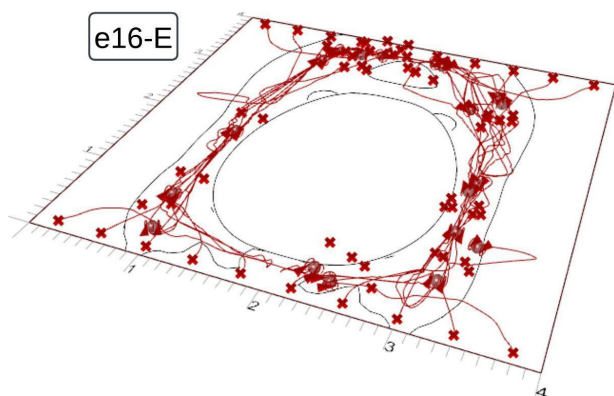
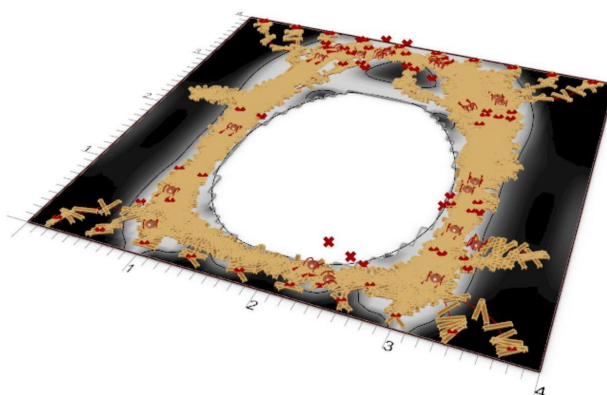
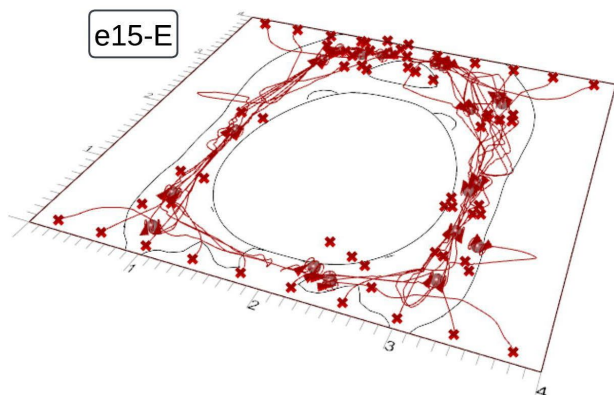
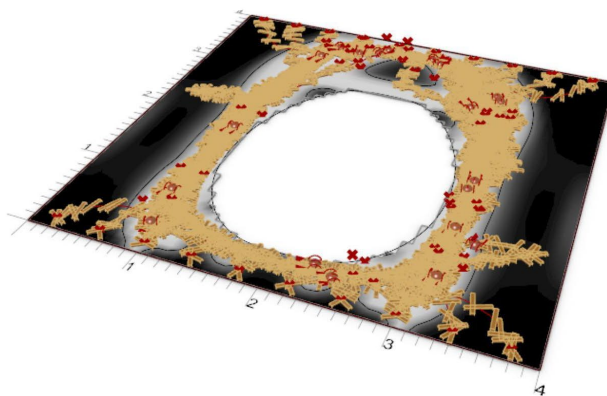
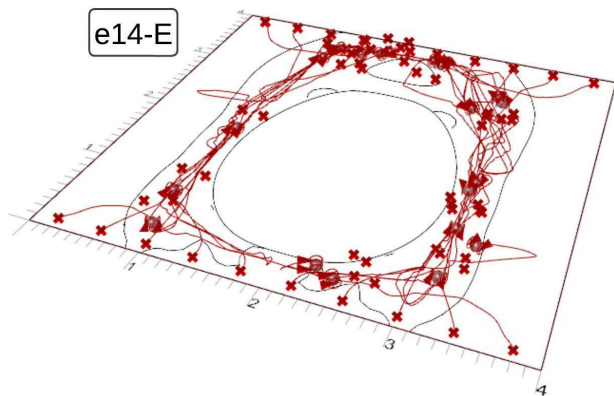
Secuencia de ensayos (del 1 al 20) de la tercera muestra del cuasiexperimento.

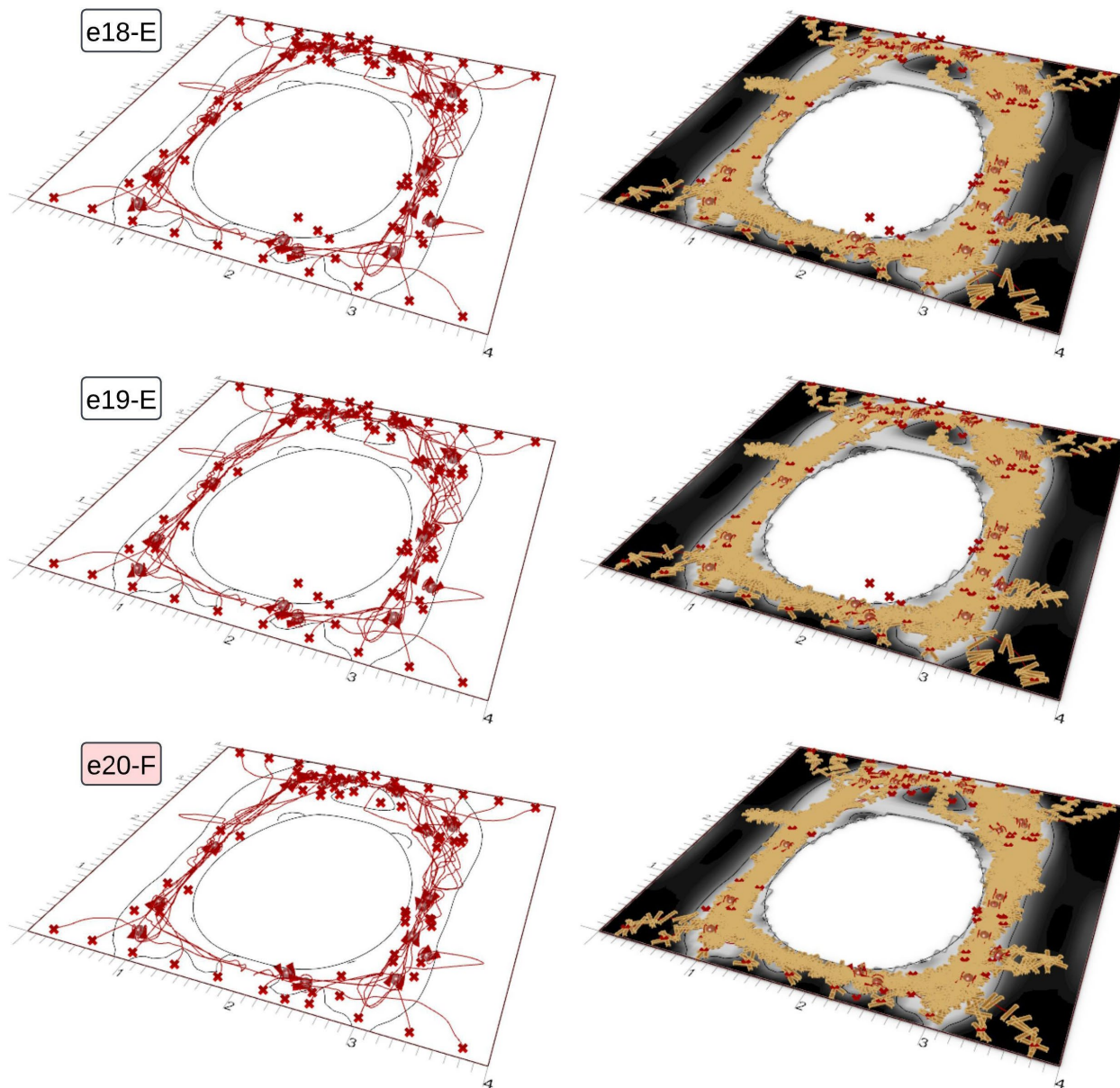












Nota. Elaboración propia (2024).

5.3. Resultados del cuasiexperimento

Los resultados de los ensayos (y muestras) ejercidas mostraron un comportamiento relativamente estable en cuanto a cantidad de agentes (o unidades robóticas) fallidos, cantidad de elementos no dispuestos en las zonas de topología estructural optimizadas y el tiempo que requirió cada ensayo (Tabla 19). Primeramente, en la muestra que corresponde al sistema Multi-Agente de *diez unidades*, se obtuvo solamente *un fracaso*, por ser el ensayo con más elementos

constructivos dispuestos de forma errónea. Fuera de este aspecto, ningún ensayo rompió las reglas establecidas por la *política de interacción* del sistema.

Diferente fue el caso de la segunda muestra, donde el sistema Multi-Agente con *quince unidades* generó *dos ensayos calificados como fracaso*, por superar la tasa de elementos constructivos dispuestos de forma errónea, la cual, fue contrastada con el nivel de significancia que establece la estadística en términos del factor de probabilidad del 0.05 (5%). Aparte, fue agregado *un ensayo más como fallido*, por haber producido la mayor cantidad de elementos constructivos dispuestos de manera incorrecta en la simulación. De esta manera, en total, la segunda muestra *obtuvo tres ensayos fallidos*.

Por otro lado, la tercera muestra, con *veinte agentes*, generó *tres ensayos fallidos*, solamente por haber sido penalizados por producir la mayor cantidad de elementos dispuestos de manera errónea en la simulación. Estas tres simulaciones, obtuvieron la misma cantidad de elementos fallidos en su desenvolvimiento. Fuera de este aspecto, ningún ensayo rompió las reglas establecidas por la *política de interacción*.

Tabla 19.

Relación porcentual de la frecuencia relativa de éxito y fracaso en los ensayos de las tres muestras.

Muestra	Ensayo	Frecuencia	Tasa	Porcentaje (%)	Nota
1A. 10 agentes	Éxitos	19	0.95	95	Un solo fracaso producido por ensayo con mayor cantidad de elementos constructivos dispuestos erróneamente.
	Fracasos	1	0.05	5	
1B. 15 agentes	Éxitos	17	0.85	85	Dos ensayos no cumplieron con la política de desenvolvimiento por superar la tasa significativa de elementos dispuestos erróneamente. El resto fue por mayor cantidad de elementos erróneos.
	Fracasos	3	0.15	15	
1C. 20 agentes	Éxitos	17	0.85	85	Todos los fracasos fueron producidos por ensayos con mayor cantidad de
	Fracasos	3	0.15	15	

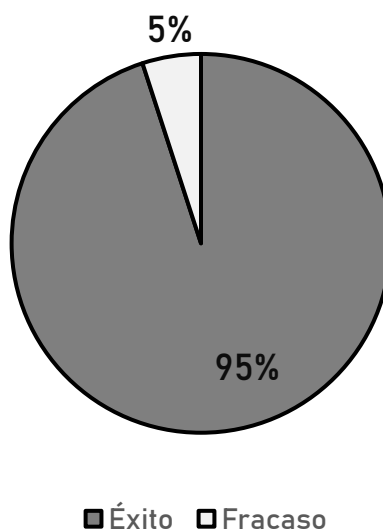
Muestra	Ensayo	Frecuencia	Tasa	Porcentaje (%)	Nota
					elementos constructivos dispuestos erróneamente. Todos obtuvieron la misma cantidad de elementos fallidos.

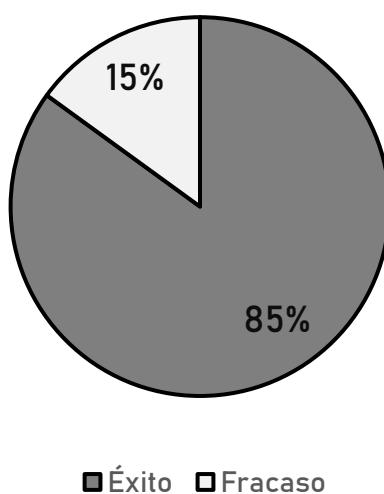
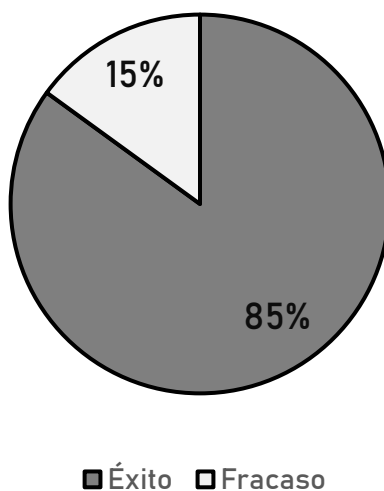
Nota. Elaboración propia (2024).

A pesar de que las tres muestras (constituidas por 60 ensayos en conjunto) generaron pocos ensayos fallidos y tuvieron un comportamiento relativamente estable (este aspecto será discutido más adelante), lo cierto es que, en cuestión de porcentaje, solamente la primera muestra obtuvo el 5% de frecuencia no exitosa (Figura 79a), el cual corresponde, a la proporción de un sólo ensayo fallido en una muestra constituida por 20 simulaciones y a una tasa considerada en el nivel de significancia, que no rompa con los límites de confianza de una distribución normal estadística. Por tanto, esta muestra fue la única considerada como exitosa de manera global. El resto de las muestras, alcanzaron el 15% de ensayos calificados como fracaso, razón por la cual, fueron consideradas como fallidas (Figura 79b y 79c).

Figura 79.

Frecuencia relativa de éxito y fracaso en los ensayos: (a) primera muestra (10 agentes) -arriba-, (b) segunda muestra (15 agentes) -medio-, (c) tercera muestra (20 agentes) -abajo-.





Nota. Elaboración propia (2024).

A continuación, es mostrado el recuento de resultados obtenidos por cada muestra (Tabla 20). Cada una es indicada de la siguiente manera: (a) número de muestra, (b) número de ensayo (del 1 al 20), (c) resultado general por cada ensayo (éxito o fracaso), (d) duración del ensayo, (e) duración en minutos decimales, (f) cantidad de elementos (constructivos) dispuestos correctamente, (g) cantidad de elementos dispuestos erróneamente, (h) cantidad de robots fallidos.

Tabla 20.*Recuento de resultados por muestra en el cuasiexperimento.*

Muestra	Ensayo	Resultado	Duración (hh:mm:ss)	Minutos decimales	Elementos exitosos	Elementos fallidos	Robots fallidos
1A. 10 agentes	E1	Éxito	00:01:33	1.55	2,450	50	2 (d)
	E2	Éxito	00:01:33	1.55	2,447	53	2 (d)
	E3	Éxito	00:01:34	1.57	2,448	52	2 (d)
	E4	Éxito	00:01:32	1.53	2,436	64	2 (d)
	E5	Éxito	00:01:35	1.58	2,444	56	2 (d)
	E6	Éxito	00:01:32	1.53	2,441	59	3 (d)
	E7	Éxito	00:01:31	1.52	2,443	57	3 (2d, 1c)
	E8	Éxito	00:01:32	1.53	2,455	45	3 (2d, 1c)
	E9	Éxito	00:01:32	1.53	2,432	68	3 (2d, 1c)
	E10	Éxito	00:01:31	1.52	2,414	86	3 (2d, 1c)
	E11	Éxito	00:01:33	1.55	2,425	75	3 (c)
	E12	Éxito	00:01:32	1.53	2,427	73	3 (c)
	E13	Fracaso	00:01:34	1.57	2,388	112	3 (c)
	E14	Éxito	00:01:42	1.70	2,435	65	3 (1d, 2c)
	E15	Éxito	00:01:38	1.63	2,431	69	3 (1d, 2c)
	E16	Éxito	00:01:39	1.65	2,428	72	3 (c)
	E17	Éxito	00:01:39	1.65	2,434	66	3 (c)
	E18	Éxito	00:01:39	1.65	2,425	75	3 (c)
	E19	Éxito	00:01:41	1.68	2,432	68	3 (c)
	E20	Éxito	00:01:38	1.63	2,422	78	3 (c)
1B. 15 agentes	E1	Éxito	00:01:26	1.43	2,348	116	4 (3d, 1c)
	E2	Éxito	00:01:25	1.42	2,382	118	4 (3d, 1c)
	E3	Fracaso	00:01:25	1.42	2,374	126	4 (3d, 1c)
	E4	Éxito	00:01:26	1.43	2,380	120	4 (3d, 1c)
	E5	Éxito	00:01:26	1.43	2,376	124	4 (3d, 1c)
	E6	Éxito	00:01:26	1.43	2,376	124	5 (3d, 2c)
	E7	Éxito	00:01:26	1.43	2,379	121	5 (3d, 2c)
	E8	Éxito	00:01:26	1.43	2,379	121	5 (3d, 2c)
	E9	Fracaso	00:01:25	1.42	2,375	125	4 (3d, 1c)
	E10	Fracaso	00:01:27	1.45	2,373	127	5 (3d, 2c)
	E11	Éxito	00:01:27	1.45	2,377	123	4 (3d, 1c)
	E12	Éxito	00:01:25	1.42	2,380	120	4 (3d, 1c)
	E13	Éxito	00:01:25	1.42	2,378	122	4 (3d, 1c)
	E14	Éxito	00:01:26	1.43	2,378	122	4 (3d, 1c)
	E15	Éxito	00:01:25	1.42	2,377	123	4 (3d, 1c)
	E16	Éxito	00:01:25	1.42	2,379	121	4 (3d, 1c)
	E17	Éxito	00:01:27	1.45	2,384	116	4 (3d, 1c)
	E18	Éxito	00:01:28	1.47	2,378	122	4 (3d, 1c)
	E19	Éxito	00:01:26	1.43	2,381	119	4 (3d, 1c)
	E20	Éxito	00:01:27	1.45	2,380	120	4 (3d, 1c)
1C. 20 agentes	E1	Éxito	00:01:19	1.32	2,421	79	3 (d)
	E2	Éxito	00:01:19	1.32	2,412	88	3 (d)
	E3	Éxito	00:01:20	1.33	2,413	87	3 (d)
	E4	Éxito	00:01:19	1.32	2,411	89	4 (3d, 1c)

Muestra	Ensayo	Resultado	Duración (hh:mm:ss)	Minutos decimales	Elementos exitosos	Elementos fallidos	Robots fallidos
	E5	Éxito	00:01:19	1.32	2,411	89	4 (3d, 1c)
	E6	Éxito	00:01:19	1.32	2,399	101	5 (3d, 2c)
	E7	Éxito	00:01:19	1.32	2,407	93	4 (3d, 1c)
	E8	Éxito	00:01:19	1.32	2,403	97	4 (3d, 1c)
	E9	Fracaso	00:01:21	1.35	2,392	108	4 (3d, 1c)
	E10	Fracaso	00:01:19	1.32	2,392	108	4 (3d, 1c)
	E11	Éxito	00:01:16	1.27	2399	101	5 (3d, 2c)
	E12	Éxito	00:01:15	1.25	2412	88	5 (3d, 2c)
	E13	Éxito	00:01:15	1.25	2397	103	5 (3d, 2c)
	E14	Éxito	00:01:16	1.27	2394	106	5 (3d, 2c)
	E15	Éxito	00:01:15	1.25	2395	105	4 (3d, 1c)
	E16	Éxito	00:01:15	1.25	2395	105	5 (3d, 2c)
	E17	Éxito	00:01:15	1.25	2395	105	4 (3d, 1c)
	E18	Éxito	00:01:15	1.25	2395	105	4 (3d, 1c)
	E19	Éxito	00:01:15	1.25	2398	102	4 (3d, 1c)
	E20	Fracaso	00:01:16	1.27	2392	108	4 (3d, 1c)

Nota. Tipo de falla de robot: d: *desvío*, c: *colisión*, sm: *sin movimiento*, ds: *desorientación*, fs:

falla en sensor. Elaboración propia (2024).

5.3.1. Datos estadísticos.

Las frecuencias de éxito y fracaso, cantidad de robots fallidos por desvío, colisión u otro motivo, así como la consecuente disposición fallida de elementos constructivos por parte de los agentes en los ensayos, arrojaron los siguientes datos que contribuyeron al análisis estadístico descriptivo e inferencial (Tabla 21).

Tabla 21.

Datos estadísticos: (a) duración de ensayos en minutos decimales -arriba-, (b) robots fallidos (agentes) -medio-, (c) elementos constructivos dispuestos de manera fallida en los ensayos -abajo-.

(a) Muestra	Media (μ)	Mediana	Moda	Desviación estándar (σ)	Desviación media	Varianza muestral (σ^2)
1A. 10 agentes	1.58	1.56	1.53	0.059481188	0.051666667	0.003538012
1B. 15 agentes	1.43	1.43	1.43	0.01478402	0.011083333	0.000218567
1C. 20 agentes	1.29	1.29	1.32	0.035499773	0.033333333	0.001260234

(b) Muestra	Media (μ)	Mediana	Moda	Desviación estándar (σ)	Desviación media	Varianza muestral (σ^2)
1A. 10 agentes	2.75	3.00	3.00	0.444261658	0.375	0.197368421
1B. 15 agentes	4.20	4.00	4.00	0.410391341	0.320	0.168421053
1C. 20 agentes	4.15	4.00	4.00	0.670820393	0.510	0.450

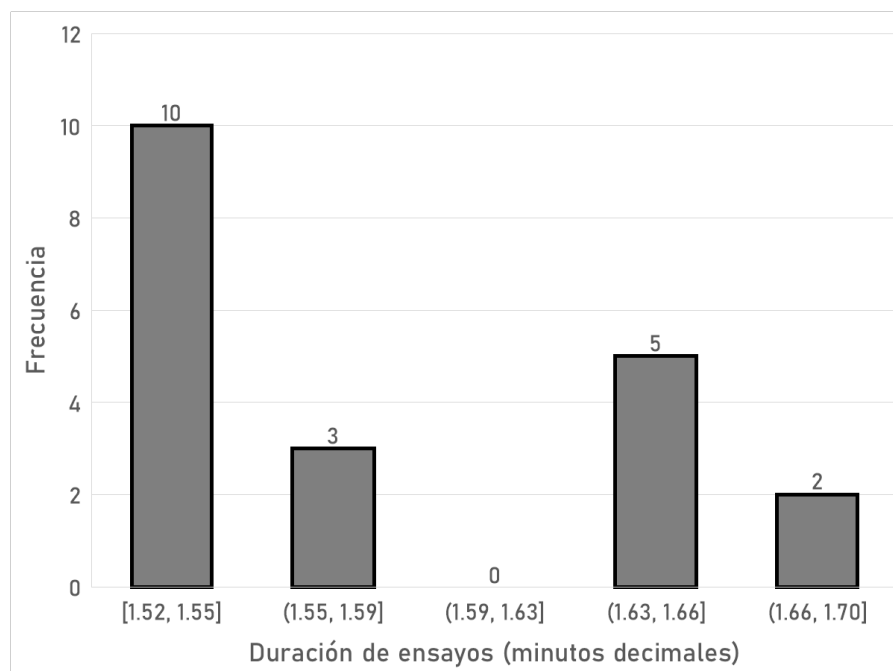
(c) Muestra	Media (μ)	Mediana	Moda	Desviación estándar (σ)	Desviación media	Varianza muestral (σ^2)
1A. 10 agentes	67.15	67	68	14.85818931	10.450	220.7657895
1B. 15 agentes	121.5	121.5	120	2.964704654	2.300	8.789473684
1C. 20 agentes	98.35	101.5	105	8.845308004	7.680	78.23947368

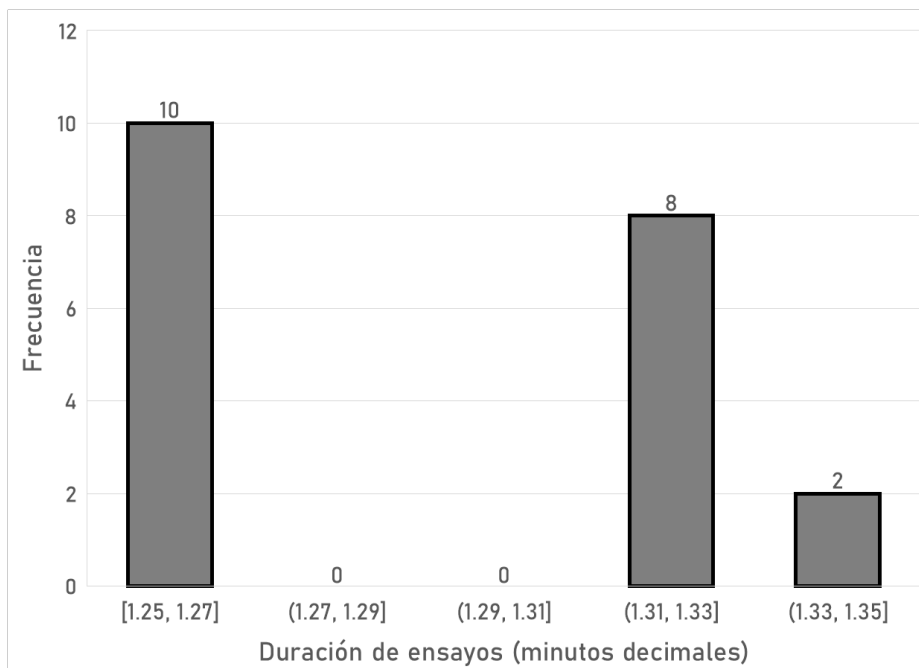
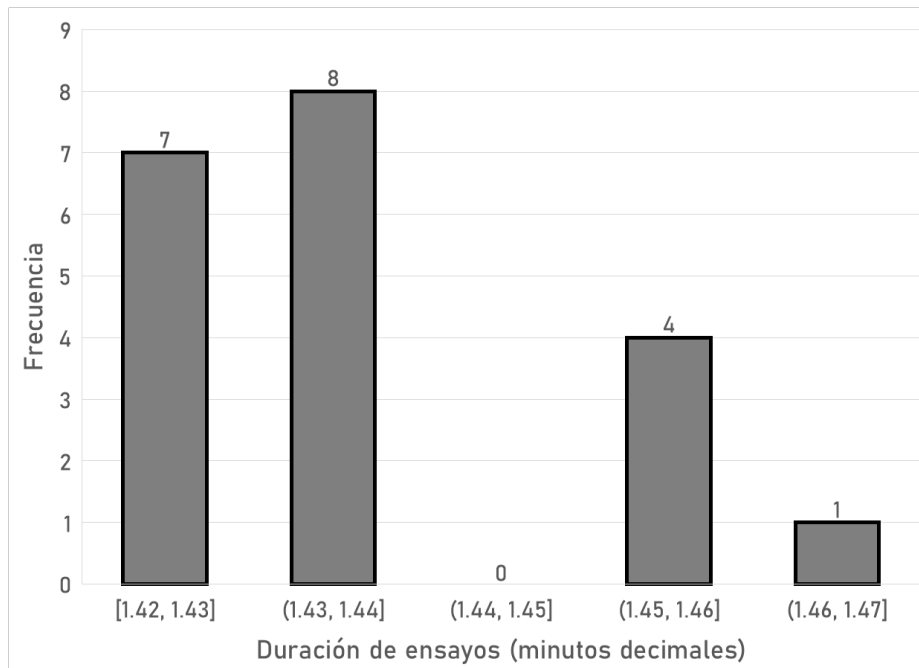
Nota. Elaboración propia (2024).

A continuación, es mostrado el histograma de frecuencias de la duración de cada ensayo (en minutos decimales) de todas las muestras. Las gráficas exponen la frecuencia que obtuvieron los ensayos en el eje Y, y los minutos decimales organizados en cinco grupos de análisis en el eje X (Figura 80).

Figura 80.

Histograma de frecuencias: duración de los ensayos -minutos decimales-. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.





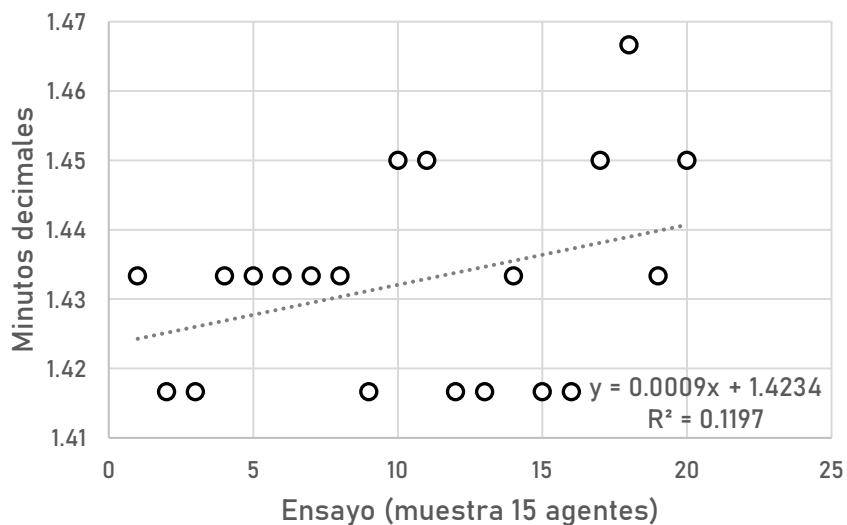
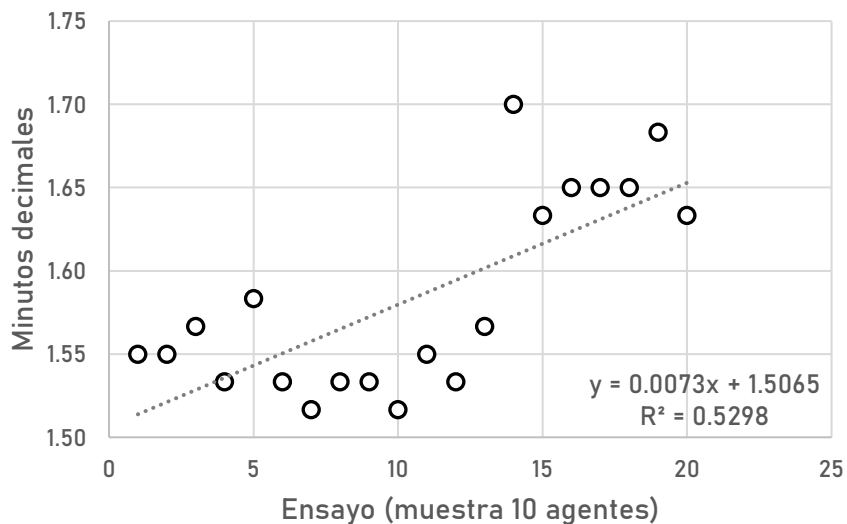
Nota. Elaboración propia (2024).

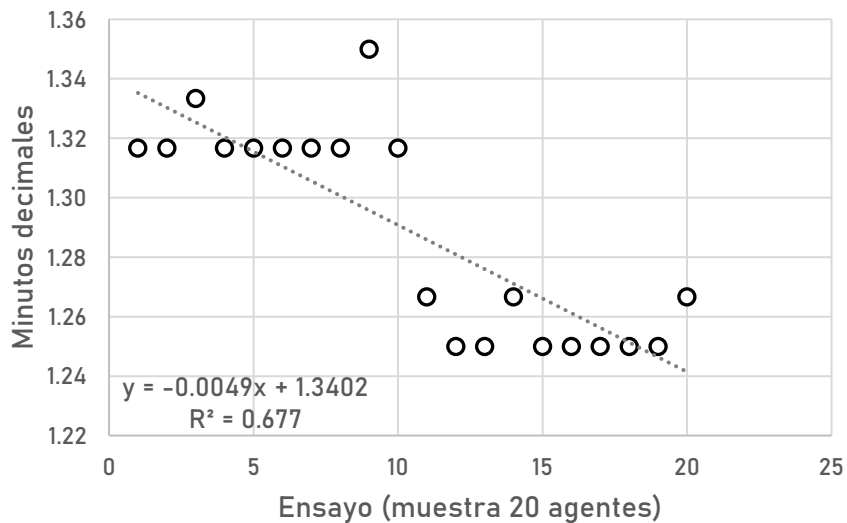
También, se expone el diagrama de dispersión de la duración de cada ensayo (en minutos decimales) de todas las muestras. Las gráficas presentan de manera puntual, la correlación del tiempo en minutos decimales de duración en el eje Y con respecto a cada ensayo en orden

numérico en el eje X. También, cada gráfica muestra el coeficiente de determinación R^2 y la ecuación inferencial de las muestras (Figura 81).

Figura 81.

Diagrama de dispersión: duración de ensayos -minutos decimales-. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.



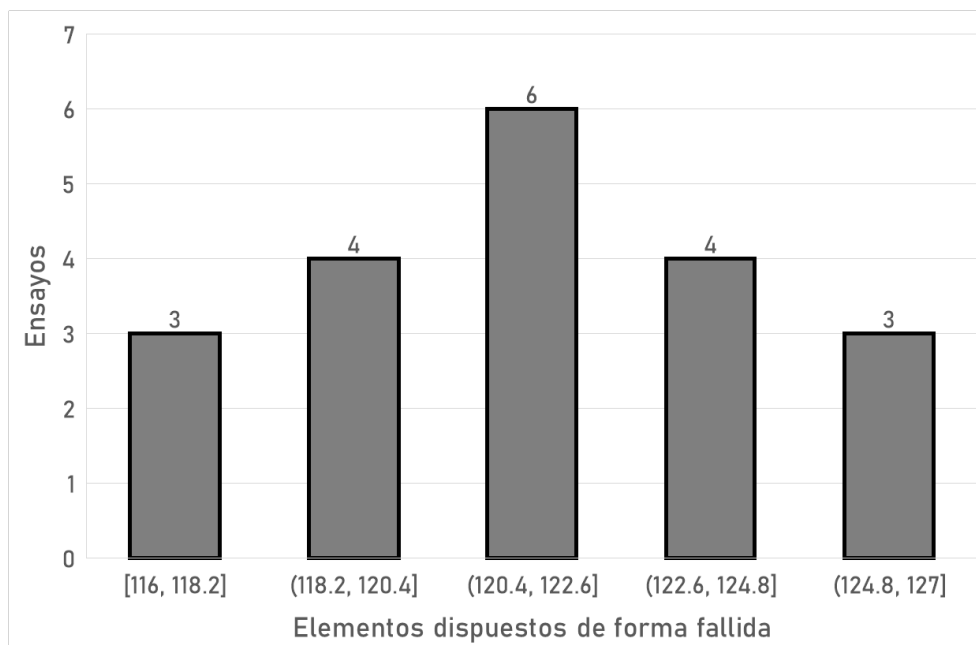
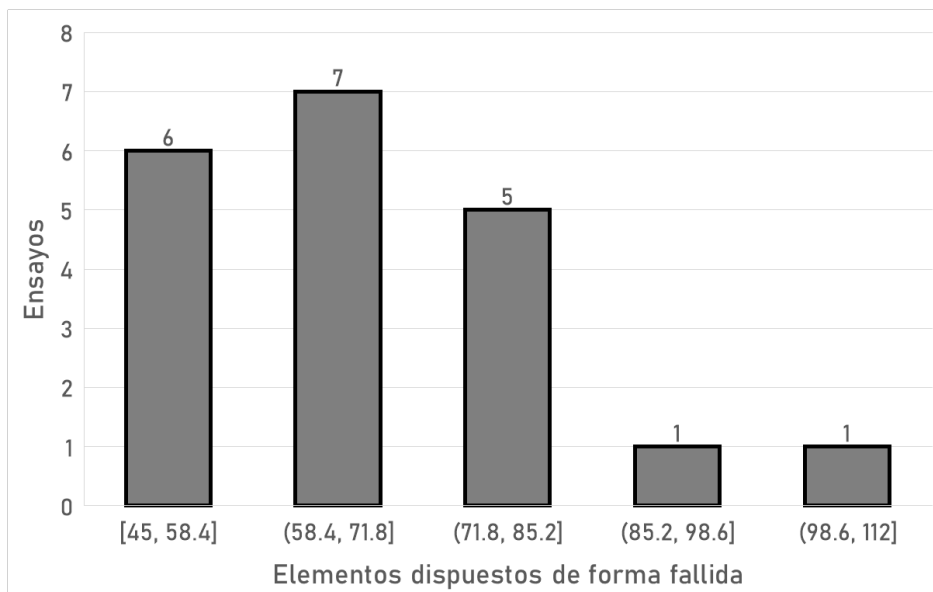


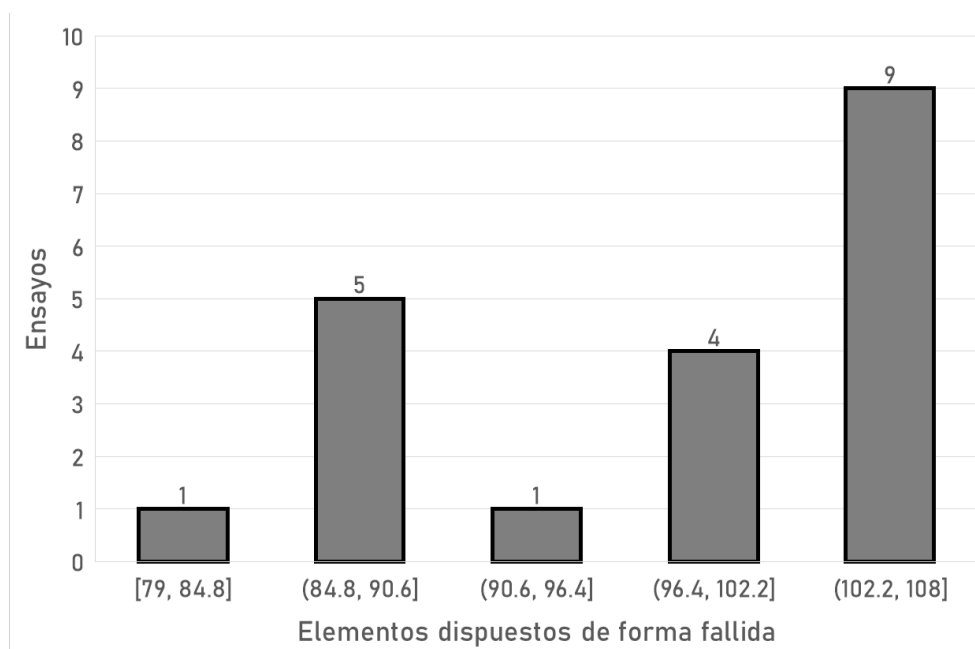
Nota. Elaboración propia (2024).

A continuación, es mostrado el histograma de frecuencias de los elementos constructivos dispuestos de manera fallida por los agentes en cada ensayo de todas las muestras. Las gráficas exponen la frecuencia que obtuvieron los ensayos en el eje Y, y los elementos fallidos organizados en cinco grupos de análisis en el eje X (Figura 82).

Figura 82.

Histograma de frecuencias: elementos constructivos fallidos. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.



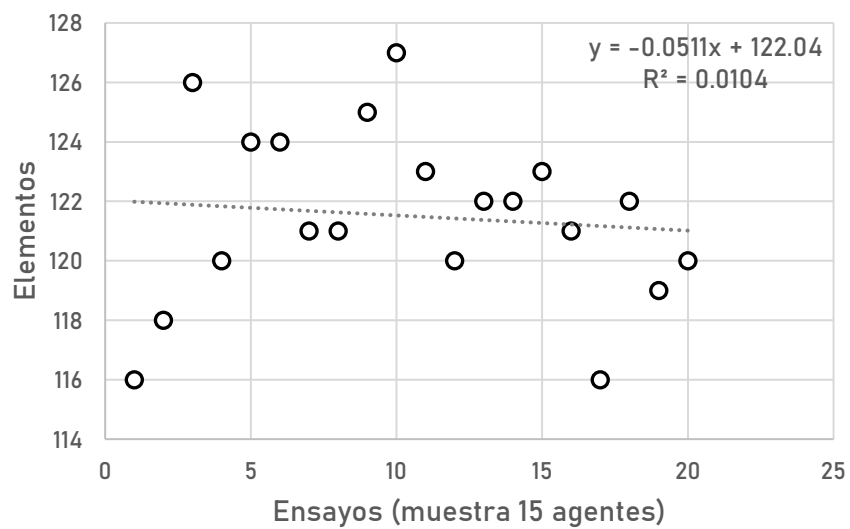
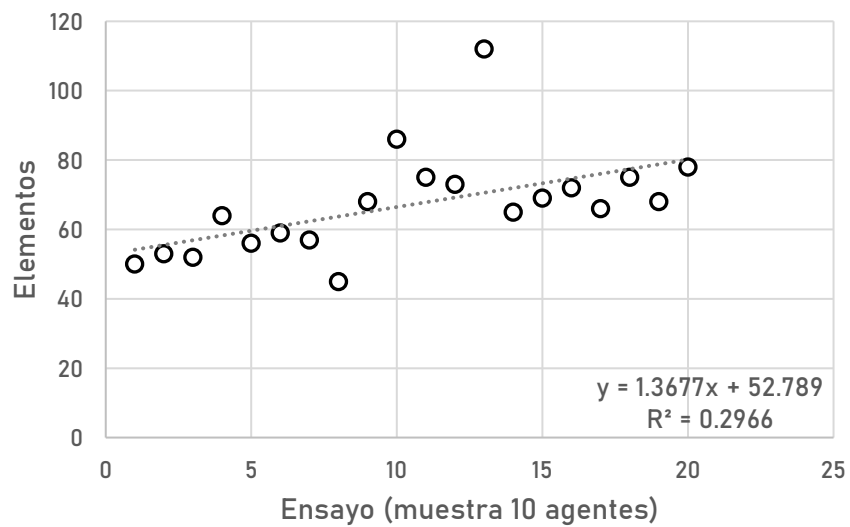


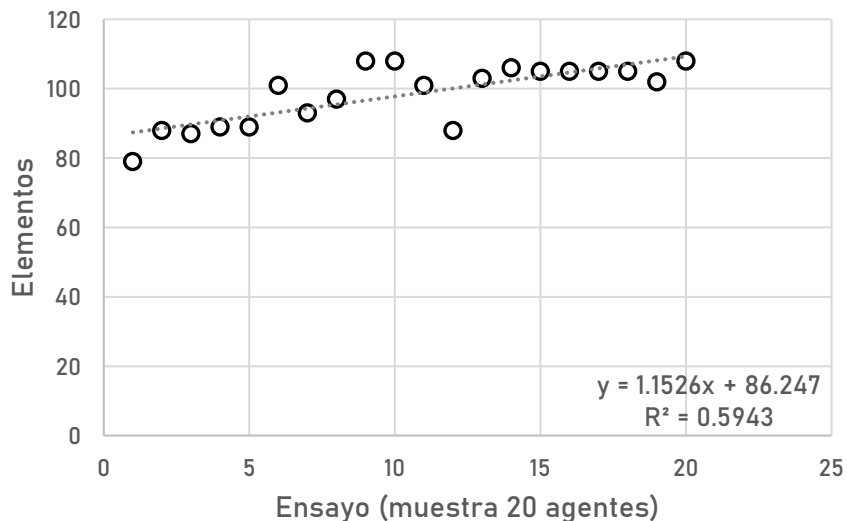
Nota. Elaboración propia (2024).

Así mismo, se expone el diagrama de dispersión de los elementos constructivos dispuestos de manera fallida por los agentes en cada ensayo de todas las muestras. Las gráficas presentan de manera puntual, la correlación de la cantidad de elementos fallidos en el eje Y con respecto a cada ensayo en orden numérico en el eje X. También, cada gráfica muestra el coeficiente de determinación R^2 y la ecuación inferencial de las muestras (Figura 83).

Figura 83.

Diagrama de dispersión: elementos constructivos fallidos. (a) Muestra con 10 agentes -arriba-, (b) muestra con 15 agentes -medio-, (c) muestra con 20 agentes -abajo-.





Nota. Elaboración propia (2024).

5.3.2. Datos de efectividad del sistema.

Los datos estadísticos anteriores, permitieron realizar un análisis de efectividad a través de la *distribución binomial* y de *Poisson* con el fin de estudiar la probabilidad de éxito y fracaso que puede ofrecer el sistema Multi-Agente del modelo de IC para ser aplicado a un SMR. Para poder realizar dicho análisis, fue necesario determinar (a) la probabilidad promedio (p) de fallos (media relativa) de cada muestra, así como (b) la tasa (o valor) esperada (λ) de fracaso de acuerdo con el (c) número de ensayos (Tabla 22).

Tabla 22.

(a) Datos para el análisis de efectividad de los ensayos en cada muestra -arriba-. (b) Datos para el análisis de efectividad en la disposición de elementos constructivos por parte de los agentes en cada muestra -abajo-.

Muestra	Probabilidad promedio de fracaso (p ; media relativa)	Número de ensayos (n)	Valor esperado (λ ; media, μ)	Estatus por nivel de significación ($p = 5\%$; $\lambda = 1$)
1A. 10 agentes	5%	20	1	Éxito
1B. 15 agentes	15%	20	3	Fracaso
1C. 20 agentes	15%	20	3	Fracaso

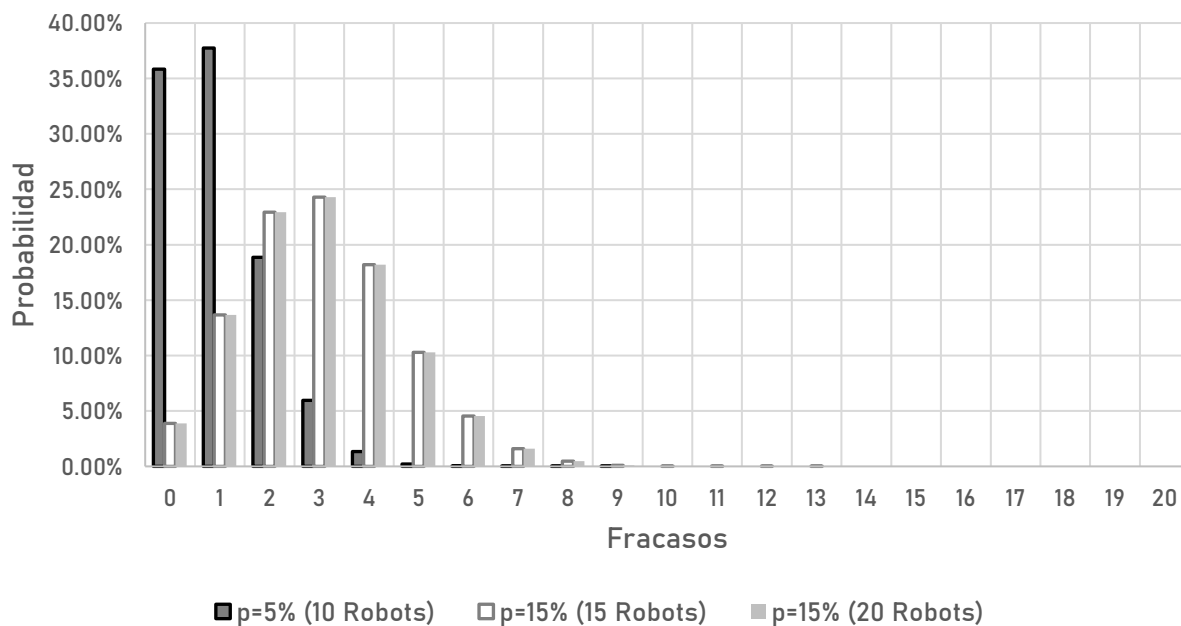
Muestra	Probabilidad promedio de fracaso (p ; media relativa)	Número de elementos (n)	Valor esperado (λ ; media, μ)	Estatus por nivel de significación ($p = 5\%$; $\lambda = 125$)
1A. 10 agentes	2.686%	2,500	67.15	Éxito
1B. 15 agentes	4.860%	2,500	121.50	Éxito
1C. 20 agentes	3.934%	2,500	98.35	Éxito

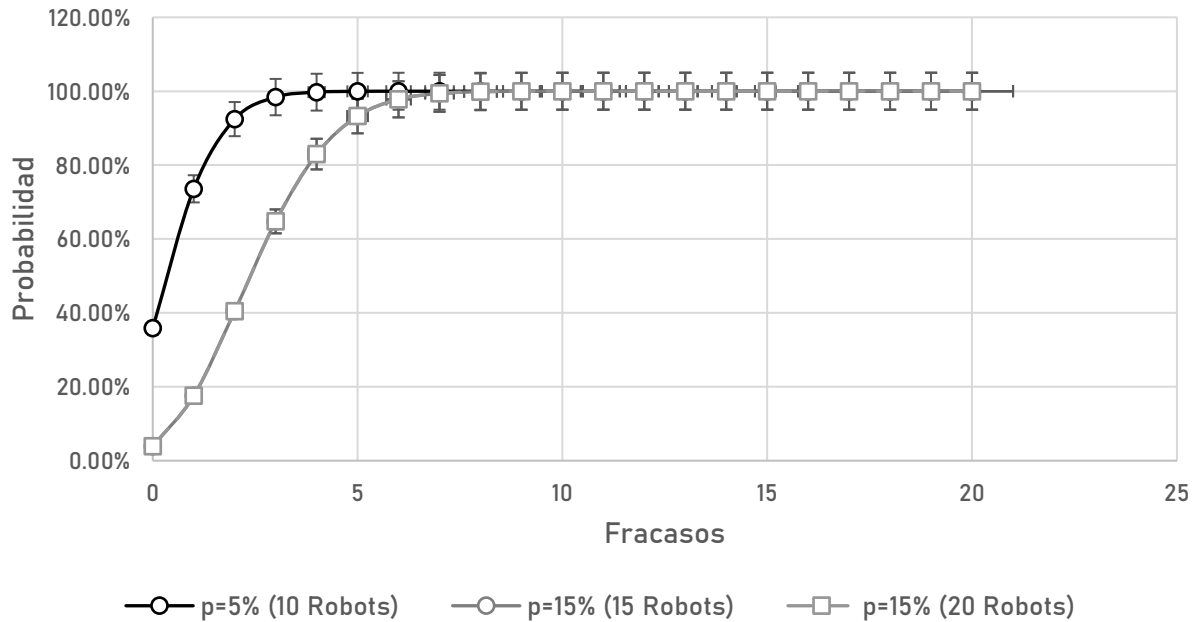
Nota. Elaboración propia (2024).

En este sentido, el estudio fue dirigido de la siguiente manera: para el análisis de fracasos por muestras, debido a que cada una de éstas no cuenta con una gran cantidad de ensayos, fue realizada una *distribución binomial* para verificar el desenvolvimiento de probabilidad. A continuación, es mostrado los datos resultantes de este estudio, así como el correspondiente análisis comparativo entre muestras (Figura 84).

Figura 84.

(a) Análisis comparativo entre muestras de probabilidad de ensayos fallidos con la distribución binomial -arriba-. (b) Análisis comparativo con la distribución binomial acumulada -abajo-.



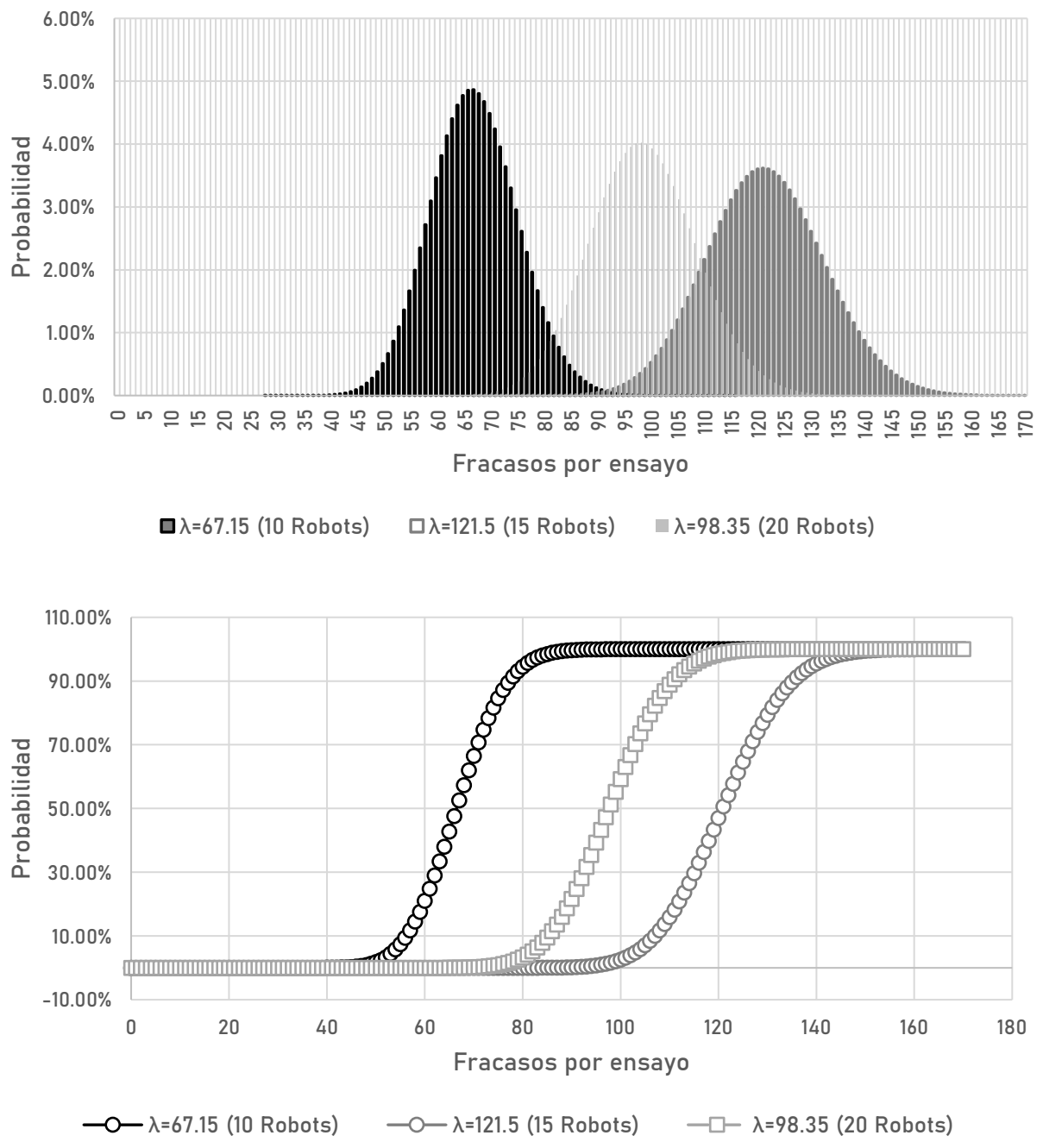


Nota. Elaboración propia (2024).

Por otro lado, con respecto a la probabilidad de falla en la disposición de elementos constructivos por parte de los agentes, la cantidad de elementos dispuestos es significativamente mayor y la probabilidad de fracaso es mínima, por lo que, la *distribución* que mejor se ajusta para su estudio es la de *Poisson*. A continuación, se muestran los datos resultantes de este estudio, así como el correspondiente análisis comparativo entre muestras (Figura 85).

Figura 85.

(a) Análisis comparativo entre muestras de probabilidad de elementos constructivos fallidos en los ensayos a través de la distribución de Poisson -arriba-. (b) Análisis comparativo con la distribución de Poisson acumulada -abajo-.



Nota. Elaboración propia (2024).

5.4. Interpretación de resultados

Los datos que arrojaron los resultados del cuasiexperimento reflejaron un comportamiento relativamente estable en las simulaciones, con características de robusticidad del sistema en el proceso de generar recorridos y trazos que permiten la disposición de elementos

materiales, con el fin de construir una sección representativa de Envolvente Arquitectónica (EA). El carácter distribuido y descentralizado del sistema Multi-Agente, permitió realizar amplios recorridos en poco tiempo por parte de las unidades robóticas. Esta virtud, también contribuyó a la colocación inteligente de elementos constructivos, en un área controlada y extendida.

A pesar de que los Sistemas Multi-Robóticos son complejos y requieren del análisis de una gran cantidad de variables, desde la perspectiva teórica que representan las simulaciones virtuales, la interacción (y locomoción) colaborativa mostró estabilidad, organización y rangos de error mínimos. A continuación, es desglosada la interpretación de los resultados obtenidos con mayor detalle, de acuerdo con el análisis de los datos estadísticos, así como los de efectividad del sistema.

5.4.1. Análisis de los datos estadísticos.

El cuasiexperimento (a través de sus tres muestras) mostró un comportamiento en el que la multiplicidad de agentes contribuyó con la disminución del tiempo de ejecución de las tareas asignadas en las simulaciones. En las muestras, entre más agentes tenía el sistema, menor era el tiempo en el que se cumplían las tareas. Sin embargo, también expuso que este aumento, genera mayores probabilidades de falla en las unidades robóticas por el incremento de colisión entre éstas, así como el desvío de la ruta consecuente de la evasión de obstáculos. Estas colisiones y desvíos producen que aumente la cantidad de elementos constructivos dispuestos de manera fallida (Figura 86).

En este sentido, en cuestión de tiempo de ejecución de las tareas asignadas al sistema Multi-Agente, la primera muestra (diez agentes) tuvo una media de $\mu = 1.58$ minutos decimales, una mediana de 1.56 y una moda de 1.53, a diferencia de la segunda (quince agentes) que duró una media de $\mu = 1.43$ min, una mediana y moda de la misma cantidad. La tercera muestra

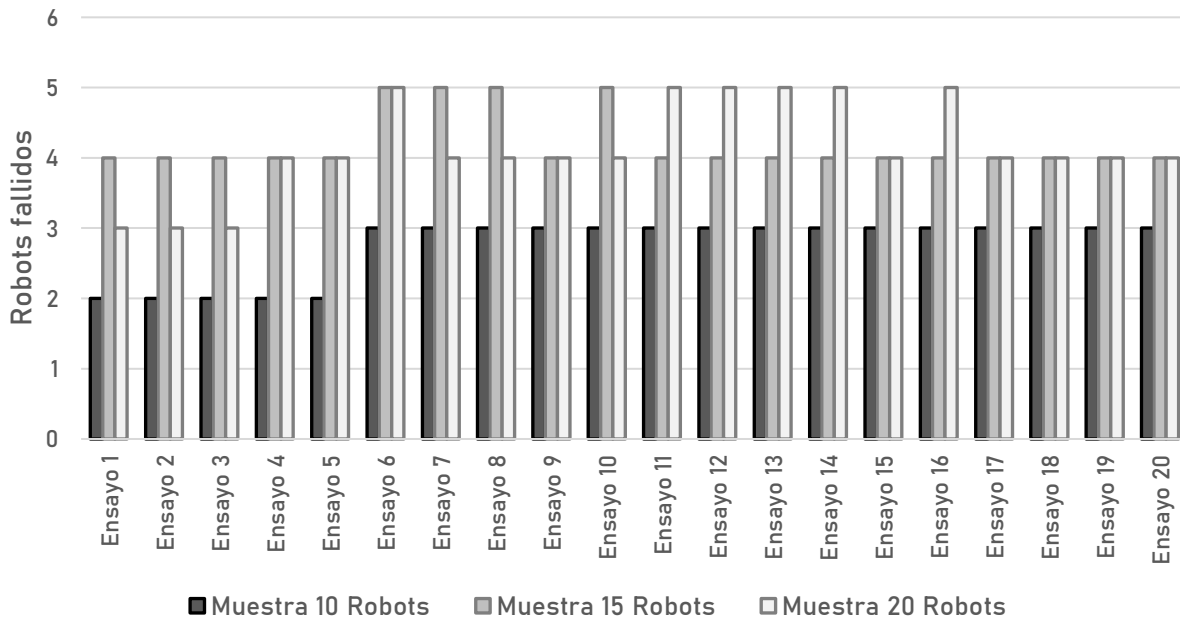
(veinte agentes) fue la que obtuvo el mejor tiempo de ejecución con una media de $\mu = 1.29$ min, una mediana de la misma cantidad y una moda de 1.32, una disminución considerable con respecto a la primera muestra.

En el caso de las fallas de las unidades robóticas (agentes), los únicos motivos que se presentaron en los ensayos fueron el desvío y la colisión. El comportamiento fue inversamente proporcional a la multiplicidad del sistema y al desempeño que se obtuvo con respecto a la duración de las simulaciones. Así, la primera muestra obtuvo una media de $\mu = 2.75$ agentes fallidos, así como una mediana y moda de tres. La segunda una media de $\mu = 4.20$, una mediana y moda de cuatro agentes que fracasaron. Finalmente, la tercera mostró una media $\mu = 4.15$, de la misma manera, una mediana y moda de cuatro agentes fallidos.

Es posible verificar un aumento en fallas de comportamiento de las unidades conforme aumenta la cantidad de agentes en el sistema (Figura 86). Esto sucede por el incremento de probabilidad de colisión y desvío en la interacción. También, con estos datos se puede discernir que, aunque la segunda y tercera muestra tuvieron un comportamiento bastante similar, fue la segunda aquella que obtuvo mayor cantidad de robots fallidos.

Figura 86.

Cantidad de robots fallidos en los ensayos de las tres muestras.



Nota. Elaboración propia (2024).

El hecho de que ninguna de las tres muestras cumpliera con la tasa de nivel de significación estadística en sus medias, refleja que un sistema de multiplicidad presenta un rango de probabilidad de fallo local por la complejidad de sus características. Sin embargo, esta problemática puede ser contrarrestada por la robusticidad y resiliencia del sistema a nivel global ya que, aunque suceden estos fracasos en los agentes, éstos se recuperan y el resto de las unidades robóticas siguen con el trabajo en un esquema de colaboración continua.

Como los fracasos en la disposición de elementos constructivos es consecuencia de las fallas por desvío o colisión de los agentes, este último comportamiento es similar en este aspecto. La muestra que presentó menos elementos de material fallidos fue la primera (10 agentes), con una media de $\mu = 67.15$, una mediana de 67 y una moda de 68 elementos dispuestos equivocadamente. La muestra que presentó más elementos fallidos fue la segunda (15 agentes), con una media de casi el doble que la anterior $\mu = 121.5$, una mediana de 121.5 y una moda de

120. La tercera (20 agentes) muestra obtuvo una media de $\mu = 98.35$, mediana de 101.5 y una moda de 105.

Estos resultados manifiestan que fue la segunda muestra la que, en términos de frecuencia, expone una distribución más cercana a la normal, tanto con la duración de los ensayos, como en la cantidad de fallos de los agentes o en la disposición de elementos constructivos. Esto habla de una diversidad equilibrada, así como estable y se manifiesta mediante la equidad o similitud existente entre sus valores de media μ , mediana y moda.

De acuerdo con estas distribuciones de frecuencias, el comportamiento de la desviación estándar (σ) y media, así como varianza muestral (σ^2) fue diferente a los mostrado con anterioridad. Tanto con la relación temporal como con los fallos, la segunda muestra fue la que tuvo menos desviación y varianza.

Con relación a la duración de los ensayos, la primera muestra obtuvo una desviación estándar de $\sigma = 0.059$ min, una desviación media de 0.051, y una varianza muestral de $\sigma^2 = 0.0035$. La segunda presentó una desviación estándar de $\sigma = 0.015$ min, una desviación media de 0.011 y una varianza muestral de $\sigma^2 = 0.0002$. La tercera muestra tuvo una desviación estándar de $\sigma = 0.036$ min, una desviación media de 0.033 y una varianza de $\sigma^2 = 0.0013$. De esta manera es posible verificar que fue la primera muestra la que expuso mayores desviaciones y varianzas.

Con respecto a los robots fallidos, la muestra de 10 agentes presentó una desviación estándar de $\sigma = 0.444$ robots (agentes), una desviación media de 0.375 y una varianza muestral de $\sigma^2 = 0.197$. La segunda muestra obtuvo una desviación estándar de $\sigma = 0.410$ agentes, una desviación media de 0.320 y una varianza de $\sigma^2 = 0.168$. La tercera, una desviación estándar de

$\sigma = 0.671$, una desviación media de 0.510 y una varianza de $\sigma^2 = 0.450$. En este caso, la tercera muestra fue la que obtuvo mayores desviaciones y varianzas.

Con relación a los elementos constructivos dispuestos de manera fallida, la primera muestra presentó una desviación de $\sigma = 14.858$ elementos erróneos, una desviación media de 10.450 y una varianza muestral de $\sigma^2 = 220.765$. La muestra de 15 agentes obtuvo una desviación de $\sigma = 2.965$ elementos, una desviación media de 2.300 y una varianza de $\sigma^2 = 8.789$. La tercera muestra, expuso una desviación estándar de $\sigma = 8.845$ elementos, una desviación media de 7.680 y una varianza de $\sigma^2 = 78.239$. En este aspecto, al igual que con la relación del tiempo, fue la primera muestra la que obtuvo mayores desviaciones y varianza.

Es posible considerar que, el motivo por el cual se presentaron mayores desviaciones y varianzas en la primera muestra fue por la menor exigencia de trabajo computacional ocasionada por ser la que tiene menos agentes. Entre menos partículas tenga el sistema Multi-Agente, menos cálculos tiene que hacer la computadora, de tal manera que puede realizar las simulaciones de manera más dinámica y puede aumentar las desviaciones y varianzas en su comportamiento. Todo esto, sin tomar en cuenta al aspecto de robots fallidos (el único donde la tercera muestra presentó mayores desviaciones) por contar con una escala de análisis muy pequeña en sus resultados (montos y diferencias reducidas).

Por otro lado, en cuanto a la correlación de estos aspectos, sólo fueron analizadas las relaciones del tiempo y la cantidad de elementos constructivos fallidos con respecto a los ensayos, por tener una escala de análisis mayor y robustez en sus resultados. Primeramente, los diagramas de dispersión de las muestras con relación a la duración de los ensayos mostraron la posibilidad de inferir que existe una sincronía lineal por cumplir con los valores críticos de

correlación de Pearson r según el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, a excepción de la segunda muestra (Tabla 23).

Tabla 23.

Resultados del análisis correlacional lineal de la variable de tiempo sobre la cantidad de ensayos.

Muestra	n	R^2	r	Ecuación inferencial	Valor crítico r de Pearson en nivel $\alpha = 0.05$
1A. 10 agentes	20	0.5298	0.7279	$y = 0.0073x + 1.5065$	0.444
1B. 15 agentes	20	0.1197	0.3459	$y = 0.0009x + 1.4234$	0.444
1C. 20 agentes	20	0.6770	-0.8228	$y = -0.0049x + 1.3402$	0.444

Nota. Elaboración propia (2024).

En este sentido, la primera muestra expuso una *correlación positiva media*, con un valor r que supera al crítico de Pearson con 20 grados de libertad, y una ecuación inferencial de $y = 0.0073x + 1.5065$. En cambio, la segunda muestra presentó una *correlación positiva débil*, con un valor r menor al crítico de Pearson, y una ecuación inferencial de $y = 0.0009x + 1.4234$. La tercera muestra, tuvo una *correlación negativa considerable*, con un valor r que supera al crítico de Pearson, y una ecuación inferencial de $y = -0.0049x + 1.3402$.

Para el caso de la segunda muestra, el carácter de su dispersión se ajustó de mejor manera a una línea de tendencia bajo una ecuación inferencial polinómica de grado tres; sin embargo, este análisis busca encontrar la correlación lineal de las variables que entran en juego, para de esta manera identificar sus niveles de causalidad en su comportamiento.

Con respecto a la cantidad de elementos constructivos fallidos durante el proceso de cada simulación, el comportamiento correlacional siguió el mismo patrón que el aspecto de duración de cada ensayo. La primera y tercera muestra cumplieron con los valores críticos de correlación de Pearson r , por lo que, es posible inferir que también presentaron una sincronía lineal entre sus variables (Tabla 24).

Tabla 24.

Resultados del análisis correlacional lineal de la variable de elementos constructivos fallidos sobre la cantidad de ensayos.

Muestra	n	R^2	r	Ecuación inferencial	Valor crítico r de Pearson en nivel $\alpha = 0.05$
1A. 10 agentes	20	0.2966	0.5446	$y = 1.3677x + 52.789$	0.444
1B. 15 agentes	20	0.0104	-0.1019	$y = -0.0511x + 122.04$	0.444
1C. 20 agentes	20	0.5943	0.7709	$y = 1.1526x + 86.247$	0.444

Nota. Elaboración propia (2024).

La primera muestra, presentó una *correlación positiva media*, con un valor r que supera al crítico de Pearson con 20 grados de libertad, y una ecuación inferencial de $y = 1.3677x + 52.789$. Diferente es la sincronía de la segunda muestra, que tuvo una correlación negativa muy débil, con un valor r menor al crítico de Pearson, y una ecuación inferencial de $y = -0.0511x + 122.04$. Finalmente, la tercera muestra si supera el valor r crítico de Pearson, con una ecuación inferencial de $y = 1.1526x + 86.247$, por lo que muestra una correlación positiva considerable.

El hecho de que la segunda muestra, tanto para el aspecto de duración como de elementos constructivos fallidos de cada ensayo, expusiera una dispersión amplia y una correlación muy débil, posiblemente se encuentra relacionado con la posición de los agentes al momento de realizar cada simulación. Aparte de la cantidad de agentes, que tienen probabilidad de presentar colisiones y desvíos en su desenvolvimiento, este análisis demuestra que también es importante estudiar la posición inicial de los agentes y cómo ésta influye en el recorrido de las unidades. Esta conclusión se refuerza con el análisis de efectividad que es mostrado a continuación.

5.4.2. Análisis de efectividad del sistema.

Los datos resultantes que evalúan efectividad de las muestras del cuasiexperimento permitieron realizar un análisis comparativo entre éstas, a partir de la distribución binomial para

verificar la probabilidad ensayos fallidos en las muestras del sistema Multi-Agente, y la distribución de Poisson para estudiar la probabilidad de elementos constructivos erróneos en su disposición por los agentes en las simulaciones.

De manera general, los resultados mostraron que la cantidad de agentes aumenta la probabilidad de fracaso tanto para el sistema en general, como para la disposición de material en el entorno de desenvolvimiento. También, la localización inicial de los agentes juega un papel relevante para evitar, en lo más posible, colisiones y desvíos en su trayecto. Sin embargo, a pesar de esta apreciación, lo cierto es que, el sistema aminora el tiempo de ejecución con la multiplicidad, así como también, es más robusto y resiliente ante eventualidades estocásticas (o impredecibles).

De esta forma, con relación a la probabilidad de ensayos fallidos en las muestras a través de la distribución binomial, la probabilidad promedio de fracaso para la primera muestra fue de $p = 5\%$, para la segunda fue de $p = 15\%$ y para la tercera $p = 15\%$. Esta tasa condiciona el desarrollo de la distribución, por tanto, expresa que existe un 37.74% de probabilidad que exista un fracaso en la primera muestra, así como un 24.28% para que sucedan tres fracasos en la segunda y tercera muestra. Solamente la primera, cumple el nivel de significancia de la estadística del 0.05 (5%), por lo que, la gráfica de distribución binomial acumulada expone que es la que tiene menor probabilidad de falla.

En cuanto a la probabilidad de disposición fallida de elementos constructivos en cada ensayo mediante distribución de Poisson, se repitió el patrón en el que la primera muestra presentó menor probabilidad de error, ya que obtuvo un valor esperado de fracaso $\lambda = 67.15$ que representa una probabilidad promedio $p = 2.686\%$. A diferencia de la segunda muestra, que expuso un valor esperado $\lambda = 121.50$ que significa una probabilidad $p = 4.860\%$. De la misma

forma, la tercera muestra, obtuvo un valor esperado $\lambda = 98.35$ que representa una probabilidad de fallo $p = 3.934\%$.

Los valores esperados de fracaso (λ), indican tanto la media como la moda de la distribución, por tanto, representan la cantidad máxima promedio de errores esperados en cada ensayo por parte de las diferentes multiplicidades del sistema Multi-Agente. Así, la distribución de Poisson acumulada presentó que la primera muestra es la que alcanza una cantidad menor de elementos constructivos dispuestos de manera fallida en cada uno de sus ensayos, seguido por la tercera.

Al igual que con las distribuciones correlacionales, la segunda muestra es la más desfavorecida, ahora en términos de probabilidad de fracaso en los diferentes aspectos de análisis. Esta situación refuerza la hipótesis de que la posición inicial de los agentes en el sistema juega un papel relevante en su desempeño y efectividad, aparte de la multiplicidad y la capacidad computacional para la ejecución de las simulaciones virtuales.

5.5. Ampliación ciberfísica del modelo de Inteligencia Colectiva

El presente apartado, extiende la información relacionada con la ampliación del modelo de IC a una segunda fase de desarrollo, que se encuentra planeada como trabajo de investigación a futuro. Esta extensión transfiere el sistema de inteligencia de carácter virtual a una aplicación ciberfísica del Sistema Multi-Robótico (SMR).

Esta ampliación, comienza con avanzar pasos hacia el funcionamiento integral del modelo, a través de la hibridación del método algorítmico metaheurístico *Termitas*, con los de *Inteligencia de Enjambre* (IE) y *Vehículos de Braitenberg* que ya se encuentran desarrollados y ejecutados en este trabajo. El objetivo de esta integración es complementar, al desenvolvimiento del modelo, la *lógica de agregación* como comportamiento que se adhiere a las de *interacción* y

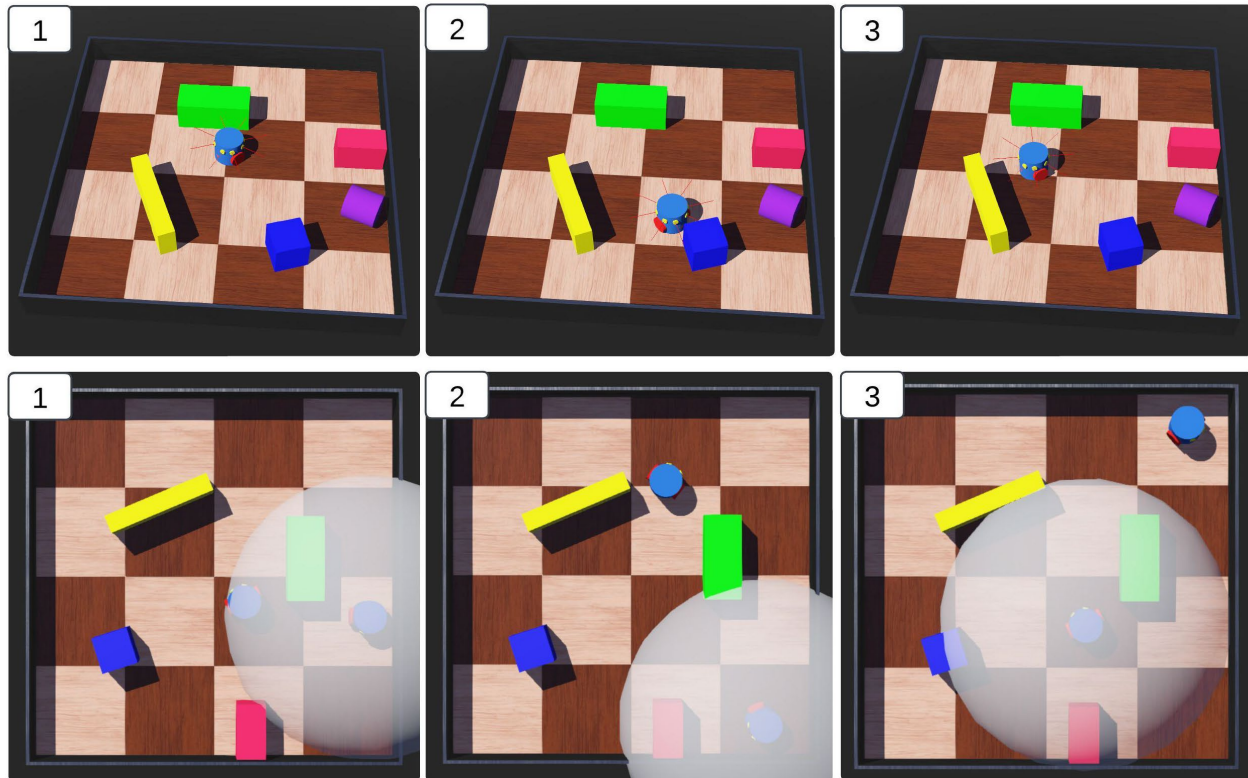
locomoción. También, esta extensión implica el diseño de actuadores y manipuladores robóticos, como brazos, pinzas o dispositivos de sujeción por succión para el agarre de objetos.

Por otro lado, la ampliación requiere del diseño de un protocolo de comunicación ciberfísica, mediante el cual, se transfiera la información generada en la simulación computacional como instrucciones para las unidades robóticas físicas. Aunado a esto, cada unidad robótica necesitará de dispositivos de comunicación remota (*Bluetooth*, radiofrecuencia, etc.), que le permita reconocer su ubicación en el entorno y transmitir la información a otros robots.

Una parte fundamental de este proceso ciberfísico es el traslado del sistema Multi-Agente a una plataforma de simulación robótica donde se traduzcan las lógicas de los comportamientos previamente descritos, a los criterios de los sensores, actuadores y manipuladores robóticos. Una plataforma prometedora es el programa de uso libre y gratuito para la simulación robótica llamado *Webots* (Figura 87), el cual, no sólo permite simular un conjunto de unidades robóticas, sino también, acepta las integraciones y los traslados multiplataforma mediante los lenguajes de programación más utilizados en la Robótica como *C++*, *C#* o *Python*. También, ofrece herramientas para el diseño robótico personalizado en cualquier escala.

Figura 87.

Simulador robótico Webots. Las imágenes muestran a una unidad robótica que evita obstáculos a través de sus componentes sensoriales.

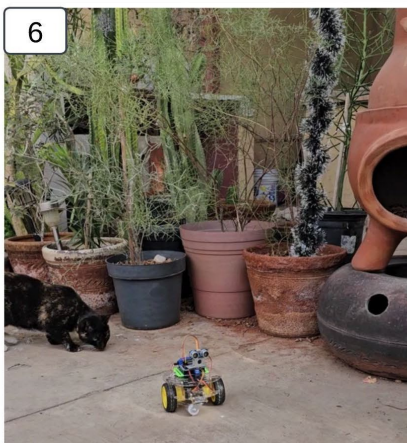
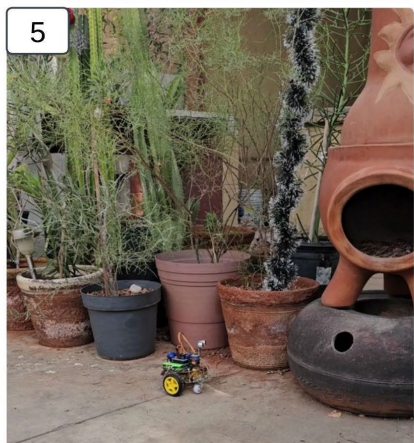
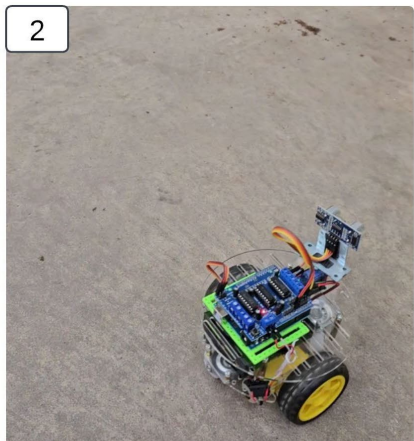
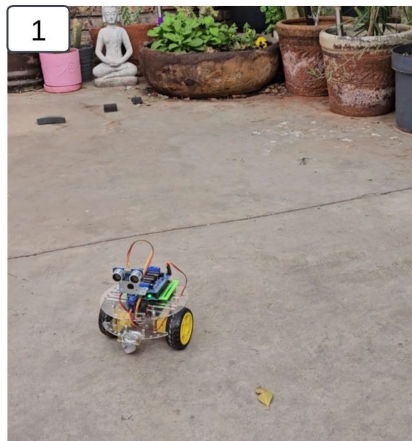


Nota. Elaboración propia (2023).

Por otro lado, el diseño y construcción física de la unidad robótica, necesita de ampliaciones sensoriales que se encuentren en sincronía con los nuevos dispositivos actuadores, manipuladores y de comunicación. Como parte del proceso de esta investigación, fue desarrollado en laboratorio un robot físico que evita obstáculos, con criterios similares a un *Vehículo de Braitenberg*. A continuación, se muestra a esta unidad robótica en la acción de evitar los obstáculos que tiene en su entorno (Figura 88).

Figura 88.

Aplicación de los comportamientos del método algorítmico Vehículos de Braitenberg en prototipo físico de unidad robótica.



Nota. Elaboración propia (2023).

6. CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El presente trabajo de tesis expone el desarrollo del tema “Modelo Accesible de Inteligencia Colectiva para la Fabricación Automatizada de la Envolvente Arquitectónica”. El estudio partió de la pregunta principal de investigación ¿Qué modelo de Inteligencia Artificial (IA) puede ser aplicado a un Sistema Multi-Robótico (SMR) para la Fabricación Digital (FD) de la Envolvente Arquitectónica (EA) e un contexto donde el uso de medios robóticos industriales es restringido?

Esta pregunta surgió como consecuencia a una problemática en la FD dirigida a la Arquitectura, que típicamente se basa en un modelo de automatización que considera procesos de Robótica predominantemente manejados a través de sistemas de Control Numérico Computacional (CNC) o Brazos Robóticos de tipo Industrial (BRI). Este modelo, significa contrariedades de accesibilidad tecnológica debido a la escala que representan estos medios robóticos para su movilidad, manipulación y mantenimiento.

También, esta falta de acceso a los procesos de automatización e IA posiciona a los países en desarrollo en un estado de rezago con respecto a los avances tecnológicos que tienen el objetivo de optimizar los procesos de trabajo relacionado con la construcción. Esta inaccesibilidad también repercute en sus instituciones educativas de nivel medio o superior, y restringe la preparación de su población para insertarse en el ámbito laboral tecnológicamente avanzado. Todo este escenario repercute en problemáticas de sostenibilidad desde la perspectiva del desequilibrio social y económico a nivel mundial.

Por tanto, como respuesta a esta pregunta, la investigación se centró en cumplir con el objetivo general de elaborar un modelo de Inteligencia Colectiva (IC) aplicado a un SMR para la construcción automatizada de la EA. El criterio tomado para dirigir este trabajo a cumplir con el

objetivo anterior fue el de desarrollar primeramente el modelo de inteligencia computacional que condicionará el comportamiento futuro de un Sistema Robótico (SR) ciberfísico. También, el estudio analizó solamente la interacción de agentes virtuales que simulan unidades robóticas físicas en la resolución de tareas hipotéticas que únicamente se destinaron al ensamblaje de una sección (corte) representativa de una EA.

Esta fase de investigación es fundamental, ya que es el punto de partida para la construcción de prototipos robóticos físicos. Un sistema de inteligencia de este tipo representa el motor de su funcionamiento, por tanto, necesita de estrategias de IA que requieran atención y tiempo significativo. Trabajos posteriores, implicarán diseñar protocolos de comunicación para la transferencia de esta inteligencia a prototipos físicos. Así, este desarrollo contribuye a que investigadores afines al tema, retomen el modelo y le den continuidad con aplicaciones a diferentes sistemas robóticos.

Para poder desarrollar este trabajo, fue necesario identificar ¿cuáles son los modelos de IA utilizados en los medios robóticos de la FD para la construcción automatizada de la Arquitectura?, sobre todo para reconocer los métodos existentes en el Estado del Arte que contribuyen a que la FD sea accesible. De esta forma, a través de una revisión sistemática de literatura, relacionada con la Fabricación Digital (FD) dirigida al diseño y construcción arquitectónica, fue reconocido que apostar por la multiplicidad y reducción de escala del medio robótico es una alternativa prometedora a este objetivo.

En esta revisión, aunque varias estrategias de FD aplicadas por los autores se centraron en la impresión 3D con concreto a gran escala, algunas investigaciones reconocieron la problemática previamente planteada y desarrollaron diferentes métodos que buscan democratizar la tecnología de automatización a nivel internacional. Algunos de estos métodos incluyeron el

diseño de materiales granulares que buscan disminuir el tamaño del material constructivo, o el diseño de materiales compuestos que tienen capacidades reactivas especiales a estímulos externos y funcionaron como materiales 4D. Otras estrategias se dirigieron a la Realidad Aumentada (RA) para poder asistir en el proceso de fabricación. También existieron estudios que apostaron por utilizar varios robots que trabajan colaborativamente para facilitar el proceso de fabricación, sin embargo, el medio robótico aún fue de gran escala y de difícil acceso.

Destacaron aquellos autores que integraron en un solo proyecto de investigación, las estrategias de disminuir el tamaño del medio robótico y del material constructivo, que apostaron por una lógica de multiplicidad de las unidades robóticas, que integraron estrategias de diseño computacional, así como también, que desarrollaron y aplicaron modelos de IC para lograr consolidar sistemas de FD con cualidades para contribuir con la accesibilidad del medio tecnológico.

Estos últimos trabajos fueron los principales referentes para el desarrollo de esta investigación. Cabe mencionar, que prácticamente estos estudios se concentran en tres países: Estados Unidos, Suiza y Alemania, así como tres universidades que son: el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y la Universidad de Stuttgart. Por tanto, es importante generar, aplicar, traducir o contextualizar estos modelos en México, con el fin de aumentar las alternativas en torno a la investigación y el desarrollo arquitectónico con un acercamiento mayor a los avances tecnológicos relacionados con el Diseño Computacional, la Automatización, la Robótica y la IA orientada al Diseño y la Construcción.

Así, este trabajo se une a ese enfoque, ya que considera relevante integrar la IA para desarrollar modelos de colectividad robótica y minimizar la escala de la unidad en el proceso de construcción, bajo la hipótesis de que: un modelo de IC aplicado a un SMR con unidades de

pequeña escala puede construir de forma automatizada y accesible una EA en contextos donde la implementación de medios robóticos de tipo industrial es restringida por escala, transportabilidad y brechas interdisciplinarias.

Por tanto, la siguiente cuestión fue ¿En qué consiste la IC aplicada a un SMR y qué características debe tener para automatizar la construcción de la EA? Para poder elaborar este modelo, fue identificado que se requiere profundizar en métodos algorítmicos de sistemas Multi-Agentes para desarrollarlo y dirigirlo a aplicaciones para un SMR, donde cada agente representa a un robot que es autónomo e interactúa con los demás a través de sensores y objetivos individuales. Un Sistema Multi-Agente (SMA), es un modelo algorítmico metaheurístico poblacional de IC que se caracteriza por ser un conjunto de agentes débiles, autónomos y adaptables, con atributos de interacción mutua, que permiten estructurar topologías de trabajo colectivo para resolver problemas que están más allá de sus capacidades individuales.

Esta lógica, fue una estrategia adecuada para ser adoptada con el fin de reducir la escala de la unidad robótica y solventar problemas de construcción arquitectónica que se caracterizan por ser complejos y que demandan una gran escala. Por tanto, metodológicamente esta investigación se centró en integrar los métodos algorítmicos metaheurísticos de *Inteligencia de Enjambre* (IE) y los *Vehículos de Braitenberg* para solventar lógicas de comportamiento que giran en torno a la *interacción* y *locomoción* de los agentes. De manera específica, estos procesos implicaron el desarrollo de algoritmos que condicionaron la *separación*, *alineación*, y *cohesión* de los agentes que constituyeron el sistema.

Esta integración contribuyó a generar un sistema de conducción para los diferentes agentes que lo componen, con el fin de que cada uno de éstos, mediante el trazo de su recorrido, disponga elementos discretos de madera como material constructivo de pequeña escala para la

fabricación de una sección representativa de la EA. Así, el objetivo fue generar una estructura topológica que sirvió como directriz para la agregación de material en un plano espacial. De esta manera, mediante densidades de disposición (por el trayecto distribuido de los agentes) se desarrollaron estructuras bidimensionales que, en acumulación vertical seriada, consolidaron una sección representativa de la envolvente.

La propuesta fue que, en el sistema existieran zonas y obstáculos de repulsión para los agentes, con el fin de evitar agregación de material en esos espacios. Estas zonas fueron condicionadas por el resultado de una simulación de optimización topológica asistida por el *Método de Elementos Finitos* (FEM), aplicado sobre cada plano de referencia para la construcción automatizada que realiza cada agente. De esta manera, a través de una imagen de densidades, generada por la optimización, fue posible determinar las zonas de repulsión y de atracción correspondientes. Esta clasificación de zonas fungió como parámetro que condicionó la *interacción global* del modelo de IC.

De esta forma, ante la determinación de este proceso metodológico, se dio paso a la evaluación de las capacidades de automatización del modelo para verificar las propiedades de accesibilidad que puede brindar a un sistema robótico en la FD. Por tanto, para su evaluación las variables de análisis fueron: *la multiplicidad de las unidades robóticas, la efectividad (relación éxito-fracaso) del sistema*, y la valoración del *tiempo que requerirá para solventar las tareas de la construcción automatizada*. Este contraste, permitió estudiar la pertinencia de la reducción de escala al momento de construir elementos con tamaño arquitectónico.

La simulación del proceso automatizado de fabricación por el SMR (representado por la colaboración del sistema Multi-Agente), fue configurada en un entorno con las mismas condiciones y escenarios de ejecución predefinida. A partir del registro de estos resultados,

fueron utilizadas estrategias estadísticas que sirvieron tanto para describir el comportamiento de los agentes en el sistema, como para realizar los cálculos de probabilidad de fracaso en las variables de análisis del modelo.

Fueron realizadas tres muestras con 20 ensayos (simulaciones) por cada una. Cada muestra se diferenció por la multiplicidad de los agentes en el sistema. La primera muestra fue configurada con *diez agentes*, la segunda con *quince* y la tercer con *veinte*. Los resultados de los ensayos ejercidos presentaron el comportamiento esperado, el cuál fue relativamente estable en cuanto a cantidad de agentes fallidos, la cantidad de elementos constructivos dispuestos erróneamente en las zonas optimizadas y el tiempo que requirió cada ensayo.

Aun así, aunque las tres muestras generaron pocos ensayos fallidos, lo cierto es que, en cuestión de porcentaje solamente la primera obtuvo el 5% de frecuencia no exitosa, el cual corresponde, a la proporción de un sólo ensayo fallido en una muestra constituida por 20 simulaciones y a una tasa del nivel de significancia que no rompe con los límites de confianza de una distribución normal estadística. Por tanto, esta muestra fue la única considerada como exitosa de forma global; el resto, alcanzó el 15% de ensayos fallidos, razón por la cual, fueron considerados como fracasos.

A través de un análisis de efectividad realizada con la *distribución binomial* y de *Poisson*, se tuvo el objetivo de estudiar la probabilidad de éxito y fracaso que puede ofrecer el sistema Multi-Agente. Para poder realizar dicho análisis, fue necesario determinar la probabilidad promedio (p) de fallos de cada muestra, así como la tasa (o valor) esperada (λ) de fracaso de acuerdo con el número de ensayos.

Los datos que arrojaron los resultados del cuasiexperimento reflejaron un comportamiento con características de robusticidad en el sistema al momento de generar

recorridos y trazos que permiten la disposición de elementos materiales. El carácter distribuido y descentralizado del sistema Multi-Agente, permitió realizar amplios recorridos en poco tiempo por parte de las unidades robóticas. Esta virtud, también contribuyó con la colocación inteligente de elementos constructivos en un área controlada y extendida.

Aunque los Sistemas Multi-Robóticos son complejos y requieren del análisis de una gran cantidad de variables, desde la perspectiva teórica que representan sus simulaciones virtuales, la interacción y locomoción colaborativa mostraron estabilidad, organización y rangos de error mínimos. El cuasiexperimento expuso un comportamiento en el que la multiplicidad de agentes contribuyó con la disminución del tiempo de ejecución de las tareas asignadas en las simulaciones. En las muestras, entre más agentes tenía el sistema, menor fue el tiempo en el que se cumplían las tareas. Sin embargo, también expuso que este aumento, genera mayores probabilidades de falla en las unidades robóticas por el incremento de colisión entre éstas, así como el desvío de la ruta consecuente de la evasión de obstáculos.

Como sugerencia futura a solventar este problema, se encuentra el centrar la atención a robustecer la programación del algoritmo del Sistema Multi-Agente, con el fin de implementar políticas en los comportamientos de los agentes al momento de interactuar con el entorno de desenvolvimiento, para de esta forma, lograr un mejor reconocimiento de las zonas de atracción y la restricción con respecto a las de repulsión. También, en el estudio fue identificado que, la localización inicial de los agentes juega un papel relevante para evitar colisiones y desvíos en su trayecto. A pesar de toda esta problemática identificada en el cuasiexperimento, el modelo de IC propuesto contrarresta estas contrariedades con la robusticidad y resiliencia del sistema a nivel global, por la recuperación de los agentes ante los fracasos y la continuidad del trabajo colaborativo de las unidades robóticas en todo el proceso.

Estos resultados mostraron un panorama prometedor hacia el objetivo general de esta investigación de desarrollar un medio robótico alternativo al BRI, como tecnología dirigida a la FD y a la automatización de los procesos de construcción en la Arquitectura que demandan una gran escala. El BRI de gran escala, a pesar de que tiene una gran capacidad de carga (hasta 1300 kg) y un alcance radial de hasta casi 4 m, en su disposición más básica es estacionario, su funcionalidad es centralizada, su transportación es complicada y su operatividad es especializada. Algunas unidades de menos alcance pueden ser trasladadas mediante ejes, pórticos o grúas especiales para ser montados.

En cambio, un sistema Multi-Robótico programado bajo un modelo de IC, puede constituirse por unidades robóticas móviles (terrestres o aéreas) diseñadas y fabricadas de manera personalizada en laboratorio, con una transportabilidad significativamente más accesible, y con un funcionamiento distribuido al momento de cumplir con las tareas que se le asignan. El producto de este trabajo, aunque tuvo un alcance virtual, expone un modelo que ofrece beneficios con respecto al tiempo de ejecución, a pesar de que las duraciones manejadas no representan la realidad de un proceso físico. También, la agregación de material en la demostración actual fue hipotética y visualizó la disposición de elementos discretos de madera, sin embargo, el sistema (como principio de funcionamiento) tiene el potencial de ser aplicado a una diversidad de métodos aditivos de fabricación dirigidos a la edificación.

El cuasiexperimento, sólo aborda una parte del propósito de fabricación ciberfísica y aún existen varias fases de investigación, así como pasos de desarrollo por cumplir. Por esta razón, es importante continuar el trabajo hacia la ampliación del modelo, para concretar la hibridación del método metaheurístico *Termitas* a los sistemas de comportamiento inteligente incorporados en este trabajo, desarrollar el protocolo de comunicación y concretar la construcción física de las

unidades robóticas, con el fin de realizar demostraciones experimentales que expongan la real capacidad de los Sistemas Multi-Robóticos como una alternativa al BRI en los procesos de FD y construcción Arquitectónica.

Finalmente, es importante recalcar que los desarrollos relacionados con los algoritmos metaheurísticos tienen como fin imitar el pensamiento y las acciones humanas, así como reinterpretar los sistemas de comportamiento de los organismos físicos y biológicos. Por tanto, acercarse a los fenómenos que corresponden a estas disciplinas, permiten alimentar los mecanismos que estructuran las lógicas de la IA en una interpretación computacional que puede contribuir a evolucionar los medios tecnológicos para su accesibilidad en la automatización.

También, como se expone en esta investigación, estos algoritmos pueden contribuir a solventar la accesibilidad tecnológica, y de esta manera beneficiar a que las instituciones educativas, de investigación, así como organizaciones de iniciativa privada se integren a los paradigmas actuales de construcción arquitectónica relacionados con la tecnología computacional y automatización robótica. Una formación académica y profesional integrada a estos procesos vanguardistas desde una etapa básica, contribuirá a que los medios tecnológicos para la construcción se integren a los contextos donde existe rezago para su aplicación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

MODELO ACCESIBLE DE INTELIGENCIA COLECTIVA PARA LA FABRICACIÓN AUTOMATIZADA DE LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO
DE DOCTOR EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA
AARÓN TADEO ONCHI RASCÓN

Correo electrónico UABC: onchia@uabc.edu.mx

Correo personal: at.onchi@gmail.com

Identificador ORCID: [0000-0003-2167-6758](https://orcid.org/0000-0003-2167-6758)

Director de tesis: Dr. Camilo Caraveo Mena

Identificador ORCID: [0000-0001-6104-3061](https://orcid.org/0000-0001-6104-3061)

Comité tutorial:

Dr. David Abdel Mejía Medina

Identificador ORCID: [0000-0003-2860-2428](https://orcid.org/0000-0003-2860-2428)

Dr. Gonzalo Bojórquez Morales

Identificador ORCID: [0000-0001-9303-9278](https://orcid.org/0000-0001-9303-9278)

Código QR vinculado al repositorio virtual del MyDAUD

REFERENCIAS

- Aksamija, A. (2016). *Integrating innovation in architecture: Design, methods and technology for progressive practice and research*. West Sussex, United Kingdom: Wiley.
- Aldana, M., Fuentes-Cabrera, M., y Zumaya, M. (2020). Self-Propulsion Enhances Polymerization. *Entropy*, 22(2), 251. <https://doi.org/10.3390/e22020251>
- Andreen, D., Goidea, A., Johansson, A., y Hildorsson, E. (2019). Swarm materialization through discrete, nonsequential additive fabrication. *Proc. - IEEE Int. Workshops Found. Appl. Self* Syst., FAS*W*, 225–230. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/FAS-W.2019.00059>
- Aria, M., y Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Ariza, I., Mirjan, A., Gandia, A., Casas, G., Cros, S., Gramazio, F., y Kohler, M. (2018). Combining 3D Printing and Robotic Assembly. *ACADIA 2018: Recalibration on Imprecision and Infidelity*, 11.
- ASALE, R.-, y RAE. (2022). Diccionario de la lengua española | Edición del Tricentenario. Recuperado el 4 de octubre de 2022, de «Diccionario de la lengua española»—Edición del Tricentenario website: <https://dle.rae.es/>
- Bao, Ding Wen, Yan, X., Snooks, R., y Xie, Y. M. (2021). *SwarmBESO: Multi-agent and evolutionary computational design based on the principles of structural performance*. 241–250. Hong Kong. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2021.1.241>
- Bao, D.W., Yan, X., Snooks, R., y Xie, Y. M. (2019). Design and construction of an innovative pavilion using topological optimization and robotic fabrication. En Lazaro C., Bletzinger

- K.-U., y Onate E. (Eds.), *IASS Symp. - Anniv. Symp. Int. Assoc. Shell Spatial Struct.; Struct. Membr. - Int. Conf. Text. Compos. Inflatable Struct., FORM and FORCE* (pp. 485–492). International Center for Numerical Methods in Engineering. Scopus.
Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099319693&partnerID=40&md5=243658671c1a53f18800b476c7ce0c93>
- Bao, D.W., Yan, X., y Xie, Y. M. (2022). Encoding topological optimisation logical structure rules into multi-agent system for architectural design and robotic fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, 20(1), 7–17. Scopus.
<https://doi.org/10.1177/14780771221082257>
- Bastian, M., Heymann, S., y Jacomy, M. (2009). Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 3(1), 361–362. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v3i1.13937>
- Bernstein, P. G. (2022). *Machine learning: Architecture in the age of artificial intelligence*. London: RIBA.
- Blaxter, L., Hughes, C., y Tight, M. (2001). *Cómo se hace una investigación*. Gedisa.
Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=HyczEAAAQBAJ>
- Born, L., Möhl, C., Kannenberg, F., Melnyk, S., Jonas, F. A., Menges, A., ... Gresser, G. T. (2021). Semi-automated braiding of complex, spatially branched FRP-structures. *Composite Structures*, 276, 114551. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114551>
- Bostock, M. (2024a). Chord diagram / D3. Recuperado el 3 de julio de 2024, de Observable website: <https://observablehq.com/@d3/chord-diagram/2>
- Bostock, M. (2024b). Donut chart / D3. Recuperado el 23 de junio de 2024, de Observable website: <https://observablehq.com/@d3/donut-chart/2>

- Bostock, M. (2024c). Sankey diagram component / D3 | Observable. Recuperado el 23 de junio de 2024, de Observable website: <https://observablehq.com/@d3/sankey/2>,
<https://observablehq.com/@d3/sankey-component>
- Bouayad, G. (2019). Three-dimensional translation of Japanese Katagami patterns. *ArchiDOCT*, 7(1), 30–46. Scopus. Recuperado de Scopus.
- Bozada, T., Borden, J., Workman, J., Del Cid, M., Malinowski, J., y Luechtefeld, T. (2021). Sysrev: A FAIR Platform for Data Curation and Systematic Evidence Review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 4. <https://doi.org/10.3389/frai.2021.685298>
- Braitenberg, V. (2004). *Vehicles: Experiments in synthetic psychology* (9. print). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Brockmann, D. (2023, febrero 6). Horde of the Flies. The Vicsek-Model. Recuperado el 10 de diciembre de 2023, de Complexity Explorables website: <https://www.complexity-explorables.org/explorables/horde-of-the-flies/>
- Brugnaro, G., Figliola, A., y Dubor, A. (2019). Negotiated materialization: Design approaches integrating wood heterogeneity through advanced robotic fabrication. En *Lect. Notes Civ. Eng.* (p. 158). Springer. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_4
- Burger, J., Lloret-Fritschi, E., Scotto, F., Demoulin, T., Gebhard, L., Mata-Falcón, J., ... Flatt, R. J. (2020). Eggshell: Ultra-Thin Three-Dimensional Printed Formwork for Concrete Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7(2), 48–59.
<https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0197>
- Caetano, I., Santos, L., y Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, S2095263520300029. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>

- Cantrell, B., y Mekies, A. (2018). *Codify: Parametric and computational design in landscape architecture*. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1769869>
- Carpanzano, E., y Knüttel, D. (2022). Advances in Artificial Intelligence Methods Applications in Industrial Control Systems: Towards Cognitive Self-Optimizing Manufacturing Systems. *Applied Sciences*, 12(21), 10962. <https://doi.org/10.3390/app122110962>
- Carmo, M. (2017). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Carmo, M. (2019). Particled: Computational Discretism, or The Rise of the Digital Discrete. *Architectural Design*, 89(2), 86–93. <https://doi.org/10.1002/ad.2416>
- Castriotto, C., Giantini, G., y Celani, G. (2019). Biomimetic Reciprocal Frames A design investigation on bird's nests and spatial structures. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 1, pp. 613–620). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_210
- Chaillou, S. (2022). *Artificial intelligence and architecture: From research to practice*. Basel [Switzerland] ; Boston [MA]: Birkhauser Verlag GmbH.
- Chancharoen, R., y Sithiwichankit, C. (2019). Digital Fabrication of a 3D Object using Fixtureless Assembly. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 635(1). Institute of Physics Publishing. Scopus. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/635/1/012035>

- Chancharoen, R., y Sithiwichankit, C. (2020). A novel digital discrete manufacturing to build up a 3D-object. *Engineering Journal*, 24(1), 209–220. Scopus.
<https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.1.209>
- Chang, T.-W., Huang, H.-Y., y Datta, S. (2019). Design and fabrication of a responsive carrier component envelope. *Buildings*, 9(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/buildings9040084>
- Cheng, T., Wood, D., Kiesewetter, L., Özdemir, E., Antorveza, K., y Menges, A. (2021). Programming material compliance and actuation: Hybrid additive fabrication of biocomposite structures for large-scale self-shaping. *Bioinspiration & Biomimetics*.
<https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac10af>
- Cichocka, J. M., Migalska, A., Browne, W. N., y Rodriguez, E. (2016). *SILVEREYE- the implementation of Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm in a single objective optimization tool for Grasshopper* (1a ed.). Vienna.
- Classen, M., Ungermann, J., y Sharma, R. (2020). Additive manufacturing of reinforced concrete-development of a 3D printing technology for cementitious composites with metallic reinforcement. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(11). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/app10113791>
- Claypool, M. (2019). Our Automated Future: A Discrete Framework for the Production of Housing. *Architectural Design*, 89(2), 46–53. <https://doi.org/10.1002/ad.2411>
- Claypool, M., Jimenez Garcia, M., Retsin, G., Soler, V., y Institut für Internationale Architektur-Dokumentation. (2019). *Robotic building: Architecture in the age of automation* (M. Linder, Ed.).

- Codarin, S. (2020). Additive Manufacturing Technologies in Restoration: An Innovative Workflow for Interventions on Cultural Heritage. *Cubic Journal*, 3, 32–55. Scopus. <https://doi.org/10.31182/cubic.2020.3.023>
- Couzin, I. D., y Krause, J. (2003). Self-Organization and Collective Behavior in Vertebrates. En *Advances in the Study of Behavior* (Vol. 32, pp. 1–75). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-3454\(03\)01001-5](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(03)01001-5)
- Couzin, I. D., Krause, J., James, R., Ruxton, G. D., y Franks, N. R. (2002). Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups. *Journal of Theoretical Biology*, 218(1), 1–11. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2002.3065>
- del Campo, M., Carlson, A., y Manninger, S. (2021). Towards Hallucinating Machines—Designing with Computational Vision. *International Journal of Architectural Computing*, 19(1), 88–103. <https://doi.org/10.1177/1478077120963366>
- Dhameliya, M., Sher, S., y Chowdhury, S. (2018). Prototyping and simulated analysis of autonomous swarm-bots. *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf., 5A-2018*. American Society of Mechanical Engineers (ASME). Scopus. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-86226>
- Dias, P. G. F., Silva, M. C., Rocha Filho, G. P., Vargas, P. A., Cota, L. P., y Pessin, G. (2021). Swarm Robotics: A Perspective on the Latest Reviewed Concepts and Applications. *Sensors*, 21(6), 2062. <https://doi.org/10.3390/s21062062>
- Díaz López, E., Martínez Prieto, A., y Gálvez Lio, D. (2016). Una implementación de la meta-heurística “Optimización en Mallas Variables” en la arquitectura CUDA. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10, 42–56.
- Dierichs, K., Kyjánek, O., Loučka, M., y Menges, A. (2019). Construction robotics for designed granular materials: In situ construction with designed granular materials at full

- architectural scale using a cable-driven parallel robot. *Construction Robotics*, 3(1), 41–52.
<https://doi.org/10.1007/s41693-019-00024-6>
- Dillenburger, B., Gramazio, F., Kohler, M., y Mayer, H. (Eds.). (2020). *How to Build a House: Architectural Research in the Digital Age*. Germany: ETH Zurich. Recuperado de www.dfabhouse.ch
- Dörfler, K., Dielemans, G., Lachmayer, L., Recker, T., Raatz, A., Lowke, D., y Gerke, M. (2022). Additive Manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction. *Cement and Concrete Research*, 158. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772>
- Dunn, N. (2012). *Digital fabrication in architecture*. London: King.
- Eisenman, P. (2011). *Diez edificios canónicos 1950-2000* (A. Lourie, Ed.; M. Puente, Trad.). Barcelona: Gustavo Gili.
- electric Bricks. (2010, abril 29). Vehículos de Braitenberg en RobotC. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <http://blog.electricbricks.com/2010/04/vehiculos-de-braitenberg-en-robotc/>
- Fossdal, F. H., Dyvik, J., Nilsson, J. A., Nordby, J., Helgesen, T. N., Heldal, R., y Peek, N. (2020). Fabricatable machines: A toolkit for building digital fabrication machines. *TEI - Proc. Int. Conf. Tangible, Embed., Embodied Interact.*, 411–422. Association for Computing Machinery, Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1145/3374920.3374929>
- Frailé Narvaez, M. (2022). El diseño computacional: Un estudio de casos. *Anales de Investigación en Arquitectura*, 12(1). <https://doi.org/10.18861/ania.2022.12.1.3216>
- Frampton, K. (2014). *Historia crítica de la arquitectura moderna* (Cuarta edición; J. Sainz, Trad.). Barcelona (España): Gustavo Gili.

- García de Soto, B., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., y Adey, B. T. (2018). Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in Construction*, 92, 297–311. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>
- García-Alvarado, R., Martínez, A., González, L., y Auat, F. (2020). Projections of 3D-printed construction in Chile. *Revista Ingenieria de Construcción*, 35(1), 60–72. Scopus.
<https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100060>
- Geoghegan, B. D. (2023). *Code: From information theory to French theory*. Durham: Duke University Press.
- Giannopoulou, E., Baquero, P., Warang, A., Orciuoli, A., Estévez, A. T., y Brun-Usan, M. A. (2019). Employing mesh segmentation algorithms as fabrication strategies. Pattern generation based on reaction- diffusion mechanism. *FME Transactions*, 47(2), 379–386. Scopus. <https://doi.org/10.5937/fmet1902379G>
- Globa, A., Costin, G., Wang, R., Khoo, C. K., y Moloney, J. (2019). Hybrid Environmental-Media Facade Full-Scale Prototype Panel Fabrication. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 2, pp. 685–694). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_262
- Gomaa, M., Jabi, W., Veliz Reyes, A., y Soebarto, V. (2021). 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. *Automation in Construction*, 124. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>
- Gorgas García, J., y Cardiel López, N. (2011). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*.
- Groat, L. N., y Wang, D. (2002). *Architectural research methods*. New York: J. Wiley.

- Groenewolt, A., Schwinn, T., Nguyen, L., y Menges, A. (2018). An interactive agent-based framework for materialization-informed architectural design. *Swarm Intelligence*, 12(2), 155–186. <https://doi.org/10.1007/s11721-017-0151-8>
- Hack, N., Dörfler, K., Walzer, A. N., Wangler, T., Mata-Falcón, J., Kumar, N., ... Kohler, M. (2020). Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: A real scale architectural demonstrator. *Automation in Construction*, 115. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103197>
- Hansen, S. G., Kunic, A., y Naboni, R. (2021). A reversible connection for robotic assembly of timber structures. *Engineering Structures*, 245. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112795>
- Hensel, M., Sunguroglu, D., y Menges, A. (2008). Material Performance. *Architectural Design*, 78(2), 34–41. <https://doi.org/10.1002/ad.639>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., Méndez Valencia, S., y Mendoza Torres, C. P. (2014). *Metodología de la investigación*. México, D.F.: McGraw-Hill Education.
- Hirschberg, U., Hovestadt, L., y Fritz, O. (Eds.). (2020). *Atlas of digital architecture: Terminology, concepts, methods, tools, examples, phenomena*. Boston: Birkhauser.
- Hosmer, T., y Tigas, P. (2019). Deep Reinforcement Learning for Autonomous Robotic Tensegrity (ART). En Bieg K., Briscoe D., y Odom C. (Eds.), *Ubiquity Auton. - Pap. Proc. Annu. Conf. Assoc. Comput. Aided Des. Archit., ACADIA* (pp. 16–29). ACADIA. Scopus. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085732432&partnerID=40&md5=81aace6dd113b20d61f78e8c01ffc2bc>

- Hou, Y., y Loh, P. (2021). Towards swarm construction. En Globa A., van Ameijde J., Fingrut A., Kim N., y Lo T.T.S. (Eds.), *Proj. - Proc. Int. Conf. Assoc. Comput.-Aided Archit. Des. Res. Asia, CAADRIA* (Vol. 1, pp. 673–682). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Scopus. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104595139&partnerID=40&md5=0b163ee63ff41b8d20107d4d4f6f99ca>
- Hua, Y., Deng, Y., y Petersen, K. (2019). Robots building bridges, not walls. *Proc. - IEEE Int. Workshops Found. Appl. Self* Syst., FAS*W*, 154–159. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1109/FAS-W.2018.00041>
- Huang, Y., Leung, P. Y. V., Garrett, C., Gramazio, F., Kohler, M., y Mueller, C. (2021). The new analog: A protocol for linking design and construction intent with algorithmic planning for robotic assembly of complex structures. En Spencer S.N. (Ed.), *Proc.: SCF - ACM Symp. Comput. Fabr.* Association for Computing Machinery, Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1145/3485114.3485122>
- Hwang, I. (2006). *Verb natures*. Barcelona: Actar.
- Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. London: Laurence King.
- Kayser, M., Cai, L., Falcone, S., Bader, C., Inglessis, N., Darweesh, B., y Oxman, N. (2018). Design of a multi-agent, fiber composite digital fabrication system. *Science Robotics*, 3(22). Scopus. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau5630>
- Kennedy, J., y Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, 4*, 1942–1948 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>

- Knippers, J., Kropp, C., Menges, A., Sawodny, O., y Weiskopf, D. (2021). Integrative computational design and construction: Rethinking architecture digitally. *Civil Engineering Design*, 3(4), 123–135. <https://doi.org/10.1002/cend.202100027>
- Kunic, A., Kramberger, A., y Naboni, R. (2021). Cyber-Physical Robotic Process for Re-Configurable Wood Architecture: Closing the circular loop in wood architecture. En Stojakovic V. y Tepavcevic B. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 2, pp. 181–188). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. Recuperado de Scopus.
- Kuzmenko, K., Féraille, A., y Baverel, O. (2019). Improving Construction Efficiency with Digital Fabrication. An Environmental Insight. En Passer A., Lutzkendorf T., Habert G., Kromp-Kolb H., y Monsberger M. (Eds.), *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* (Vol. 323). Institute of Physics Publishing. Scopus. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012014>
- Kyjanek, O., Al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., y Menges, A. (2019, mayo 24). *Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication*. Presentado en 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Banff, AB, Canada. Banff, AB, Canada. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0164>
- Lachmayer, L., Recker, T., Dielemans, G., Dörfler, K., y Raatz, A. (2022). AUTONOMOUS SENSING AND LOCALIZATION OF A MOBILE ROBOT FOR MULTI-STEP ADDITIVE MANUFACTURING IN CONSTRUCTION. En Hinz S., Feitosa R.Q., Weinmann M., y Jutzi B. (Eds.), *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* (Vol. 43, pp. 453–458). International Society for Photogrammetry and

Remote Sensing. Scopus. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-453-2022>

Leach, N. (2021). *Architecture in the age of artificial intelligence: An introduction for architects*. London ; New York: Bloomsbury Visual Arts.

Leder, S., Kim, H., Oguz, O. S., Kubail Kalousdian, N., Hartmann, V. N., Menges, A., ... Sitti, M. (2022). Leveraging Building Material as Part of the In-Plane Robotic Kinematic System for Collective Construction. *Advanced Science*, n/a(n/a), 2201524. <https://doi.org/10.1002/advs.202201524>

Leder, S., Weber, R., Wood, D., Bucklin, O., y Menges, A. (2019). Distributed Robotic Timber Construction. *ACADIA 2019: Ubiquity and Autonomy*, 11.

Leung, P. Y. V., Apolinarska, A. A., Tanadini, D., Gramazio, F., y Kohler, M. (2021).

AUTOMATIC ASSEMBLY OF JOINTED TIMBER STRUCTURE USING DISTRIBUTED ROBOTIC CLAMPS. 11.

Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gotzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., ... Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: Explanation and elaboration. *BMJ*, 339(jul21 1), b2700–b2700. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>

Lloret-Fritschi, E., Scotto, F., Gramazio, F., Kohler, M., Graser, K., Wangler, T., ... Mata-Falcón, J. (2019). Challenges of real-scale production with smart dynamic casting. En *RILEM Bookseries* (p. 310). Springer Netherlands. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_28

- Lye, J., y Andrasek, A. (2021). Machine Learning Combinatorial Frameworks for Architecture. *International Journal of Innovation and Economic Development*, 7(2), 20–29.
<https://doi.org/10.18775/ijied.1849-7551-7020.2015.72.2002>
- Lynn, G. (1998). *Folds, bodies & blobs: Collected essays*. Bruxelles: La Lettre volée.
- Ma, Z., Walzer, A., Schumacher, C., Rust, R., Gramazio, F., Kohler, M., y Bächer, M. (2020). Designing Robotically-Constructed Metal Frame Structures. *Computer Graphics Forum*, 39(2), 411–422. <https://doi.org/10.1111/cgf.13940>
- Martins, P. F., Nunes, S., de Campos, P. F., y Sousa, J. P. (2019). RETHINKING THE PHILIPS PAVILION THROUGH ROBOTIC HOT WIRE CUTTING. An experimental prototype. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 3, pp. 235–244). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-eaadesigradi2019_660
- Melenbrink, N., Werfel, J., y Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in Construction*, 119, 103312.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103312>
- Menges, A. (2008). Manufacturing Performance. *Architectural Design*, 78(2), 42–47.
<https://doi.org/10.1002/ad.640>
- Menges, A. (2015). About the Guest Editor: About the Guest Editor. *Architectural Design*, 85(5), 6–7. <https://doi.org/10.1002/ad.1946>
- Menges, A., y Knippers, J. (2020). *Architecture research building: ICD/ITKE 2010/20* (1a ed.). Boston: Birkhauser.

- Mesa, O., Mhatre, S., y Aukes, D. (2020). CREASE: Synchronous gait by minimizing actuation through folded geometry. *International Journal of Architectural Computing*, 18(4), 385–403. Scopus. <https://doi.org/10.1177/1478077120948204>
- Mesa, O., Mhatre, S., Singh, M., y Aukes, D. (2019). CREASE Synchronized Gait Through Folded Geometry. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 3, pp. 197–206). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_541
- Ming, C., Mirjan, A., Medina Ibáñez, J., Gramazio, F., y Kohler, M. (2022). Impact Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 9(3), 203–211. Scopus. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0068>
- Mitterberger, D., Ercan Jenny, S., Vasey, L., Lloret-Fritschi, E., Aejmelaeus-Lindström, P., Gramazio, F., y Kohler, M. (2022). Interactive Robotic Plastering: Augmented Interactive Design and Fabrication for On-site Robotic Plastering. *Conf Hum Fact Comput Syst Proc.* Presentado en 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI 2022. Association for Computing Machinery. Scopus. <https://doi.org/10.1145/3491102.3501842>
- Momeni, M., Relefors, J., Khatri, A., Pettersson, L., Papadopoulos, A. V., y Nolte, T. (2022). Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell. *Automation in Construction*, 133. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103990>
- Morel, P. (2019). The Origins of Discretism: Thinking Unthinkable Architecture. *Architectural Design*, 89(2), 14–21. <https://doi.org/10.1002/ad.2407>

- Müller, C., Müller, J., Kloft, H., y Hensel, J. (2022). Design of Structural Steel Components According to Manufacturing Possibilities of the Robot-Guided DED-Arc Process. *Buildings*, 12(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/buildings12122154>
- Naboni, R., Breseghello, L., y Kunic, A. (2019). Multi-scale design and fabrication of the Trabeculae Pavilion. *Additive Manufacturing*, 27, 305–317. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.005>
- Naboni, R., Kunic, A., y Breseghello, L. (2020). Computational design, engineering and manufacturing of a material-efficient 3D printed lattice structure. *International Journal of Architectural Computing*, 18(4), 404–423. Scopus. <https://doi.org/10.1177/1478077120947990>
- Nisser, M., Cheng, L., Makaram, Y., Suzuki, R., y Mueller, S. (2021). Programmable Polarities: Actuating Interactive Prototypes with Programmable Electromagnets. *Adjun. Publ. Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol., UIST*, 121–123. Association for Computing Machinery, Inc. Scopus. <https://doi.org/10.1145/3474349.3480198>
- Nuh, M., Oval, R., Orr, J., y Shepherd, P. (2022). Digital fabrication of ribbed concrete shells using automated robotic concrete spraying. *Additive Manufacturing*, 59. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103159>
- Onchi, A. (2021). *Algoritmos y Arquitectura: Una aportación al Diseño* (Tesis, Universidad Autónoma de Baja California). Universidad Autónoma de Baja California, México. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12930/7966>
- Onchi-Rascón, A. T., Cid-Cruz, J. A., Caraveo, C., Mejía-Medina, D. A., y Bojórquez-Morales, G. (2023). Ecosystem Visualization and Diversity Analysis of the Fourth Digital Age in Architecture. *SIGraDi 2023 Accelerated Landscapes*. Presentado en XXVII International

- Conference of the Ibero-American Society of Digital Graphics, Punta del Este, Maldonado, Uruguay. Punta del Este, Maldonado, Uruguay. Recuperado de www.sigradi.org/sigradi2023
- Oxman, N. (2015). Templating Design for Biology and Biology for Design: Templating Design for Biology and Biology for Design. *Architectural Design*, 85(5), 100–107.
<https://doi.org/10.1002/ad.1961>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Panagiotidou, V., Koerner, A., Cruz, M., Parker, B., Beyer, B., y Giannakopoulos, S. (2022). 3D extrusion of multi-biomaterial lattices using an environmentally informed workflow. *Frontiers of Architectural Research*, 11(4), 691–708. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.06.010>
- Petersen, K. H., Napp, N., Stuart-Smith, R., Rus, D., y Kovac, M. (2019). A review of collective robotic construction. *Science Robotics*, 4(28), eaau8479.
<https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau8479>
- PRISMA. (s/f). Recuperado el 20 de junio de 2023, de <http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/>
- Reas, C., y Fry, B. (2007). *Processing: A programming handbook for visual designers and artists*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Reas, C., y McWilliams, C. (2010). *Form+code in design, art, and architecture* (1st ed). New York: Princeton Architectural Press.

ResearchGate. (2023, enero 1). Recuperado el 26 de junio de 2023, de ResearchGate website:

<https://www.researchgate.net/>

Resnick, M. (2002). *Turtles, termites, and traffic jams: Explorations in massively parallel microworlds* (8. printing). Cambridge, Mass.: MIT Press.

Retsin, G. (2019). Discrete Architecture in the Age of Automation. *Architectural Design*, 89(2), 6–13. <https://doi.org/10.1002/ad.2406>

Reynolds, C. (2001). Boids (Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model).

Recuperado el 31 de mayo de 2023, de <https://www.red3d.com/cwr/boids/>

Rogean, N., Latteur, P., y Weinand, Y. (2021). An integrated design tool for timber plate structures to generate joints geometry, fabrication toolpath, and robot trajectories.

Automation in Construction, 130. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103875>

Rojas-García, Á. A. (2015). *Topologías de optimización por enjambre de partículas basadas en información mutua* (Centro de Investigación en Matemáticas A.C. Departamento de Ciencias de la Computación). Centro de Investigación en Matemáticas A.C.

Departamento de Ciencias de la Computación, Guanajuato, México. Recuperado de <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1008/370>

Rossi, G., y Nicholas, P. (2019). Haptic Learning Towards Neural-Network-based adaptive Cobot Path-Planning for unstructured spaces. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 2, pp. 201–210).

Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus.

https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_280

- Rust, R., Xydis, A., Heutschi, K., Perraudin, N., Casas, G., Du, C., ... Kohler, M. (2021). A data acquisition setup for data driven acoustic design. *Building Acoustics*, 28(4), 345–360. Scopus. <https://doi.org/10.1177/1351010X20986901>
- Saavedra-Alcoba, M., Gutierrez-Callejas, M., y Enríquez-Paz, L. (2016). Análisis de Comportamientos de Vehículos de Braitenberg para la búsqueda robótica usando El Robot LEGO EV3. *Fides Et Ratio*, 12(12), 155–166.
- Sanchez, J. (2019). Architecture for the Commons: Participatory Systems in the Age of Platforms. *Architectural Design*, 89(2), 22–29. <https://doi.org/10.1002/ad.2408>
- Sanchez, J. (2020). *Architecture for the commons*. New York: Routledge.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, 79(4), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>
- Schumacher, P. (2011). *The autopoiesis of architecture. Vol. 1: A new framework for architecture*. Chichester: Wiley.
- Schumacher, P. (2012). *The autopoiesis of architecture. Vol. 2: A new agenda for architecture*. Chichester: Wiley.
- Shaked, T., y Degani, A. (2021). Shepherd: A fabrication-oriented tool for simulation and control of mobile robotic platforms for collaborative earthworks. En Doe A.S. y Goode B. (Eds.), *Assoc. Comput. Aided Des. Archit. Annu. Conf., ACADIA*. ACADIA. Scopus. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85130651905&partnerID=40&md5=fa6e14b46e3fd28308c0a2c997393373>
- Shannon, C. E., y Weaver, W. (1998). *The mathematical theory of communication* (21. print). Urbana: Univ. of Illinois Press.

- Shiffman, D. (2012). *The nature of code: Simulating natural systems with processing* (Version 1.0, generated December 6, 2012). s.l.: Selbstverl.
- Shiffman, D. (2015). *Learning processing: A beginner's guide to programming images, animation, and interaction* (Second edition). Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann.
- Snooks, R. (2018). *Behavioral formation: Volatile design processes and the emergence of a strange specificity*. New York, NY: Actar Publisher.
- Stenson, M. W. (2017). *Architectural Intelligence: How Designers and Architects Created the Digital Landscape*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/10971.001.0001>
- Stieler, D., Schwinn, T., Leder, S., Maierhofer, M., Kannenberg, F., y Menges, A. (2022). Agent-based modeling and simulation in architecture. *Automation in Construction*, 141, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104426>
- Stuart-Smith, R., Danahy, P., y Rotta, N. R. L. (2020). Topological and material formation. En Slocum B., Ago V., Doyle S., Marcus A., Yablonina M., y del Campo M. (Eds.), *Proc. Annu. Conf. Assoc. Comput. Aided Des. Archit.: Distrib. Prox., ACADIA* (Vol. 1, pp. 290–299). ACADIA. Scopus. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85115694369&partnerID=40&md5=849075509a5710a346310c3e3efb71f7>
- Szabo, A., Lloret-Fritschi, E., Reiter, L., Gramazio, F., Kohler, M., y Flatt, R. J. (2019). Revisiting Folded Forms with Digital Fabrication. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 2, pp. 191–200). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_126

- Taha, N., Walzer, A. N., Ruangjun, J., Bürgin, T., Dörfler, K., Lloret-Fritschi, E., ... Kohler, M. (2019). Robotic AeroCrete A novel robotic spraying and surface treatment technology for the production of slender reinforced concrete elements. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 3, pp. 245–254). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_675
- Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., Li, B., y Huang, J. (2022). Digital-enabled Design for Manufacture and Assembly (DfMA) in offsite construction: A modularity perspective for the product and process integration. *Architectural Engineering and Design Management*. Scopus. <https://doi.org/10.1080/17452007.2022.2104208>
- Tavakoli, M., Viegas, C., Sgrigna, L., y de Almeida, A. T. (2018). SCALA: Scalable Modular Rail based Multi-agent Robotic System for Fine Manipulation over Large Workspaces. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 89(3–4), 421–438. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0560-3>
- Tedeschi, A. (2014). *AAD - Algorithms-Aided Design: Parametric strategies using Grasshopper* (First edition). Brienza: Le Penseur publisher.
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture* (1st ed). Amsterdam ; Boston: Architectural Press.
- Thoma, A., Jenny, D., Helmreich, M., Gandia, A., Gramazio, F., y Kohler, M. (2019). Cooperative Robotic Fabrication of Timber Dowel Assemblies. En C. Leopold, C. Robeller, y U. Weber, *Research Culture in Architecture* (pp. 77–88). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783035620238-008>
- Triola, M. F. (2006). *Estadística* (9a ed). México: Pearson/Educación.

- Tucker, C., Yang, X., Lehrecke, A., Maierhofer, M., Duque Estrada, R., y Menges, A. (2022). A Collaborative Multi-robot Platform for the Distributed Fabrication of Three-dimensional Fibrous Networks (Spatial Lacing). En Spencer S.N. (Ed.), *Proc. - SCF - Annu. ACM Symp. Comput. Fabr.* Association for Computing Machinery, Inc. Scopus.
<https://doi.org/10.1145/3559400.3561995>
- Urrútia, G., y Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: Una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- van Eck, N. J., y Waltman, L. (2010). *VOSviewer—Visualizing scientific landscapes* [Software]. Leiden, Netherlands: Centre for Science and Technology Studies, Leiden University.
Recuperado de <https://www.vosviewer.com/>
- Vasey, L., Felbrich, B., Prado, M., Tahanzadeh, B., y Menges, A. (2020). Physically distributed multi-robot coordination and collaboration in construction: A case study in long span coreless filament winding for fiber composites. *Construction Robotics*, 4(1–2), 3–18.
<https://doi.org/10.1007/s41693-020-00031-y>
- Velázquez Fernández, Á. R., y Rey Córdova, N. (2013). *Metodología de la investigación científica*. Perú: San Marcos.
- Vestartas, P., Rad, A. R., y Weinand, Y. (2021). Robotically-fabricated nexorades from whole timber. En Fivet C., D'Acunto P., Fernandez Ruiz M., Fernandez Ruiz M., y Ohlbrock P.O. (Eds.), *Fib. Symp.* (pp. 539–546). fib. The International Federation for Structural Concrete. Scopus. <https://doi.org/10.35789/fib.PROC.0055.2021.CDSymp.P067>

- Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., y Shochet, O. (1995). Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Physical Review Letters*, 75(6), 1226–1229. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1226>
- Vieira, T. D. S. L., y Schulz, J.-U. (2019). Design Method Aided by MABS and Cloud Computing Framework integrating: Construction techniques, materials, and fabrication. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 1, pp. 195–205). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-eaaadesigradi2019_288
- Wagner, H. J., Alvarez, M., Kyjanek, O., Bhiri, Z., Buck, M., y Menges, A. (2020). Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM. *Automation in Construction*, 120. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103400>
- Wang, D., y Snooks, R. (2021). Intuitive behavior: The operation of reinforcement learning in generative design processes. En Globa A., van Ameijde J., Fingrut A., Kim N., y Lo T.T.S. (Eds.), *Proj. - Proc. Int. Conf. Assoc. Comput.-Aided Archit. Des. Res. Asia, CAADRIA* (Vol. 1, pp. 101–110). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA). Scopus. Recuperado de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85104645563&partnerID=40&md5=7ca0ccb21cab5e477eae877a0bf010fc>
- Weaver, W. (1991). Science and Complexity. En G. J. Klir, *Facets of Systems Science* (pp. 449–456). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0718-9_30

- Wortmann, T. (2019). Genetic evolution vs. function approximation: Benchmarking algorithms for architectural design optimization. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 414–428. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.09.001>
- Wu, N. H., Dimopoulou, M., Hsieh, H. H., y Chatzakis, C. (2019). A digital system for AR fabrication of bamboo structures through the discrete digitization of bamboo. En Sousa J.P., Henriques G.C., y Xavier J.P. (Eds.), *Proc. Int. Conf. Educ. Res. Comput. Aided. Archit. Des. Eur.* (Vol. 2, pp. 161–170). Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Scopus. https://doi.org/10.5151/proceedings-eaaadesigradi2019_538
- Wujec, T. (2017). *The Future of Making: Understanding the forces shaping how and what we create*. New York: Melcher Media. Recuperado de <https://www.autodesk.com/future-of-making-things/hardcopy-book>
- Yablonina, M., y Menges, A. (2019). Distributed Fabrication: Cooperative Making with Larger Groups of Smaller Machines. *Architectural Design*, 89(2), 62–69. <https://doi.org/10.1002/ad.2413>
- Yang, X., Loh, P., y Leggett, D. (2019). Robotic variable fabric formwork. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 404–413. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.10.001>
- Yuan, P. F., Beh, H. S., Yang, X., Zhang, L., y Gao, T. (2022). Feasibility study of large-scale mass customization 3D printing framework system with a case study on Nanjing Happy Valley East Gate. *Frontiers of Architectural Research*, 11(4), 670–680. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.05.005>

Zotero | Your personal research assistant. (s/f). Recuperado el 28 de junio de 2023, de <https://www.zotero.org/>

APÉNDICE I

Tabla 25.

Descripción de simuladores robóticos y sus características.

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
<p>a. RoBIM Automated Solutions for the Construction Industry</p> <p><i>RoBIM Technologies, Inc.</i>[®]</p> <p>Costo: No disponible en página web. Contacto directo con desarrolladores.</p> <p>Sitio web: www.robim.net</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪RoBIM <i>Simulator</i>: entorno virtual para simular, planear y controlar robots industriales. ▪RoBIM <i>Construction</i>: soluciones automatizadas para la industria de la construcción. ▪Simulación basada en la nube. ▪Programación visual integrada. ▪Motor de físicas integrado con algoritmos basados en IA para el diseño de rutas libres de colisión. ▪Integración con <i>software</i> BIM (<i>Revit</i>[®] – <i>Dynamo</i>[®]) para la extracción e importación de información geométrica. ▪Librerías de brazos robóticos industriales comerciales. ▪Librerías de efectores finales comerciales (<i>end-effectos</i>). ▪Diseño de rutas de movimiento ▪Patrones de fabricación ▪Robótica colectiva 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Servicio enfocado en desarrollo de simuladores para propósitos de construcción. ▪Soluciones automatizadas para futuras construcciones. ▪Soluciones holísticas para el sitio de fabricación ▪Análisis de constructibilidad virtual a partir de simulación de gravedad virtual del motor integrado de físicas. ▪Simulador incluye catálogo de modelos de brazos robóticos industriales, efectores finales (<i>end-effectors</i>) con modelos cinemáticos de fabricantes comerciales. ▪Asistencia para el diseño personalizado del sistema robótico. ▪Interfaz intuitiva y controles sencillos. ▪Programa no requiere de programación dura para el diseño de la simulación y el control robótico. ▪Programación visual para el diseño de la simulación y el control robótico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Programa de simulación no puede ser descargado en sitio web. ▪Previsualización del simulador no muestra apartado de análisis estadístico de datos. ▪Previsualización del simulador no muestra datos de las físicas implícitas de las acciones del robot y las características de los materiales a utilizar. ▪Programa no permite el diseño directo del robot y del efector final (<i>end-effector</i>), requiere de asistencia. ▪Programa no permite el diseño directo del sistema robótico y su simulación, requiere de asistencia. ▪Contacto directo con desarrolladores para adquirir programa. ▪Ofertan un servicio de soluciones robóticas para la construcción más que el programa de simulación.

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
<p>b. SIEMENS <i>Tecnomatix</i></p> <p>SIEMENS®, <i>Robotics & Automation Simulation</i></p> <p>Costo: No disponible en página web. Contacto directo con proveedores. Prueba gratuita de 30 días (descarga en sitio web)</p> <p>Sitio web: www.dex.siemens.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programación <i>offline</i>. ▪ Programación textual (dura) XML. ▪ Comportamiento realístico de modelos 3D cinemáticos ▪ Librerías de brazos robóticos industriales comerciales. ▪ Librerías de efectores finales comerciales (<i>end-effectos</i>). ▪ Herramientas dedicadas a varias aplicaciones robóticas: soldadura de puntos o de arco, taladro, remachado, corte, rociado, recoger y colocar. ▪ Diseño de rutas de movimiento ▪ Patrones de fabricación ▪ Robótica colectiva ▪ Métricas y gráficas de físicas y eficiencia del sistema robótico. ▪ RCS (<i>Realistic Controller Simulation</i>) ▪ VRC (<i>Virtual Robot Controller</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servicio enfocado en desarrollo de simuladores para propósitos de industriales. ▪ Soluciones automatizadas para el diseño de células industriales. ▪ Simulador incluye catálogo de modelos de brazos robóticos industriales, efectores finales (<i>end-effectors</i>) con modelos cinemáticos de fabricantes comerciales. ▪ Descarga gratuita con licencia de evaluación por 30 días. ▪ Visualización de datos. ▪ Métricas y gráficas de eficiencia del sistema robótico. ▪ Validación virtual del proceso robótico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo por licencia no mostrado en web, comunicación directa con proveedor. ▪ Programa no permite el diseño personalizado del robot y del efector final (<i>end-effector</i>). ▪ Programa no permite el diseño personalizado del sistema robótico y su simulación. ▪ Programa enfocado en líneas de fabricación industrial. ▪ Interfaz compleja que incluye programación textual XML y visualización de datos.
<p>c. DS DELMIA</p> <p><i>Dessault Systemes</i>® DELMIA: <i>Design, Validate, and Program Robotics Work Cells with Speed and Accuracy</i></p> <p>Costo: No disponible en página web. Contacto directo con proveedores. Es posible descargar demo al</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programación <i>offline</i>. ▪ Programación textual (dura). ▪ Comportamiento realístico de modelos 3D cinemáticos ▪ Librerías de brazos robóticos industriales comerciales. ▪ Librerías de efectores finales comerciales (<i>end-effectos</i>). ▪ Herramientas dedicadas a varias 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Servicio enfocado en desarrollo de simuladores para propósitos de industriales. ▪ Soluciones automatizadas para el diseño de células industriales. ▪ Simulador incluye catálogo de modelos de brazos robóticos industriales, efectores finales (<i>end-effectors</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Costo por licencia no mostrado en web, comunicación directa con proveedor. ▪ Programa no permite el diseño personalizado del robot y del efector final (<i>end-effector</i>). ▪ Programa no permite el diseño personalizado del sistema robótico y su simulación. ▪ Programa enfocado en líneas de fabricación

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
<p>contactar proveedor.</p> <p>Sitio web: https://www.3ds.com/products-services/delmia/</p>	<p>aplicaciones robóticas: soldadura de puntos o de arco, taladro, remachado, corte, rociado, recoger y colocar.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪Diseño de rutas de movimiento ▪Patrones de fabricación ▪Robótica colectiva ▪Métricas y gráficas de físicas y eficiencia del sistema robótico. ▪Diseño de células de fabricación industrial 	<p>con modelos cinemáticos de fabricantes comerciales.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪Descarga gratuita con licencia de evaluación por 30 días. ▪Visualización de datos. ▪Métricas y gráficas de eficiencia del sistema robótico. ▪Validación virtual del proceso robótico. 	<p>industrial</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪Interfaz compleja que incluye programación textual y visualización de datos.
<p>d. Visual Components</p> <p><i>Visual Components® Robot Simulation Software</i></p> <p>Costo: No disponible en página web. Contacto directo con proveedores. Es posible descargar programa en sitio web, pero requiere licencia.</p> <p>Sitio web: https://www.visualcomponents.com/</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪Programación <i>offline</i>. ▪Programación textual (dura) XML. ▪Comportamiento realístico de modelos 3D cinemáticos ▪Librerías de brazos robóticos industriales comerciales. ▪Librerías de efectores finales comerciales (<i>end-effectos</i>). ▪Herramientas dedicadas a varias aplicaciones robóticas: soldadura de puntos o de arco, taladro, remachado, corte, rociado, recoger y colocar. ▪Diseño de rutas de movimiento ▪Patrones de fabricación ▪Robótica colectiva ▪Métricas y gráficas de físicas y eficiencia del sistema robótico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Servicio enfocado en desarrollo de simuladores para propósitos de industriales. ▪Soluciones automatizadas para el diseño de células industriales. ▪Simulador incluye catálogo de modelos de brazos robóticos industriales, efectores finales (<i>end-effectors</i>) con modelos cinemáticos de fabricantes comerciales. ▪Descarga gratuita con licencia de evaluación por 30 días. ▪Visualización de datos. ▪Métricas y gráficas de eficiencia del sistema robótico. ▪Validación virtual del proceso robótico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Costo por licencia no mostrado en web, comunicación directa con proveedor. ▪Programa no permite el diseño personalizado del robot y del efector final (<i>end-effector</i>). ▪Programa no permite el diseño personalizado del sistema robótico y su simulación. ▪Programa enfocado en líneas de fabricación industrial ▪Interfaz compleja que incluye programación textual XML y visualización de datos.
<p>e. ROBOTS for</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪Complemento para la 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Interacción directa con 	<ul style="list-style-type: none"> ▪Complemento no

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
<p>Grasshopper</p> <p>MIT – <i>Massachusetts Institute of Technology</i></p> <p>Costo: Gratuito</p> <p>Sitio web: https://www.food4rhino.com</p>	<p>simulación robótica en la plataforma de programación visual <i>Grasshopper</i> del programa CAD <i>Rhinoceros</i>[®].</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Programación visual directa en <i>Grasshopper</i>. ▪ Visualización directa del resultado de programación en <i>Rhinoceros</i>[®]. ▪ Comportamiento realístico de modelos 3D cinemáticos ▪ Librerías de brazos robóticos industriales utilizadas en instituciones educativas. ▪ Librerías de efectores finales (<i>end-effectors</i>) utilizadas en instituciones educativas. ▪ Diseño de rutas de movimiento ▪ Patrones de fabricación. ▪ Robótica colectiva. ▪ Visualización y exportación de datos desde <i>Grasshopper</i>. 	<p>modelo 3D personalizado realizado en <i>Rhinoceros</i>[®] o <i>Grasshopper</i>.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulador incluye catálogo de modelos de brazos robóticos industriales, efectores finales (<i>end-effectors</i>) con modelos cinemáticos utilizados en instituciones educativas. ▪ Permite simular la fabricación de una construcción personalizada de un modelo realizado en <i>Rhinoceros</i>[®] y <i>Grasshopper</i>. ▪ Complemento de <i>Grasshopper</i> gratuito y de uso libre. ▪ Visualización y exportación de datos desde <i>Grasshopper</i>. ▪ Diseño directo y personalizado de las rutas de movimiento del sistema robótico. ▪ Complemento permite realizar programación textual (dura) con <i>Python</i>, <i>C#</i> o <i>VS.NET</i>. 	<p>permite el diseño personalizado del robot y del efector final (<i>end-effector</i>).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Complemento no permite el diseño personalizado del sistema robótico y su simulación.
<p>f. Webots: Open-Source Robot Simulator</p> <p><i>Cyberbotics Ltd. – Open-Source Robot Simulator</i> –</p> <p>Costo: Gratuito. Planes de asistencia a usuario y consultoría desde CHF\$500 al año.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Comportamiento realístico de modelos 3D cinemáticos. ▪ Amplia biblioteca de activos que incluye: robots, sensores, actuadores, objetos y materiales. ▪ Permite la importación de modelos 3D desde <i>Blender</i>[™] o URDF. ▪ Permite la importación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programa permite el diseño directo del sistema robótico personalizado y su simulación. ▪ Programa permite el diseño directo de actuadores o efectores finales (<i>end-effectors</i>) personalizados. ▪ Es posible realizar programación robótica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programa no arroja gráficas que muestren las métricas de la simulación (sin embargo, es posible adquirir los datos y enviarlos a graficar de manera externa).

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
Sitio web: https://cyberbotics.com/	<p>de mapas de <i>OpenStreetMaps</i>.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Variedad de simulaciones: robots de dos llantas, brazos robóticos industriales, bípedos, robots de brazos múltiples, robots modulares, automóviles, drones, vehículos submarinos autónomos, vehículos espaciales, entre otros. ▪ Ambientes interactivos de espacios abiertos e interiores. ▪ Creación de prototipos robóticos. ▪ Desarrollo, prueba y validación de IA y algoritmos de control. ▪ Motor de físicas (ODE <i>fork</i>) y motor de renderizado <i>OpenGL</i> 3.3. ▪ Programación robótica con múltiples lenguajes (C, C++, <i>Python</i>, <i>Java</i>, MATLAB, ROS). 	<p>con <i>Python</i>, <i>Java</i>, ROS, entre otros.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Visualización de datos en interfaz de programa. 	
<p><i>g. Unity: Robotic Simulation</i></p> <p><i>Unity</i>[®] Technologies</p> <p>Costo: Gratuito.</p> <p>Sitio web: https://unity.com/es/solutions/automotive-transportation-manufacturing/robotics</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Motor de videojuegos multiplataforma para crear y operar contenido interactivo 3D en tiempo real. ▪ Plataforma permite el modelado, programación y simulación de robots. ▪ Amplia biblioteca de activos para el diseño, acceso a herramientas y el desarrollo de prototipos. ▪ Motor de físicas (SDK de <i>PhysX</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Programa permite el diseño directo del sistema robótico personalizado y su simulación. ▪ Programa permite el diseño directo de actuadores o efectores finales (<i>end-effectors</i>) personalizados. ▪ Es posible realizar programación robótica a través de <i>UnityScript</i>, <i>C#</i>, <i>Boo</i> (inspirado en <i>Python</i>). ▪ Plataforma permite el 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plataforma enfocada en el desarrollo y visualización interactiva de contenido 3D. ▪ Programa no arroja gráficas que muestren las métricas de la simulación. ▪ Tiene que programarse la visualización de datos y gráficas. ▪ Requiere de experiencia en desarrollo de videojuegos y

Simulador (empresa, costo, sitio web)	Características (parámetros, variables de análisis)	Aportaciones	Limitaciones
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite la importación de modelos 3D desde <i>BlenderTM</i>, <i>3ds Max[®]</i>, <i>Maya[®]</i>, <i>ZBrush[®]</i>, <i>Cinema 4D[®]</i>, entre otros. ▪ Programación robótica con múltiples lenguajes (<i>UnityScript</i>, <i>C#</i>, <i>Boo</i>). 	adiestramiento de IA colectiva.	programación.

Nota. Elaboración propia (2022).