



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO GRAMATICAL PARA GENERAR LA
ESTRUCTURA MORFOLÓGICA INICIAL DE
CRIATURAS VIRTUALES CONSIDERANDO
PREMISAS DE VIDA Y EVOLUCIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Doctor en Ciencias de la Ingeniería

PRESENTA:

Rafael Mercado Herrera

DIRIGIDA POR:

Dra. Vianney Muñoz Jiménez
Dr. Marco Antonio Ramos Corchado
Dr. Raymundo Marcial Romero



Toluca, México, febrero 2023

Whether we are based on carbon or on silicon makes no fundamental difference; we should each be treated with appropriate respect.

Arthur C. Clarke

Reconocimientos

A mi familia que con su apoyo me fue posible continuar mis estudios sin preocupaciones externas y llegar a este punto.

A mis compañeros de sala en el posgrado por sus consejos para mantenerme a la par de los requerimientos del programa.

A los doctores Vianney Muñoz y Marco Ramos por su constante guía durante estos años para dar forma y obtener resultados de esta investigación.

A los doctores Raymundo Marcial y Félix Ramos por su asesoramiento a lo largo de esta investigación para identificar las debilidades y oportunidades presentes en la misma.

A los miembros del sínodo, cuyas opiniones y sugerencias ayudaron a mejorar la calidad de este documento.

Finalmente, esta investigación fue posible gracias al financiamiento ofrecido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por medio de su programa de becas nacionales al expediente número 784441/751592.

Resumen

El estudio de los seres vivos permite formalizar características tales como genotipos y fenotipos que permiten entender los conceptos de evolución y adaptación de acuerdo a las condiciones del medio ambiente u entorno.

Son varias las áreas de conocimiento que se interesan en comprender los mecanismos y funciones de los seres vivos, para poder resolver problemas que son difíciles de tratar dado a la cantidad de fenómenos observados que deben considerarse para la solución a diversos problemas.

Las ciencias computacionales es un área interesada en los procesos de los seres vivos debido a la posibilidad de tratar datos de forma masiva y en tiempos relativamente cortos, dando origen a una nueva área de conocimiento conocida como Vida Artificial.

El estudio de los seres vivos ofrece innumerables oportunidades para comprender los diferentes fenómenos que la componen; el entender su funcionamiento sirve como inspiración en el diseño de sistemas que mimeticen la vida, por ejemplo, los autómatas o mecanismos complejos. La concepción de la vida artificial presenta la oportunidad de expandir estos estudios permitiendo realizar investigaciones en entornos de estudio controlados (entornos virtuales) e incluso con un proceso evolutivo controlado, para formalizar las características encontradas en los seres vivos.

La posibilidad de simular los procesos y premisas de los seres vivos, dan cause al origen de las criaturas virtuales, entidades con la capacidad de evolucionar tanto su comportamiento como su morfología de forma autónoma. El estado actual de las investigaciones sigue avanzando con distintos objetivos, entre los avances identificados se encuentran la utilización de abstracciones observadas en el mundo natural como lo es la mimetización de la morfología dentro de las criaturas virtuales. Es en este sentido que se utilizan procesos evolutivos que permitan modificar la estructura morfológica inicial de una criatura virtual, para lograr resolver problemas de diseño en la construcción de mecanismos y componentes.

Los avances ocurren en cada parte del proceso, desde la representación de las criaturas virtuales como genotipo para la evolución, su fenotipo resultante y las estrategias evolutivas empleadas con diversos propósitos, dependiendo de la disciplina que retoma el tema. Esta investigación busca formalizar el proceso de la construcción morfológica de criaturas virtuales que puedan evolucionar de acuerdo a las necesidades propias de la vida como lo es la subsistencia dentro del ambiente.

La novedad de este trabajo de investigación es el uso de premisas biológicas que se incorporan a la construcción de criaturas virtuales. Así mismo un estudio multidisciplinario de premisas que pueden aplicarse en la construcción de la morfología de las criaturas virtuales; se emplea una metodología de desarrollo con una inclusión incremental de dichas premisas; finalmente, se propone un modelo gramatical para la generación de morfologías de criaturas virtuales en un entorno de simulación considerando un subconjunto de las premisas identificadas. Este modelo es estudiado en cuanto a su viabilidad para la generación de morfologías de criaturas virtuales y la identificación de actividad evolutiva en una simulación computacional.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Rafael Mercado Herrera. Toluca, México, 2023

Tabla de contenido

	Pág.
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Motivación	4
1.4. Justificación	4
1.5. Objetivo	5
1.6. Hipótesis	6
1.7. Alcances	6
1.8. Contribuciones	6
1.9. Estructura de la tesis	7
2. Marco teórico y Estado del Arte	9
2.1. Antecedentes	9
2.1.1. Premisas multidisciplinarias	10
2.1.2. Representación gramatical para la construcción de una criatura virtual	17
2.2. Estado del arte	20
3. Metodología para la construcción morfológica de criaturas virtuales	29
4. Desarrollo de la morfogénesis en la construcción de criaturas virtuales	34
4.1. Características de las criaturas virtuales	34
4.2. Características del entorno virtual	37

4.2.1. Diseño del entorno	39
4.3. Utilización y aplicación de las premisas identificadas	40
4.4. Selección de premisas iniciales	42
4.5. Generación del modelo gramatical	43
4.5.1. Modelo Gramatical	44
4.5.2. Destino celular	46
4.5.3. Canalización	46
4.5.4. Generación del modelo gramatical para la construcción de la criatura virtual	48
4.6. Estrategia de evolución	49
4.6.1. Algoritmo genético	50
5. Resultados	56
5.1. Validación de generación de morfologías	56
5.2. Conclusiones	61
5.3. Trabajos Futuros	63
5.4. Contribución Social	64
5.5. Publicaciones	64
Referencias	74

Índice de figuras

	Pág.
2.1. Ejemplo L-system.	17
2.2. Genotipo y fenotipo de Sims.	18
3.1. Flujo de la metodología.	30
4.1. Morfología de la criatura virtual bajo los supuestos 4.2.	36
4.2. Ejemplo una articulación en pyrosim	39
4.3. Boceto de la distribución del entorno virtual	40
4.4. Ejemplo de uso de delimitadores de extremidades	45
4.5. Aplicación de canalización.	47
5.1. Morfologías de las cuatro criaturas virtuales generadas.	58
5.2. Movimiento de una criatura	59
5.3. Distancia promedio alcanzada por cada generación.	61
5.4. Criatura tras evolución	62

Índice de tablas

	Pág.
2.1. Clasificación de aportes de evolución de criaturas virtuales	27
4.1. Elementos del simulador seleccionados para experimentación inicial. . .	38
4.2. Clasificación de premisas de acuerdo a desarrollo o análisis	41
4.3. Ejemplo del método de cruza	53
4.4. Ejemplo del método de mutación	54
5.1. Genotipos de dos criaturas y sus hijos	57
5.2. Desarrollo gramatical del Hijo I	58

Introducción

En este capítulo se introduce el problema de investigación definiendo los objetivos y contribuciones al estado de arte en el área de las ciencias computacionales para el estudio de la morfología de las criaturas virtuales.

1.1. Presentación

El estudio de la vida biológica tal como la concebimos ofrece innumerables retos, y esto radica en la propia definición de la vida. Innumerables autores coinciden que no existe una definición concreta de la vida, pero sí existe un consenso en definir la vida como premisas; estas representan características observadas dentro de la biología y los seres vivos.

Una premisa es un conjunto de características observables en el comportamiento de los seres vivos, por ejemplo: la locomoción, la necesidad de refugio, alimentación, reproducción y adaptación, entre otros. Las premisas pueden adicionar nuevos elementos observables que mejoran la concepción del objeto de estudio a definir, por ejemplo, en el proceso de locomoción se involucran articulaciones y músculos, sin embargo, no se considera el gasto energético que esto requiere, por lo cual se mejora la premisa a través de agregación de nuevas características observables para compensar el gasto energético.

La posibilidad de simular los procesos y premisas de los seres vivos, dan causa al origen de lo que hoy conocemos como vida artificial. Ésta utiliza a las ciencias computacionales para construir simulaciones que permitan reproducir los fenómenos observados en la naturaleza y la representación de los seres vivos se conoce como criaturas virtuales. Una criatura virtual es una entidad capaz de evolucionar tanto su comportamiento como su morfología de forma autónoma.

Las criaturas virtuales son utilizadas en diversas disciplinas como herramienta para encontrar soluciones distintas, ya sea para su implementación en tareas de ingeniería y robótica evolutiva, o para su estudio en cuanto a biología y vida artificial. La posibilidad de incorporar premisas y paradigmas en los procesos empleados en la generación de criaturas virtuales permite que puedan ser utilizadas por otras disciplinas.

La representación de la criatura virtual se basa en su genotipo, entendiéndose como la carga genética que es utilizada para la construcción morfológica de la criatura virtual, en ésta se considera el número de extremidades y articulaciones con la que contará para realizar procesos de supervivencia dentro de su ambiente virtual.

El ambiente virtual se caracteriza por el espacio en el que la criatura virtual cohabita siguiendo reglas de interacción definidas de acuerdo al objeto de estudio, los ambientes virtuales se pueden clasificar de acuerdo a los fenómenos físicos que se deseen realizar. Estos se pueden clasificar por [1, 2]:

- Accesible ó inaccesible: Si las criaturas virtuales son capaces de obtener información completa, precisa y actual del ambiente virtual.
- Determinista ó no determinista: Si el ambiente virtual presenta un único efecto garantizado para cada acción.
- Estático ó dinámico: Si el ambiente virtual es inmutable excepto por las acciones de la criatura virtual.
- Discreto ó continuo: Si las criaturas virtuales que habitan en el ambiente virtual son capaces de realizar un número fijo y finito de acciones.

Los fenotipos son características particulares dentro del genotipo que pueden ser modificadas mediante el proceso de evolución, la evolución es un mecanismo que permite a las criaturas virtuales persistir dentro del ambiente virtual adaptándose a las condiciones que éste ejerce sobre las criaturas virtuales.

En el área de criaturas virtuales, la forma de generar a las criaturas virtuales se basa en la representación genética que normalmente es descrita mediante un modelo gramatical. El modelo gramatical se interpreta como las partes del cuerpo de la criatura virtual conformado por la cabeza, el torso y las extremidades.

En este trabajo de investigación se busca la forma de integrar premisas con mejores características para la construcción morfológica de las criaturas virtuales, posibilitando mecanismos evolutivos [3] dentro de la morfología que permitan obtener mejores individuos (criaturas virtuales) capaces de persistir en el ambiente virtual y responder a problemas propios para la supervivencia.

1.2. Planteamiento del problema

Las criaturas virtuales son utilizadas para encontrar la solución a problemas específicos dentro de las diferentes áreas de estudio, como pueden ser los elementos de diseño de mecanismos articulados que tendrán que ser utilizados en alguna tarea o proceso específico, por ejemplo, un brazo robot. Una de las deficiencias que se encuentran en la construcción de la criatura virtual se debe a que las extremidades que la componen son elementos fijos que imposibilitan corregir los grados de libertad para alcanzar el logro necesario. Para mejorar este tipo de deficiencias en la construcción de la criatura virtual es necesario dotar al genotipo y el fenotipo con nuevas premisas que permitan evolucionar en nuevas criaturas virtuales capaces de atender y adaptarse a las condiciones del ambiente virtual.

En el trabajo seminal de Sims [4], las criaturas virtuales son capaces de moverse en busca de alimento para persistir dentro del ambiente virtual, esto se logra mediante una definición morfológica fija y una red neuronal como sistema de aprendizaje que permite mover las extremidades más alejadas del cuerpo principal de la criatura virtual, logrando que la criatura pueda moverse. Los resultados obtenidos son valiosos sin embargo resulta complejo incorporar nuevas características observadas en los seres vivos como lo es la evolución.

De acuerdo a lo observado, la principal problemática radica en como definir un genotipo inicial para la morfología de la criatura virtual. Esta morfología será carga genética para futuras criaturas virtuales, utilizando la evolución para lograr criaturas virtuales altamente especializadas para realizar una tarea, incorporando premisas

biológicas como: Embriogenia, Genética y Neuroevolución.

Es necesario establecer un marco de referencia multidisciplinario que permita a los investigadores potenciar la experimentación con criaturas virtuales al identificar conocimientos disponibles en otras disciplinas para que las aportaciones no sean de forma aislada.

1.3. Motivación

Comprender los procesos de adaptación y evolución de los seres vivos, nos permite abstraer sus propiedades y formalizarlas para posteriormente experimentar con ellas. La vida artificial permite recrear las propiedades de los seres vivos, mediante simulaciones por computadora utilizando criaturas virtuales. Investigadores y autores coinciden en que los procesos adaptativos evolutivos son necesarios para encontrar soluciones a problemas en los que la misma dinámica del ambiente los convierte en complejos.

La posibilidad de contar con herramientas computacionales que permitan utilizar propiedades de adaptación y evolución en la búsqueda de soluciones, sería un gran aliado para las diferentes áreas del conocimiento.

Las criaturas virtuales, son una buena forma de experimentar y poder observar los procesos adaptativos y evolutivos de acuerdo al ambiente y los objetivos que tienen que ser alcanzados por éstas.

Investigar y contribuir al estado actual dentro de criaturas virtuales para expandir el conocimiento bajo las premisas de evolución y adaptación abre la posibilidad a presentar una propuesta de modelo basado en premisas multidisciplinarias para la construcción morfogénica de criaturas virtuales.

1.4. Justificación

La posibilidad de evaluar morfologías mediante criaturas virtuales, permite la construcción de mecanismos capaces de ser utilizados en tareas que requieren los seres humanos para realizar sus actividades cotidianas. Así mismo las simulaciones de las criaturas

virtuales en entornos virtuales controlados permiten lograr estructuras morfológicas especializadas para la realización de tareas específicas.

La evolución de la morfología de las criaturas virtuales ofrece oportunidades tanto para el estudio de la vida [5], como para el diseño de nuevos mecanismos de ingeniería [6]. La implementación de premisas multidisciplinarias al estudio de criaturas virtuales expande la posibilidad de mejora [7, 8], por lo que un estudio de estas premisas y su implementación en experimentos con criaturas virtuales puede ofrecer resultados prometedores en diversas áreas de estudio.

1.5. Objetivo

Objetivo general:

Desarrollar un generador de estructuras morfológicas de criaturas virtuales incorporando premisas de vida y evolución, donde la morfología se encuentra definida por un conjunto de huesos y articulaciones, que son evaluadas en un entorno virtual.

Objetivos específicos:

- Identificar las premisas multidisciplinarias de vida aplicables a una criatura virtual.
- Seleccionar un subconjunto inicial de premisas para proponer un modelo de generación de morfología de criaturas virtuales.
- Adecuar el generador morfológico a un algoritmo genético para garantizar la evolución de la criatura virtual.
- Crear el ambiente virtual donde se puedan desenvolver las criaturas virtuales.
- Evaluar la viabilidad del modelo propuesto usando el ambiente virtual.

1.6. Hipótesis

La inclusión de premisas de vida y evolución en una gramática para la generación de morfologías iniciales de la criatura virtual, permite su adaptación y evolución en el medio ambiente mejorando su morfología en futuras generaciones para alcanzar sus objetivos.

1.7. Alcances

El enfoque primordial de esta investigación es proponer un genotipo inicial utilizando una gramática para la obtención inicial de la estructura morfológica de criaturas virtuales empleando conceptos mutlidisciplinarios del concepto de la vida llamados premisas.

La morfología de una criatura virtual se limita en esta investigación a un conjunto de huesos y articulaciones (móviles o fijas) entre ellos; El comportamiento de las criaturas es de locomoción.

1.8. Contribuciones

Esta investigación contribuye al estado del arte con los siguientes puntos:

- Se realiza un estudio multidisciplinario de premisas aplicables al ámbito de criaturas virtuales y se presenta esta recopilación como material de consulta.
- Se define un genotipo utilizando gramáticas para la generación de morfología de criaturas virtuales empleando premisas multidisciplinarias del concepto de la vida.
- Se proponen métodos evolutivos aplicables al genotipo para el fenotipo embebidos dentro de la gramática.

- Se implementa una función de memoria procedural que mejora el fenotipo de la criatura virtual, esta mejora permite realizar a la criatura virtual una tarea específica validando la propuesta, los resultados son presentados en una publicación indexada.
- Los hallazgos encontrados durante esta investigación se publicaron en revistas especializadas listados en la sección [5.5](#).

1.9. Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis está basado en la vida artificial, sobre todo en la creación de entidades virtuales capaces de exhibir un comportamiento autónomo, estas entidades son llamadas criaturas virtuales. La autonomía está basada directamente a la adaptación y evolución de las criaturas virtuales de acuerdo al medio ambiente donde se encuentren inmersas.

Este capítulo presenta una introducción con algunas definiciones para que el lector comprenda el problema y tenga los antecedentes necesarios de la solución propuesta. También se presenta el planteamiento del problema, el objetivo general, los particulares, la pregunta de investigación y las contribuciones alcanzadas en forma de lista que son discutidas en la sección de conclusiones.

El capítulo dos aborda el marco teórico y estado del arte del tema estudiado, adicionalmente se identifican las premisas multidisciplinarias sobre la definición de la vida biológica y cuales de éstas pueden ser utilizadas para la construcción de criaturas virtuales.

El tercer capítulo está dedicado a la metodología propuesta para la generación de criaturas virtuales que sean capaces de exhibir autonomía en los procesos locomoción. la metodología se basa en la generación de un genotipo inicial que permita transferencia de carga genética para las futuras generaciones, es a partir de los fenotipos que se incorporan premisas de los seres vivos que serán utilizados sobre todo en las morfologías de las criaturas. La singularidad de la metodología propuesta es la posibilidad de adecuar la incorporación de premisas gracias a la definición de capas.

El cuarto capítulo detalla los elementos de la propuesta: el diseño del entorno de experimentación, las premisas seleccionadas de los seres vivos que serán incrustadas en

el genotipo inicial utilizando una gramática incremental, que permita la construcción de morfologías basadas en adaptación y evolución.

El quinto capítulo muestra los resultados de la experimentación del modelo propuesto utilizando una herramienta 3D.

Finalmente en los dos últimos capítulos, se exponen las conclusiones alcanzadas y aportes realizados al estado del arte.

Marco teórico y Estado del Arte

“ La evolución es una creación sin dejar de mejorarse ”, Henri Bergson.

2.1. Antecedentes

El estudio de la vida biológica como de sus propiedades es de sumo interés debido a las posibilidades que ésta tiene para resolver problemas, gracias a los mecanismos de adaptación y evolución. Es la misma área de la biología que se interesa en poder reproducir los fenómenos de los seres vivos de forma sintética. En 1993 Thomas S. Ray, publica el libro *“An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life”* [9], que busca sintetizar vida *in silico* (en computadora); para 1994 Carl Sims [4] logra simular criaturas virtuales capaces de desplazarse dentro de un ambiente virtual controlado, también se encuentra el sistema AVIDA de Adami y Brown [5], con el que demuestran que la distribución espacial es conducente para la diversificación de la población, además de la importancia de la tasa de mutación y el tamaño de la población durante el proceso de evolución.

El estudio de criaturas virtuales se ve favorecido por premisas y estrategias identificadas en otras disciplinas, como fue el surgimiento de los algoritmos genéticos, a partir del Neo-Darwinismo, para modelar y encontrar soluciones a problemas complejos.

Como se mencionó anteriormente, la vida se caracteriza por propiedades que, de acuerdo a cierta formalización, pueden replicarse de forma sintética. Las propiedades de los seres vivos se les denomina premisas, por lo general estas son aportaciones de las diferentes áreas del conocimiento.

2.1.1. Premisas multidisciplinarias

En esta sección trataremos las premisas encontradas que pueden ser incorporadas en la construcción de criaturas virtuales, de acuerdo a lo estudiado, se identifican 25 premisas de interés, así como la factibilidad de su integración en la generación de las criaturas virtuales. La posibilidad de abstraer los conceptos y formalizarlos permiten reproducirlos de forma sintética, esto es, llevarlos a simulaciones por computadora. Las áreas estudiadas para la obtención de las 25 premisas son: *Embriogenia*, *Embriogenia artificial*, *Genética*, *Neurociencia*, *Robótica Evolutiva* y *Computo evolutivo*. Cabe mencionar que dichas áreas, no son las únicas que aportan premisas al concepto de la vida, sin embargo, las seleccionadas son las de mayor integración en la generación de criaturas virtuales.

En los siguientes párrafos se describen las premisas seleccionadas de las áreas antes mencionadas.

Embriogenia

La Embriogenia, también llamada embriogénesis, consiste en el proceso de formación de patrones de células con el fin de generar arreglos de estructuras específicas [10]. Los conceptos de embriogenia son sintetizados en cinco dimensiones por Stanley et al. [11]. Estas dimensiones dan origen a las 5 primeras premisas que se integran a la construcción de la criatura virtual.

Premisa 1. Destino celular: Rol de las células.

Premisa 2. *Targeting*: Posición final de las células.

Premisa 3. Heterocronía: Sincronización y orden de eventos.

Premisa 4. Canalización: Ajuste del desarrollo a cambios causados por mutación.

Premisa 5. **Complexificación:** Ocasionalmente se agregan genes nuevos al genoma.

Cada una de estas dimensiones describe el desarrollo y la organización de las “células” o elementos de la criatura virtual en un entorno tal que la traducción del genotipo al fenotipo tenga mayor complejidad que una traducción directa [12].

Al definir el rol de las células que se van generando (destino celular) y la posición en la criatura virtual que tendrán (*target*), la generación de la morfología de la criatura virtual se convierte en un proceso que puede ser afectado por su entorno y las mismas características del genotipo.

Adicionalmente, se requiere de un control que otorgue importancia al genotipo e impida que el desarrollo sea guiado enteramente por el entorno de la criatura (canalización); con este balance de presiones en el desarrollo, éste se ve guiado por las reglas del genoma que son perturbadas por el entorno (heterocronía) y controladas con el fin de generar una criatura virtual viable.

Finalmente, y en línea con el cómputo evolutivo, se presta atención a la posibilidad de alterar la estructura del genoma para abrir el desarrollo al proceso evolutivo (complexificación).

Cabe destacar que estas dimensiones identificadas engloban al proceso de desarrollo de la criatura virtual y pueden o no ser tomadas en cuenta para la tarea o el fenómeno particular que se esté estudiando.

Embriogenia artificial

La embriogenia artificial parte de la observación en donde la embriogenia implica un desarrollo susceptible al entorno y el tiempo, se consideran dos puntos de vista generales del proceso en la construcción de la criatura virtual. De ahí que surgen 2 premisas que son:

Premisa 6. **Gramáticas:** Conjunto de reglas aplicadas al embrión.

Premisa 7. **Química celular:** Simula procesos de bajo nivel de desarrollo biológico.

Para el modelado de las criaturas virtuales por medio de gramáticas, se emplea un conjunto de reglas para la generación de la morfología de una criatura virtual. Lo que se busca con este enfoque es lograr una morfología que cumpla los requisitos mínimos de estructura, para posteriormente ir mejorándola cada vez con mas detalle hasta lograr una gramática que pueda generar una criatura virtual capaz de realizar tareas específicas.

Genética

La genética estudia las características heredadas que se transmiten de generación en generación dentro de los seres vivos permitiendo la adaptación y evolución de acuerdo a las condiciones del medio ambiente. Las premisas identificadas en el análisis genético [13] pueden trasladarse directamente al ámbito de criaturas virtuales. Dado que las criaturas virtuales son generadas a partir de una codificación genotipo \rightarrow fenotipo, en donde los conceptos y conocimientos involucrados en el análisis genético tienen un uso práctico y de referencia para analizar y desarrollar criaturas virtuales.

Por un lado, se encuentra el análisis realizable sobre las criaturas virtuales, necesario para identificar cambios atribuibles a la actividad evolutiva (también llamada aparición [14]). Esto es que a partir de múltiples generaciones nuevas características aparecen en los individuos. Estas premisas se reconocen como:

Premisa 8. Flujo genético: Migración entre poblaciones hace converger frecuencias de alelos.

Premisa 9. Deriva genética: Cambio aleatorio de frecuencias de alelos en una población causa la pérdida, modificación u obtención de características, lo que facilita la especiación.

Premisa 10. Especiación: Divergencia genética entre poblaciones causa una diferenciación.

Cabe destacar que el reto de identificar la actividad evolutiva en las criaturas virtuales es un problema abierto hasta estos tiempos [15], [16]. Este interés sostenido advierte las expectativas y limitaciones que se observan en el desarrollo y entendimiento de las

criaturas virtuales. Emplear los conceptos existentes en la genética nos permite identificar y dar nombre a los sucesos que ocurren durante el proceso de la evolución en las criaturas virtuales.

Dependiendo del estudio que se esté realizando, cada concepto otorga pautas para comprender el proceso de evolución. Si se busca emplear múltiples poblaciones, el flujo genético y la especialización permiten reconocer cuando la evolución de las poblaciones están convergiendo o divergiendo respectivamente; un ejemplo de estrategia de desarrollo que lidia con el manejo de múltiples poblaciones es el presentado en [17] donde sugieren una jerarquización de poblaciones para probar distintas estrategias de evolución de manera paralela, y un ecosistema donde individuos de estas poblaciones interactúan y son observados para realizar estudios comparativos o incluso una evolución conjunta.

La deriva genética da nombre a la serie de mutaciones y combinaciones de alelos que causan esa misma convergencia/divergencia entre poblaciones. El cambio genético en el tiempo permite cuantificar las diferencias entre individuos al nivel de alelos, lo que permite calcular las distancias genéticas entre individuos a nivel temporal y de especie, llamado árbol filogenético [18].

La evolución depende directamente de los cambios que se produzcan en la genética de los individuos, pero se pueden extraer premisas aplicables al desarrollo de criaturas virtuales que se listan a continuación:

- Premisa 11. Epigenéticas: Conjuntos de genes interactúan para formar alguna característica.
- Premisa 12. Barrido selectivo/*hitchhiking*: La selección de un alelo durante la reproducción también modifica la frecuencia de presentación del vecindario del alelo.
- Premisa 13. Selección sexual: Selección de pareja realizada por cada individuo genera presión selectiva para características específicas.

Las premisas 11, 12 y 13, aunque presentes en la evolución natural, no son necesariamente aplicadas a la evolución artificial. Del mismo modo que la embriogenia, e incluso como parte de ella, las epigenéticas agregan una dimensión de variabilidad al desarrollo de las criaturas virtuales considerando su mismo material genético. Usado de manera

abstracta [4], la misma codificación genética determina el número de extremidades o la longitud de las mismas.

Durante la evolución, el barrido selectivo aparece como una herramienta de combinación disponible para la nueva generación de criaturas virtuales. En la recombinación natural están involucrados genes (denominados *hotspots*) que tienen la mayor probabilidad de ser el punto de corte del cromosoma para la recombinación en su vecindario. Esta recombinación permite la proliferación de características no necesariamente útiles durante la selección pero igualmente capaces de alterar el desarrollo de la criatura.

Finalmente, la selección sexual es otra técnica de selección disponible para el desarrollo de criaturas virtuales; en el mundo natural tiene como resultado la prevalencia de características (en ocasiones perjudiciales para la supervivencia del individuo) que distinguen a los individuos de distintas especies y les permite evitar intentos infructuosos de reproducción entre especies.

Neurociencia

Esta disciplina lidia con la funcionalidad y el desarrollo del sistema nervioso, tomando en cuenta que este sistema media un conjunto amplio de funciones, desde la detección de estímulos ambientales, hasta el control muscular, resolución de problemas, lenguaje y memoria [19]. Es por esta razón, que las premisas derivadas de esta disciplina tienen un impacto directo en el área de criaturas virtuales. Las premisas aplicables involucradas en el desarrollo morfológico y control de las criaturas se listan a continuación [20]:

- Premisa 14. Potenciación/depresión a largo plazo: Disparo sincronizado incentiva sincronización, el contrario aislamiento.
- Premisa 15. Sensación somática y sistemas de sensores: Distintos “anchos de banda” en sensores ofrece jerarquía de sensaciones.
- Premisa 16. Husos musculares y tendones de Golgi: Funcionamiento encontrado de actuadores.
- Premisa 17. Generadores centrales de patrones: “Circuitos locales” permiten funcionamientos recurrentes.

Premisa 18. Conos de crecimiento: Neuronas tienen un cono de potencial de crecimiento, guiado por química en su lugar objetivo.

Premisa 19. Plasticidad funcional: Funciones se mueven de áreas dañadas.

Premisa 20. Plasticidad estructural: Experiencias cambian la estructura del cerebro.

En el desarrollo morfológico, el uso de conos de crecimiento es utilizado en criaturas virtuales [21] a los cuales se les pueden agregar a un nivel más alto, los generadores centrales de patrones como circuitos localizados de control motor; un funcionamiento similar obtenido en criaturas virtuales se encuentra en [22] que también emplean el funcionamiento de huesos musculares. En sintonía con la canalización en la embriogenia, la plasticidad funcional implica una tolerancia a perturbaciones; a un nivel más elevado y durante el ciclo de vida, la plasticidad estructural y la potenciación/depresión a largo plazo implican una mayor robustez y adaptabilidad al entorno.

Para el control de la criatura el uso de sensores es prevalente [4, 23, 24] y la mimetización de músculos y tendones es enteramente dependiente del objetivo que se tenga en el desarrollo de criaturas virtuales, pasando desde una abstracción del funcionamiento muscular [25] hasta la mimetización de los huesos musculares y tendones [26], o de la simulación de actuadores mecánicos [24]. Un ejemplo del empleo de plasticidad estructural se encuentra en [27] donde una evolución inicial genera criaturas virtuales con una morfología y comportamiento adaptados a una tarea específica, mediante métodos de encapsulamiento y jerarquización de sus redes neuronales, las criaturas virtuales son capaces de adaptar sus capacidades iniciales a nuevas tareas.

Robótica evolutiva

La robótica evolutiva retoma las herramientas y conocimientos de criaturas virtuales para aplicarlas al proceso de diseño de mecanismos y robots, por lo que se encuentra con las mismas interrogantes y áreas de oportunidad que en el área de criaturas virtuales [28], aunado a esto, propuestas y hallazgos encontrados en robótica evolutiva también deben ser de interés para la construcción y mejora de la adaptabilidad de la criatura virtual. Las premisas de interés para criaturas virtuales que fueron encontradas en el área de robótica evolutiva son:

Premisa 21. Evolución encarnada: No hay administrador central de evolución, cercanía

física permite apareamiento.

Premisa 22. Modelos de desarrollo: Desarrollo de morfología durante la vida del individuo.

La evolución encarnada [29] es aplicada en robótica evolutiva enfocándose en el comportamiento de los robots, pero puede ser adaptada a la evolución de criaturas virtuales por medio de otras herramientas de selección, como es la selección sexual presentada anteriormente.

Los modelos de desarrollo [30] siguen la línea de la metamorfosis encontrada en la naturaleza; este desarrollo en específico implica cambios a la morfología de la criatura virtual durante su ciclo de vida, no sólo durante embriogénesis, con lo que su adaptabilidad al entorno aumenta, como lo presenta [31].

Cómputo evolutivo

El Cómputo evolutivo, al igual que la robótica evolutiva, retoma el área de criaturas virtuales [4], para mantener un conocimiento actualizado de propuestas y herramientas logrando así definir premisas de búsqueda exhaustiva de cada una de las criaturas virtuales dentro de su medio ambiente. Estas premisas son:

Premisa 23. Búsqueda por novedad: Selección de acuerdo con diferencias entre nuevos individuos y población.

Premisa 24. Búsqueda por sorpresa: Selección de acuerdo con diferencias entre nuevos individuos y predicción.

Premisa 25. Mapeo evolucionable genotipo-fenotipo: Realizar optimización en espacio de genotipo cuando hay soluciones conocidas.

La búsqueda por novedad fue presentada en [32] como una nueva estrategia evolutiva donde prima la diversidad al contrario del rendimiento en cuanto a un objetivo. De manera similar, la búsqueda por sorpresa que fue presentada en [33] deja de lado el rendimiento para buscar individuos difíciles de predecir usando como referencia el historial de individuos de generaciones previas. Ambas propuestas tienen un enfoque

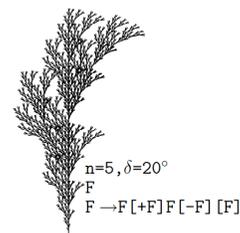
en la diversidad genética de las poblaciones evolucionadas y han comenzado a ser implementadas en el área de criaturas virtuales [34]. En cuanto a su aplicación a criaturas virtuales, la búsqueda por novedad ha sido usada [35, 36] con fines ilustrativos para demostrar que existe un amplio campo de estudio para mejorar la efectividad de los algoritmos genéticos, especialmente al optimizar múltiples objetivos.

2.1.2. Representación gramatical para la construcción de una criatura virtual

El biólogo Aristid-Lindenmayer en 1990 propone una gramática para la construcción de plantas virtuales, logrando una mimetización casi perfecta de varias especies, a estas gramáticas se les conoce como L-systems [37]. Un ejemplo de los resultados que se pueden obtener a partir de la gramática propuesta por Lindenmayer se observan en la Figura 2.1.

En la Figura 2.1 se ilustra un ejemplo del desarrollo de un L-System. Los datos que usa para el desarrollo de un L-System son: n que representa el número de producciones, δ que corresponde al ángulo de inclinación de las nuevas ramas, F representando el axioma, es decir la palabra inicial; y la línea final corresponde a la producción, la regla que indica por quienes se remplazará lo que aparece a la izquierda.

Se comienza con F ; a la primer iteración F es reemplazada por $F[+F]F[-F][F]$, donde los corchetes indican una nueva rama y los signos indican si hay inclinación en la nueva rama (+ es una inclinación en sentido de las manecillas del reloj y - a contrarreloj). El proceso se repite recursivamente n veces (aplicando las producciones pertinentes) para obtener la estructura mostrada.



La idea de utilizar gramáticas para construir estructuras morfológicas es retomada por Karl Sims para la generación de lo que hoy se conoce como criaturas virtuales.

Figura 2.1: Ejemplo del resultado de un L-system [37].

Inicialmente, Karl Sims [4] escogió una representación en forma de grafos dirigidos como genotipo para las criaturas virtuales. En

la Figura 2.2(a) se observa un ejemplo de genotipo para la evolución de las criaturas virtuales; los nodos interiores identifican las neuronas, mientras que los exteriores representan eslabones de la morfología de la criatura y sus recursiones indican la posibilidad de repetición del eslabón; finalmente, el nodo discontinuo representa un conjunto de neuronas que realizan el procesamiento central de la criatura. Las neuronas (todas menos las que llevan J ó E) indican el procesamiento de una función matemática; las neuronas con J son los sensores del eslabón y las neuronas con E son los actuadores.

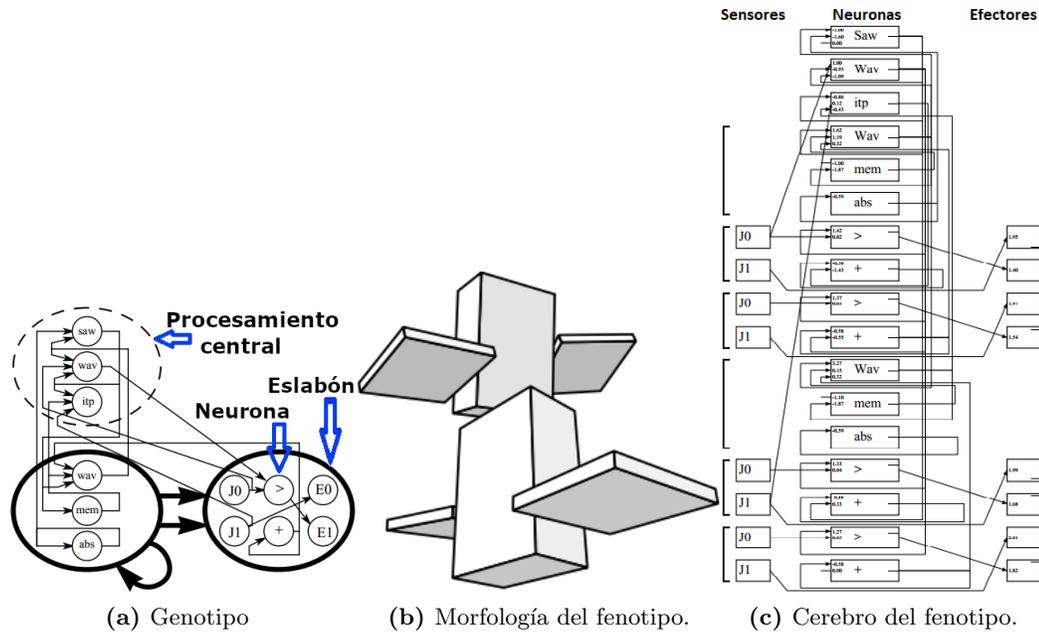


Figura 2.2: Ejemplo del genotipo y su fenotipo generado de acuerdo a la propuesta de Sims. Imágenes tomadas de [4].

A partir del genotipo se produce el fenotipo, el cual incluye la morfología de la criatura y su control, como se observa en los incisos (b) y (c) de la Figura 2.2. Los elementos de la morfología toman como base la gramática propuesta por Lindenmayer en 1968 [37, 38] con la que se generan los eslabones descritos en el genotipo de manera recurrente, mientras que las neuronas independientes sólo se incluyen una vez en el control.

En relación con el trabajo de Sims, Pilat y Jacob en 2008 propusieron “*Creature Academy*” [39], presentado como un laboratorio virtual con múltiples “zonas de entrena-

miento” que brindan un mayor control al investigador, tanto de los niveles de interacción entre zonas como de la organización de rondas jerárquicas de evolución, logrando crear un ecosistema de criaturas o un conjunto de pruebas independientes dependiendo del objetivo del investigador. Terminan mostrando que su sistema es útil para la experimentación con criaturas virtuales usando distintos tipos de estrategias evolutivas.

Extensiones a la propuesta de Sims se observan con trabajos como los de Lessin et al. [27, 40] que expanden la capacidad de aprendizaje de comportamiento de las criaturas virtuales más allá de seguir una luz. Su propuesta se llama ESP por sus siglas en inglés (*Encapsulation, Syllabus and Pandemonium*) que emplea un programa de tareas a aprender (*Syllabus*) creado por el investigador.

Cabe destacar que estos acercamientos modelan la viabilidad de una criatura a partir de un objetivo (p.e. la distancia de la criatura a una fuente de luz después de un periodo de tiempo). Ahora, en el cómputo evolutivo existe una creciente tendencia hacia el empleo de algo más que un *fitness* para la generación de soluciones, como se observa en la propuesta de Lehman y Kenneth en 2011 [41]. Postulan que seguir a una función objetivo puede, en ocasiones, no ser la mejor opción en el cómputo evolutivo; la función objetivo se convierte en un punto de falla, ya sea por la existencia de soluciones engañosas, o que la misma función objetivo actúa como un distractor. En cambio, proponen que se busquen comportamientos novedosos. Hacen sus pruebas de navegación en laberintos y caminar bípedo, que cuentan con un número limitado de comportamientos simples, y descubren que existen tareas que se benefician del acercamiento que ellos proponen.

Stanley y Miikkulainen [11] realizaron un estudio de la embriogenia artificial como un proceso de desarrollo del fenotipo a partir del genotipo; presentaron una taxonomía que permite comparar propuestas de embriogenia artificial e identificaron etapas y procesos de la embriogénesis natural que pueden ser implementados para estudiar su utilidad en el proceso de desarrollo de criaturas virtuales.

De acuerdo a la evolución dentro de la generación de criaturas virtuales, una manera de representar el genoma es mediante la utilización de simbologías adaptadas a gramáticas que mediante mecanismos de recursión puedan desarrollar estructuras morfológicas de acuerdo a las condiciones del entorno. En este sentido, las gramáticas desde la propuesta de L-Systems se han ido perfeccionando generando diferentes aproximaciones como se listan en los párrafos siguientes:

Tree OL-Systems Modelado de la gramática como un árbol. Propuesto inicialmente

para la generación de imágenes de plantas [42] Identifica la generación de ramas y sus segmentos terminales (llamados ápices); es un modelado básico que expanden los otros sistemas.

Bracketed OL-Systems Es una estrategia de programación de los árboles gramaticales *Tree OL-Systems* [42]. Se emplean corchetes ([]) para identificar la generación de una nueva rama, con lo que se guarda la posición actual en el árbol en una pila para que una vez que se haya completado de generar la rama se pueda volver a la posición guardada y continuar con la generación del árbol.

Stochastic L-Systems Es una gramática que utiliza una estrategia probabilística [43] que permite dar variabilidad a los árboles generados. Se le asignan probabilidades de ocurrencia a conjuntos de producciones con el mismo antecesor tal que la suma de probabilidades de cada conjunto es de 1.

Context-sensitive L-Systems Esta gramática permite tomar en cuenta un número específico de elementos a la izquierda o derecha del antecesor, lo que permite obtener árboles con mínimas diferencias lo que permite simular poblaciones de una misma especie.

2.2. Estado del arte

A continuación se exponen brevemente los acercamientos de interés para esta investigación y se resumen en la Tabla 2.1 de acuerdo a características identificadas.

T. S. Ray en 1993 [9] propuso la síntesis de vida en una computadora para estudiar la evolución y ecología con parámetros distintos a los encontrados en la Tierra. En su caso, el entorno y las criaturas eran elementos computacionales (p.e. tiempo de procesador y espacio en memoria, además de programas autorreplicables). Dentro de esta ecología sintética, observó la generación de diversas comunidades a partir de un ancestro cuyo código únicamente realizaba autorreplicación. Las comunidades evolucionadas eran capaces de interacciones complejas como el parasitismo, inmunidad, hiper-parasitismo, sociedades y trampas.

K. Sims en 1994 [4] presentó el artículo seminal de la evolución morfogenética de criaturas virtuales, fue el primer sistema donde se combina la morfología y el control de las criaturas virtuales para la realización de simulaciones físicas en un entorno virtual

tridimensional. La evolución se realizaba por medio de algoritmos genéticos con distintos objetivos de acuerdo a la simulación (p.e. caminar o nadar). Hasta estos días, su modelo sigue siendo usado como base para el estudio de vida artificial en criaturas virtuales.

M. Komosinski desde 1999 [44] ha trabajado en el sistema Framsticks, una herramienta de modelado, simulación y optimización de agentes virtuales con un control embebido. Su entorno de simulación física permite evolucionar criaturas virtuales terrestres y submarinas con tres tipos de sensores (orientación, contacto y olfato) y dos tipos de efectores (doblar y rotar) con una codificación a distintos niveles de abstracción para realizar la evolución.

A. Channon en 2006 [45] presenta un sistema encaminado a conseguir evolución ilimitada para sistemas emergentes. Sus agentes no cuentan con una morfología y se encuentran situados en una cuadrícula de 20x20 con la topología de un toro bidimensional; lo que es suficiente para cumplir con sus objetivos, que son el extender y verificar teorías de evolución emergente.

Von Mammen et al. han trabajado en la inclusión de comportamientos de enjambre en el desarrollo morfológico de criaturas virtuales desde 2007 [46], y su utilidad en otras disciplinas como son la arquitectura [47] y la educación [48]. Su trabajo más reciente [49] extiende su modelo a generar y poblar un entorno virtual completo. Proponen *Swarm Grammars* como una reinterpretación de los L-systems donde la palabra generada por las reglas de producción indica el número y tipo de agentes generando elementos morfológicos en cada momento de la simulación.

M. L. Pilat y C. Jacob en 2008 [39] presentaron un sistema para explorar distintos mecanismos de evolución, diseño y aprendizaje en vida artificial. Su sistema contrasta con otros por la modularidad de sus entornos de experimentación; permite realizar experimentos jerárquicos para evolucionar distintas “especies” de criaturas, que luego son insertadas en un entorno compartido, ésto con la finalidad de estudiar la coevolución de criaturas en una ecología donde la reproducción de las criaturas se rige por proximidad espacial durante la simulación, y no por técnicas de selección, como es el caso de los algoritmos genéticos normales.

A. Loula et al. en 2010 [50] estudiaron la evolución de criaturas virtuales buscando la emergencia de símbolos auto-organizados a partir de restricciones filosóficas y empíricas. Sus criaturas, sin morfología, logran un aprendizaje asociativo para hacer llamados de advertencia a otras criaturas sobre la existencia y el tipo de depredadores (aéreo, terrestre ó subterráneo).

Joachimczak et al. trabajaron en simulaciones de embriogénesis en 3D. Su propuesta [51] es un modelo para embriogenia artificial tridimensional. Abstracciones de redes reguladoras de genes regulan el desarrollo en un espacio continuo donde cada célula es representada por una esfera susceptible al simulador físico. Un algoritmo genético maneja de manera simultánea la evolución y generación de patrones de color de las células con una forma y patrón objetivo. Tras avances posteriores a su modelo [52], lograron evolucionar criaturas virtuales con morfologías complejas y comportamientos de movimiento naturales sin la necesidad un control central [53].

M. A. Pilat et al. en 2012 [54] evolucionaron un comportamiento ligeramente más complejo que el presentado por Sims; sus criaturas virtuales fueron capaces de exhibir un comportamiento de búsqueda de alimento influenciado por la morfología evolucionada de la criatura. Este aporte fue su inicio en el estudio de especiación y coevolución [55] con un enfoque en la morfología de las criaturas.

D. Lessin et al. en 2013 [27] atacaron uno de los mayores problemas observados en la evolución de criaturas virtuales, la aparente barrera en la evolución de comportamiento existente desde el aporte seminal de Sims. Su estrategia de aprendizaje de comportamientos, llamada ESP, se enfocaba en el uso de información de alto nivel proporcionada por el usuario en la forma de un currículum de aprendizaje tal que las tareas tienen una jerarquía y son aprendidas una por una.

Su aporte inicial congelaba la morfología al momento de comenzar el aprendizaje, y una estrategia alterna, propuesta por ellos mismos en 2014 [40], permitió la evolución de la morfología; intercambian la restricción a la morfología por un proceso de repetición de pruebas, que puede tener un costo prohibitivo de no realizarse de manera adecuada.

J. Auerbach et al. en 2014 [56] se dedicaron a la tarea de investigar la injerencia que tiene el entorno en el aumento de la complejidad morfológica producida por la evolución. Plantearon este estudio en criaturas virtuales como una alternativa al estudio en seres vivos, donde el control del entorno es limitado. Emplearon una red neuronal llamada *Compositional Pattern Producing Network (CPPN)*; toman un grid y cada posición dentro del mismo (x, y, z) se alimenta a la red para determinar si es parte del cuerpo de la criatura. Al terminar este proceso, el componente cerrado más grande se usa como extremidad para la criatura, usando dos copias de este componente como extremidades de la criatura unidas por una cápsula que actúa como articulación. Usaron estas criaturas para identificar la evolución de complejidad morfológica en distintos entornos y descubrieron que entornos complejos favorecen la evolución de morfologías complejas.

T. Ito et al. entre 2013 y 2016 [7, 25, 55] estudiaron la coevolución de criaturas virtuales en un escenario de presa-depredador. Inicialmente, su enfoque fue en los efectos de la interacción en la morfología de las presas, donde identificaron estrategias emergentes de las criaturas, tal que las presas dificultaban a los depredadores alcanzarlas, como es la generación de extremidades grandes o en grandes cantidades que cubren los núcleos de las presas. En aportes más avanzados, buscaron que su simulación exhibiera una dinámica similar a la encontrada en ecosistemas del mundo natural.

A. Asakura et al. en 2015 [57] propusieron el uso de exaptación (reutilizar para una función alguna característica generada originalmente para otra función) por medio de un cambio en la función objetivo empleada durante el proceso de evolución.

Arita et al. trabajaron con múltiples premisas de biología; su trabajo se sintetiza en el artículo [58]. Uno de sus acercamientos lidia con la metamorfosis [59]. La metamorfosis es un proceso donde un organismo que ha cumplido su desarrollo morfológico se somete a una segunda modificación de su morfología, usualmente adaptada al entorno. Ejemplos evidentes de este fenómeno en la naturaleza son las ranas y las mariposas.

D. Gravina et al. en 2018 [60] fusionaron distintas estrategias de evolución divergente para generar morfologías de *soft robots*. Combinan la búsqueda de comportamientos diferentes, tanto de la población actual como de un corpus de comportamientos novedosos anteriores (“*Novelty*”), con la búsqueda de comportamientos diferentes de los predichos por la población actual (“*Surprise*”) en una única recompensa (“*Novelty-Surprise*”). Simulan a los *soft robots* y encuentran que se tiene una mejora en la eficiencia y robustez sobre la búsqueda por objetivo.

K. Miras y A. Eiben en 2019 [24] estudiaron los efectos del entorno en la morfología y comportamiento de robots modulares. En su estudio, definieron descriptores para mapear a los individuos en un espacio multi-dimensional, y encontraron que se generaban morfologías similares incluso para entornos visiblemente diferentes. Presentaron un marco de referencia para el estudio cuantitativo de características de robots y encontraron que es complicado aislar la contribución del entorno en la evolución morfogenética.

D. Howard et al. en 2019 [61] propusieron un modelo comprensivo para el diseño evolutivo de robots. Su propuesta se basa en un nuevo paradigma de tres niveles para el diseño de robots desde material \rightarrow componente \rightarrow robot para robots especialistas.

Recopilar y resumir el conocimiento multidisciplinario aplicable al área de criaturas

virtuales además de las tendencias actuales de dichas disciplinas nos permite identificar premisas que implementar en el desarrollo y análisis de la evolución de criaturas virtuales.

Existen trabajos que han buscado realizar estas síntesis. Estos trabajos incluyen un compendio de investigaciones y definiciones de embriogenia artificial [11], que sigue siendo socorrido hoy en día para clasificar trabajos sobre el tema. Desde el punto de vista de robótica evolutiva, [28] describe el estado actual de la disciplina, sus descubrimientos, aplicaciones y futuros objetivos, como es cubrir la brecha de realidad entre una simulación y el mundo real. Finalmente, la revisión reciente presentada por [62] ofrece una presentación exhaustiva de técnicas implementadas para la generación de morfologías de criaturas virtuales; esta última funciona como un buen complemento a la síntesis de premisas presentada en este trabajo.

En la Tabla 2.1 se clasifican los aportes revisados hasta el momento de acuerdo con los siguientes lineamientos.

Sobre los tipos de evolución se considera:

- **(O)bjetivos:** El argumento de selección es el *fitness* calculado.
- **(N)ovedad:** El argumento de selección es la distancia entre la solución estudiada y el conjunto de soluciones en la población actual y un historial de soluciones novedosas anteriores.
- **(S)orpresa:** El argumento de selección es la distancia entre la solución estudiada y un conjunto de predicciones hechas por un modelo predictivo alimentado por las poblaciones pasadas e información local.
- **(E)cología:** Los individuos se introducen a un entorno virtual durante una simulación a gran escala y la cruce entre individuos sucede sólo si tienen proximidad física durante la simulación.
- **(Mi)nimal:** Se establece un criterio mínimo que debe cumplir el individuo para ser elegido. Si cumple el criterio, el individuo es elegible para reproducción. No se solicita nada más ni se ponderan las probabilidades de selección de los individuos.

El entorno es **(Es)tático** si los únicos cambios en el entorno son causados por el agente, de lo contrario (si existen otros agentes durante la simulación o si el entorno puede cambiar sin intervención del agente observado) es **(D)inámico**.

Sobre la morfología se considera:

- **(A)bstractae:** Favorece eslabones, articulaciones o comportamientos alejados de los naturales para facilitar la simulación y evolución de la criatura.
- **(M)imetiza:** Busca evolucionar elementos que mimetizan de manera explícita a los encontrados en seres vivos.
- **(I)ngeniería:** Sus elementos están diseñados para tareas de ingeniería como la robótica, usualmente en robots modulares y *soft robots*.

Se entiende por comportamiento **(B)ásico** a las tareas de locomoción básicas obtenidas en criaturas virtuales, que generalmente son caminar, nadar o saltar, además de seguir/evadir un objetivo. Por otro lado, un comportamiento **(C)omplejo** alcanza objetivos que generalmente van más allá del individuo, como son la simbiosis, el parasitismo, y comportamientos sociales.

En caso de existir, un comportamiento social puede ser **(An)tagónico** si dos individuos se consideran enemigos (por ejemplo, un depredador y una presa) y actúan para satisfacer sus necesidades en detrimento del otro. Un comportamiento social **(Co)operativo** implica una actuación en conjunto de los individuos (por ejemplo, para cazar en manada o avisar de un peligro).

De la Tabla 2.1 es posible inferir que en la investigación sobre criaturas virtuales se tienen predilecciones tanto por estrategias de evolución como por técnicas de modelado específicas.

En cuanto a las estrategias de evolución, la búsqueda de objetivos es prevalente y ciertamente ha ofrecido una gran cantidad de aplicaciones [6] pero no debemos ignorar las nuevas técnicas existentes en el cómputo evolutivo que comienzan a adentrarse al área de criaturas virtuales [60].

La Tabla 2.1 clasifica la morfología de acuerdo a la referencia que toma para el modelado de la criatura; se observa que la referencia es dependiente de los objetivos de cada investigación, por lo que el enfoque que se debe tener en este sentido es sobre el proceso mismo de modelado que fue clasificado inicialmente por Stanley y Miikkulainen [11].

La clasificación realizada al entorno sigue un criterio estricto donde se considera dinámico debido a las condiciones del medio ambiente que se genera para evaluar a la

criatura virtual, cualquier cambio que se realice por interacción directa de la criatura virtual con el ambiente o por las condiciones generadas aleatoriamente que se puedan dar [4, 40]. Dentro de los ambientes dinámicos se observa la aparición de comportamientos no definidos inicialmente en el alcance de la tareas a realizar por la criatura virtual [25].

La clasificación presentada permite atender aquellos huecos no contemplados en la construcción y generación de criaturas virtuales, es aquí donde se utilizan las premisas seleccionadas en esta investigación.

Tabla 2.1: Clasificación de aportes de evolución de criaturas virtuales

		Tipo Evolución	Entorno	Morfología	Complejidad	Comportamiento Social
1993	Ray, T. S.[9]	E	D	-	C	An,Co
1994	Sims, K. [4]	O	D	A	B	-
2003	Komosinski, M. [44]	-	D	A	B	-
2006	Channon, A. [45]	O	D	-	B	An,Co
2008	Pilat, M. L. et al. [39]	O	D	A	B	-
2010	Loula, A. et al. [50]	O	D	A	C	Co
2012	Pilat, M. A. et al. [54]	O	Es	A	B	-
2013	Lessin, D. et al. [27]	O	Es	M	C	-
2013	Ito, T. et al.[25]	O	D	A	B	An
2013	Ito, T. et al.[55]	O	D	A	B	An
2014	Lessin, D. et al. [40]	O	Es	M	C	-
2014	Auerbach, J. et al. [56]	O	Es	A	B	-
2014	Joachimczak, M. et al.[53]	O	S	M	B	-
2015	Asakura, A. et al. [57]	O	D	I	C	-
2016	Ito, T. et al.[7]	O	D	A	B	An
2016	Joachimczak, M. et al.[59]	O	D	M	B	-
2018	Gravina, D. et al. [60]	N,S	Es	I	B	-
2019	Miras, K. y Eiben, A. [24]	O	Es	I	B	-
2021	Raies, Y. et al.[49]	O	D	M	B	-
Objetivos						
	Novedad		Estático	Abstrae	Básico	Antagónico
	Sorpres		Dinámico	Mimetiza	Complejo	Cooperativo
	Ecología			Ingeniería		
	Minimal					

Del estudio y clasificación realizados se concluye lo siguiente: En cuanto al tipo de evolución, el uso de estrategias diferentes a la optimización de objetivos es relativamente reciente y principalmente con fines ilustrativos [35], por lo que estrategias de evolución con enfoque en diversidad se volverán un campo fructífero en el futuro inmediato.

El empleo de entornos virtuales dinámicos sigue siendo un tema de interés para los estudios con criaturas virtuales. En la mayoría de los estudios la presión del entorno virtual se refleja en los comportamientos de las criaturas virtuales al apropiarse de su entorno para garantizar su supervivencia y por ende su adaptación y evolución.

Las investigaciones que buscan mimetizar elementos morfológicos del mundo natural tienden a tomar características individuales de éstos, por lo que el estudio aquí presente es una herramienta de apoyo para expandir en este tipo de investigación con referencias a premisas aplicables a esta mimetización, como es el funcionamiento muscular y neuronal.

El comportamiento social en criaturas virtuales ha sido estudiado someramente pero se volverá un tema amplio de estudio conforme aumenta la complejidad de las capacidades de las criaturas virtuales. La posibilidad de contar con morfogénesis creadas a partir de criaturas virtuales sintéticas posibilita la construcción de artefactos articulados que puedan ser utilizados para realizar tareas y objetivos especializados, como puede ser: la robótica, la telemedicina, la bioingeniería, etc.

Metodología para la construcción morfológica de criaturas virtuales

En este capítulo se describe la metodología implementada durante esta investigación para obtener tanto el material multidisciplinario que se ofrece como referencia, como para desarrollar el generador de morfologías de criaturas virtuales.

Esta metodología consta de tres etapas enfocadas en el estudio multidisciplinario inicial, el desarrollo del generador y su adaptación a un proceso evolutivo respectivamente. La metodología empleada en esta investigación se muestra en la Figura 3.1.

La metodología presentada retoma las buenas prácticas realizadas por [11] y [28] en el estudio y desarrollo de la vida artificial. Las cuales consisten en partir de características ya descubiertas, y solamente hacer extensiones que son aplicados a nuevos experimentos permitiendo observar eventos inesperados o interacciones no previstas dentro de la maqueta de experimentación. Esto se fundamenta ampliamente por [63].

Con esta idea como base, la metodología tiene un carácter incremental, donde un estudio multidisciplinario e identificación de premisas llevan a un conjunto de premisas iniciales para el desarrollo y experimentación con un generador de morfologías basado en estas premisas, el cual, al ser evaluado, permite primero verificar si el generador es capaz de producir morfologías de criaturas virtuales y en segundo término verificar si dichas morfologías cumplen con los objetivos del experimento, recordando que para los

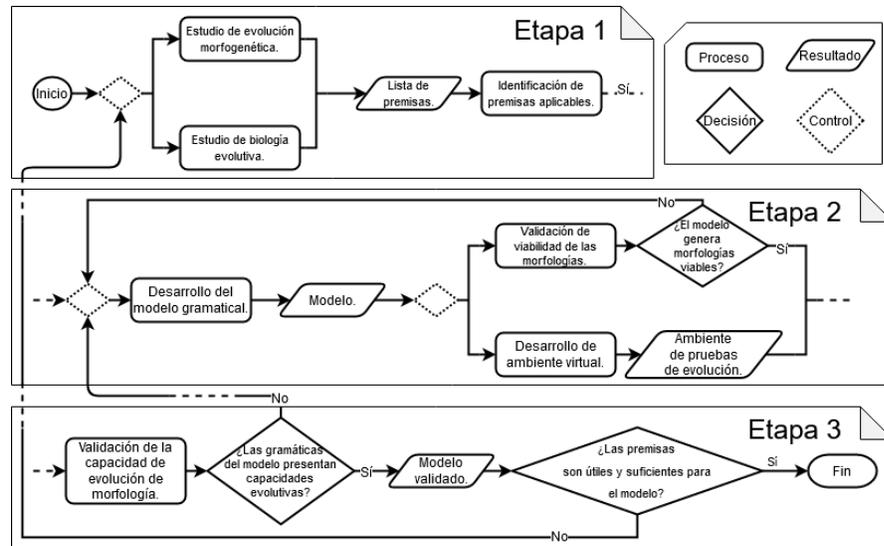


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta. Etapa 1 → 2 y 2 → 3.

fines de esta investigación el objetivo es obtener locomoción en las criaturas virtuales.

A continuación se exponen en detalle cada una de las tres etapas que conforman la metodología propuesta.

Etapa 1: Identificación de premisas multidisciplinarias

En esta primer etapa se hace un estudio exhaustivo de las premisas actuales de las diferentes disciplinas en cuanto al concepto de la evolución que serán embebidas en el genotipo de la criatura virtual para la construcción de su morfología inicial.

Los estudios realizados en esta etapa son:

1. Estudio de evolución morfológica en criaturas virtuales.
2. Estudio de premisas de biología evolutiva y vida artificial.
3. Identificación de premisas aplicables a la construcción de criaturas virtuales.

Los estudios realizados antes listados, permitieron identificar las disciplinas como Embriogenia, Embriogenia artificial, Genética, Neurociencia, Robótica evolutiva y Cómputo evolutivo; estas áreas proponen premisas en los seres vivos y que pueden ser incorporados a la vida artificial ya sea como características o fenómenos que pueden ser reproducidos en ambientes virtuales poblados por criaturas virtuales.

De las posibles premisas identificadas para alcanzar el objetivo de este trabajo de investigación se propone una experimentación de tipo incremental, esto es, ir embebiendo premisas de una a una hasta lograr una morfología que pueda ser evaluada dentro del ambiente virtual. Esto permite que se pueda validar la construcción morfológica de la criatura por las etapas que propone la metodología.

Etapas 2: Construcción de la criatura virtual mediante gramáticas paramétricas

En esta etapa se realiza el modelado del generador morfológico embebiendo las premisas iniciales que se seleccionaron con anterioridad. Una vez construida la morfología de la criatura e integrando los mecanismos de movilidad, dicha morfología se pone a prueba dentro del ambiente virtual siguiendo la siguiente secuencia:

1. Desarrollo del modelo gramatical de generación de morfologías.
2. Desarrollo del ambiente de pruebas.
3. Validación de viabilidad de las morfologías generadas por el modelo.

El modelo matemático de la criatura virtual comienza desde la definición de la gramática que conforma el desarrollo de la morfología de la criatura virtual, considerando las restricciones definidas en la gramática para limitar las extremidades y el tamaño de las criaturas virtuales.

El ambiente virtual de pruebas debe ser considerado en el desarrollo morfológico de la criatura virtual, es aquí donde se construye el esqueleto de la criatura virtual. El ambiente de pruebas es situado, es decir, que la criatura virtual se encuentra localizada en coordenadas (x, y) , en donde se podrá visualizar la morfología utilizando objetos geométricos básicos.

Tras haber implementado el entorno de pruebas y el modelo propuesto para la generación de morfologías, se prueba que el modelo sea capaz de generar morfologías válidas de acuerdo a la definición empleada, inicialmente con morfologías predeterminadas y subsecuentemente con un módulo de generación aleatoria de morfologías.

La secuencia 1 y 2 nos permiten validar las gramáticas que permiten la generación aleatoria de morfologías, una vez, que las reglas gramaticales cumplen con las restricciones consideradas para obtener criaturas virtuales con las mínimas características de locomoción, se puede validar que el generador gramatical permitirá obtener criaturas virtuales que cuenten con una cabeza, un cuerpo y n extremidades, que podrán cumplir con el objetivo.

Una vez validadas las gramáticas dentro del ambiente virtual de prueba, es momento de, implementar mecanismos de adaptación y evolución de las criaturas virtuales sin perder las restricciones y premisas para las nuevas criaturas virtuales de futuras generaciones, esto último se lleva a cabo durante la última etapa de la metodología propuesta.

Etapa 3: Adaptación y evolución de las criaturas virtuales

La técnica implementada para la adaptación y evolución de las criaturas virtuales se basan en los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos son directamente adaptados a los fenómenos evolutivos observados en la naturaleza. Para ello se reconocen dos fases para implementar la técnica en el modelo gramatical propuesto:

1. Validación de la capacidad de evolución de morfología del modelo gramatical.
2. Identificación de posibles deficiencias en el modelo desarrollado.

Los algoritmos genéticos toman características de dos individuos llamados padres, que mediante cruce se construye un nuevo individuo llamado hijo. La complejidad en este sentido es validar la gramática generadora de morfologías, esto es, criaturas virtuales que tendrán que ser evaluadas dentro del entorno virtual, y mediante una función objetivo denominada fitness es como se seleccionarán los padres [31].

La utilización de un algoritmo genético puede ser costosa computacionalmente, y si no se selecciona de forma adecuada los parámetros de tamaño de población, selección,

cruza y mutación puede producir criaturas que no logren alcanzar los objetivos dentro del ambiente y por ende no se pueda converger a una solución adecuada.

En nuestro caso, las gramáticas generadoras de morfologías para criaturas virtuales deberán en todo momento conservar las restricciones y las premisas implementadas para tener poblaciones de criaturas virtuales con altas posibilidades de ser mejoradas mediante la evolución.

La metodología propuesta nos permite realizar pruebas al modelo gramatical propuesto, y si los resultados no son los esperados, podemos recurrir a la etapa 2 para modificar el modelo matemático para solventar las deficiencias presentadas.

Otras de las características propuesta de la metodología como se menciona anteriormente es de que ésta es incremental, es decir, si los modelos matemáticos implementados y las premisas seleccionadas dan mejores resultados, éstas se toman como base para ir embebiendo otras posibles premisas. Todo el tiempo observando su viabilidad mediante la simulación en el entorno virtual.

Desarrollo de la morfogénesis en la construcción de criaturas virtuales

A continuación se detallan el entorno de experimentación, las premisas identificadas, las premisas iniciales seleccionadas, el modelado gramatical y la estrategia evolutiva propuestos.

4.1. Características de las criaturas virtuales

La construcción de las criaturas virtuales hace uso de un sistema gramatical en donde se incorporan las premisas encontradas para generar una morfología inicial, la cual evoluciona a partir de transferencia genética en futuras generaciones. Una criatura virtual puede ser observada tanto por su genotipo (representación genética empleada para el proceso evolutivo), como por su fenotipo (representación física de la criatura empleada en la simulación).

La morfología inicial de la criatura virtual esta definida como un conjunto de huesos, músculos y neuronas motoras. Los huesos están definidos por un conjunto de extremidades que se unen mediante los músculos, a su vez los músculos cuentan con un estímulo que permite contraer y extender los huesos, lo que permite la movilidad de las extre-

midades. Estas señales son tarea de las neuronas motoras que tendrán que manejar los diferentes estímulos para la locomoción de una criatura virtual.

Para nuestro caso, el genotipo de una criatura virtual empleado en este documento es una gramática con pequeñas modificaciones basada en (L-system paramétrico). Esta gramática cuenta con conjuntos de símbolos terminales y no terminales; estos símbolos son reemplazados de manera iterativa por reglas de producción. Se implementa un factor de energía para restringir ciertas producciones. La producción final realizada otorga una palabra que es usada como una lista de instrucciones para la formación de la morfología de la criatura.

El fenotipo de las criaturas virtuales está compuesto de huesos, músculos y neuronas motoras. Los huesos se encuentran interconectados para formar el esqueleto de la criatura virtual; la unión entre dos huesos puede ser fija o móvil, dando causa a una extensión del hueso o la formación de una articulación. En las articulaciones se encuentra el músculo que modifica el ángulo entre huesos; una neurona motora controla la contracción y estiramiento de los músculos durante el tiempo de simulación.

El fenotipo nos permite construir el esqueleto de la criatura virtual con ciertas articulaciones, que podemos definir con la siguiente tupla [4.1](#).

$$C_F = \{E_s, M_u, N_e\} \tag{4.1}$$

Donde: E_s es el esqueleto que se describe como un árbol que representa un conjunto de huesos posicionados en un espacio tridimensional tal que cada hueso comparte por lo menos uno de sus extremos y está unido con otro hueso mediante un músculo. La definición de E_s como un árbol busca abstraer en cuanto a morfología el desarrollo embrionario de los seres vivos desarrollan cabeza, torso y extremidades.

M_u , son los músculos que se agrupan en un subconjunto de las uniones entre huesos de E_s e identifican las articulaciones móviles de la criatura virtual.

N_e es un conjunto de neuronas motoras, que envían señales a los músculos para otorgar movilidad a la criatura virtual.

Una neurona de función alimenta a cada una de las neuronas motoras de la criatura de acuerdo al valor de su función en ese momento de la simulación; mientras tanto, las neuronas motoras activan a su articulación con una fuerza relativa al valor con que son

alimentadas, generando el movimiento de la criatura.

Para tener un control sobre la unión entre huesos partimos de los siguientes supuestos 4.2:

$$\begin{aligned} |M_u| &\leq |E_s| - 1 \\ |N_e| &= |M_u| + 1 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Los supuestos 4.2, permiten restringir la morfología de la criatura virtual evitando que la unión entre huesos sólo sea de tipo lineal, de la misma forma se limita que la unión de huesos sólo puedan ser cuatro extremidades, un ejemplo puede observarse en la Figura 4.1.

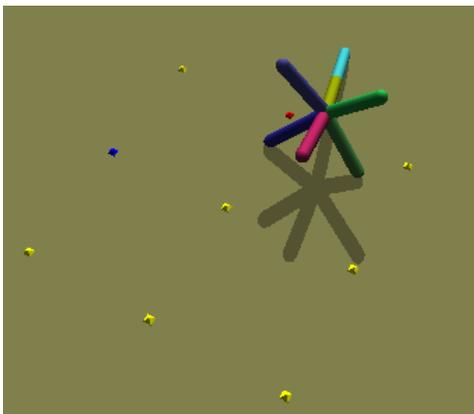


Figura 4.1: Morfología de la criatura virtual bajo los supuestos 4.2.

Los supuestos utilizados no restringen la posibilidad de obtener morfologías distintas, solo limitan a un número finito de huesos en cada una de las extremidades.

4.2. Características del entorno virtual

Un proverbio griego dice *“El medio ambiente es una pieza absoluta donde cada ser vivo debe aprender a jugar su rol”*.

El medio ambiente tiene un rol importante, no es posible generar criaturas virtuales sin tomar en cuenta el ambiente virtual donde habitarán y las relaciones con las que interactuarán.

De forma general, el medio ambiente es un espacio con una topología específica o no, en donde existen objetos de tipo pasivos ó activos y reglas de interacción entre el propio ambiente y los objetos inmersos.

Para nuestro caso de estudio utilizaremos un ambiente virtual situado, esto es un espacio definido por una métrica donde los objetos y las criaturas virtuales tienen una posición en términos de coordenadas. Este tipo de ambientes son dinámicos debido a las leyes de interacción.

En la actualidad, se dispone de diversos motores físicos que permiten la generación de entornos virtuales dinámicos, entre ellas se encuentra el simulador **pyrosim** [64], dicho simulador ofrece un entorno de desarrollo para definir un ambiente virtual dinámico en donde las entidades embebidas se rigen por las leyes de interacción sin considerar aspecto intrínsecos, facilitando el desarrollo de las criaturas virtuales. El pyrosim como cualquier otro motor físico cuenta con las primitivas para la generación de objetos geométricos, permitiendo la utilización de dichos objetos para la construcción de las morfologías de las criaturas virtuales.

Dentro del simulador se pueden usar tres tipos de primitivas geométricas y programar los diferentes tipos de sensores, así como redes neuronales que permitan datar de autonomía a la criatura virtual generada.

La representación de las criaturas virtuales definidas anteriormente se conforman por huesos, articulaciones y neuronas, las cuales son representadas en el ambiente virtual y listadas en la Tabla 4.1.

Los huesos se representan a través de objetos cilíndricos, las articulaciones son implementadas mediante bisagras que pueden permanecer fijas o con un grado de libertad, las neuronas a su vez son implementadas mediante una función de activación

Tabla 4.1: Elementos retomados de los disponibles en pyrosim para la generación de morfología y control de las criaturas virtuales.

Huesos	Cilindro	
Articulaciones	Fija	Bisagra
Neuronas	Función	Motora

y/o motora, dichos elementos son descritos a continuación:

- **Articulación fija:** Es una articulación sin capacidad de movimiento empleada para unir dos huesos. Su utilidad se encuentra en expandir el tamaño de un eslabón o cambiar la estructura morfológica de la criatura virtual al agregar un cilindro en un ángulo distinto.
- **Articulación tipo bisagra:** Esta articulación permite cambiar en radianes el ángulo de unión de dos huesos. Un ejemplo de esta articulación se observa en la Figura 4.2.

Los tipos de neuronas por aplicar son los siguientes:

- **Función:** Neurona que envía un valor dependiente de su función asignada variable en el tiempo de simulación.
- **Motora:** Neurona conectada a una articulación que actualiza su posición de acuerdo a su valor actual.

Con estos elementos podemos generar una criatura virtual. La morfología está compuesta por los huesos y las articulaciones listadas, mientras que su control es a través de una red neuronal formada por las neuronas listadas y que se conectan con las articulaciones para efectuar el movimiento de la criatura.

En la Figura 4.2 se muestra una articulación simulada en pyrosim y controlada por una función senoidal. Estos elementos son determinados por las producciones de la gramática.

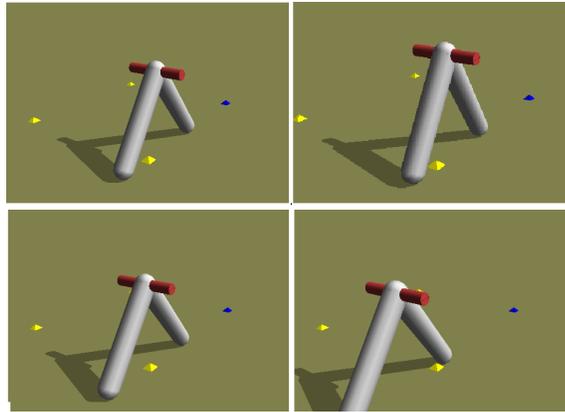


Figura 4.2: Ejemplo de una articulación funcionando en pyrosim [64]. Está compuesta por dos huesos, una articulación y dos neuronas.

4.2.1. Diseño del entorno

El entorno a utilizar es un entorno tridimensional con condiciones de frontera periódica, que es una superficie como la visualizada en la Figura 4.3; el entorno está dividido en 9 celdas para facilitar la visualización de las criaturas. El diseño de frontera periódica permite a las criaturas moverse libremente en un entorno situado.

En la imagen se muestran en un color gris las fronteras del entorno. Los ejes de color verde están conectados entre sí, y del mismo modo lo están los ejes de color azul. Cuando una criatura cruza una frontera, se reubica a la frontera contraria.

Con estas conexiones, las criaturas virtuales tienen libertad de locomoción; al mismo tiempo, su posición se encuentra acotada por los rangos del entorno, lo que igualmente acota la distancia entre las criaturas simuladas; el diseño de entorno facilita procesos que requieran proximidad entre las criaturas y, de ser deseado, la visualización de la simulación.

En cada celda aparecerá una cantidad fija de alimento en posiciones aleatorias para ser alcanzados por las criaturas.

Las características observadas en las criaturas de acuerdo a su entorno son las siguientes:

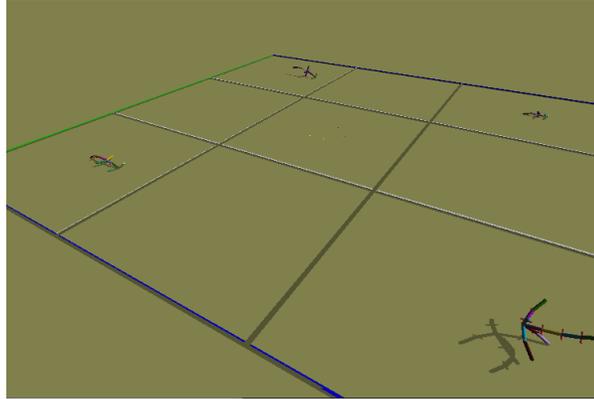


Figura 4.3: Entorno con condiciones de frontera periódica dividido en 9 celdas. Cuando una criatura cruza un eje de color aparece en la celda contraria con ese mismo eje.

Tiempo de vida. Un contador del tiempo de simulación que indica el tiempo que ha sobrevivido la criatura.

Nivel de energía. Un contador en constante reducción que indica si la criatura es capaz de sobrevivir. Su velocidad de decremento es relativa a su tiempo de vida. También se reduce en un porcentaje durante el momento de reproducción.

Número de reproducciones. Un contador del número de veces que la criatura ha transferido carga genética. Al contrario de los otros dos contadores, éste se emplea para análisis y no influye directamente en la simulación.

4.3. Utilización y aplicación de las premisas identificadas

Las premisas identificadas aplicables al estudio de criaturas virtuales que pueden ser retomadas para la propuesta actual. Las premisas pueden ser clasificadas inicialmente como útiles para el análisis o el desarrollo de criaturas virtuales, en la Tabla 4.2 se muestra esta clasificación.

La clasificación de utilidad de cada premisa está basada en el sentido que le da la disciplina de origen. Las premisas útiles para el desarrollo reciben esta clasificación porque en su disciplina original definen procesos y características específicas que se

Tabla 4.2: Clasificación de premisas de acuerdo a desarrollo o análisis

Útiles para desarrollo		Útiles para análisis	
Disciplina	Premisa	Disciplina	Premisa
Embriogenia	Cell fate	Genética	Gene flow
	Targeting		
	Heterochrony		Gene drift
	Canalization		
Embriogenia artificial	Complexification	Especiación	
	Gramáticas		
Química celular	Epigenéticas	Neurociencia	Potenciación/depresión a largo plazo
	Selección sexual		
Genética	Barrido selectivo		Plasticidad funcional
	Sensación somática		
Neurociencia	Husos musculares	Plasticidad estructural	
	Generadores centrales de patrones		
	Conos de crecimiento		
Robótica evolutiva	Evolución encarnada	Cómputo evolutivo	Mapeo evolucionable genotipo-fenotipo
	Modelos de desarrollo		
Cómputo evolutivo	Búsqueda por novedad		
	Búsqueda por sorpresa		

observan o emplean en su campo de estudio. Por otra parte, las premisas útiles para el análisis son observaciones más generales causadas por la interacción entre múltiples procesos específicos.

Un dato importante a tomar en cuenta en este estudio multidisciplinario es que al estudiar las premisas existentes en cada disciplina, resalta que, en ocasiones, distintas disciplinas abordan fenómenos similares con puntos de vista distintos; por ejemplo, estudios sobre el desarrollo embrionario derivados de embriogenia se especifican y contextualizan en el ámbito de la neurociencia con el desarrollo neuronal.

Las premisas útiles para el desarrollo tienen un uso claro en cuanto a su implemen-

tación en experimentos con criaturas virtuales como es la implementación de metamorfosis [59] o el empleo de nuevas técnicas evolutivas [34]. Aunque las premisas útiles para el análisis no necesariamente puedan ser implementadas directamente en experimentos, tienen y han tenido un uso desde los inicios del área de criaturas virtuales, con la búsqueda de actividad evolutiva [15], el mapeo de relaciones genéticas entre generaciones [18] o buscar una forma de medir el efecto del ambiente en el desarrollo de las criaturas virtuales [24]; aunque no afecten directamente al experimento, estas premisas permiten extraer información adicional del mismo.

Tanto el desarrollo como el análisis de los procesos evolutivos es útil para obtener y analizar resultados, pero es igualmente evidente que se necesita una jerarquización de las premisas a usar para cada experimento, puesto que, una combinación de demasiadas premisas o una falta de abstracción de las mismas puede causar que el proceso se vuelva intratable [21, 63].

Estas premisas pueden ser usadas en conjunto o de manera aislada para realizar diversos experimentos en criaturas virtuales. De las premisas listadas se pueden identificar múltiples conjuntos de las mismas de acuerdo a los objetivos que se tengan con el desarrollo de criaturas virtuales.

Esta investigación se enfoca en el caso de estudio específico de la evolución y desarrollo morfológico de criaturas virtuales. Para este caso específico se identificó un conjunto inicial de tres premisas para el desarrollo; estas premisas se detallan en la sección 4.4.

4.4. Selección de premisas iniciales

Se seleccionaron tres premisas para un modelo inicial de generación de criaturas virtuales. Estas premisas fueron seleccionadas por su aplicación al proceso de desarrollo morfológico de criaturas virtuales.

Las gramáticas fueron seleccionadas como la base del modelo propuesto por su capacidad de mantener un proceso de generación controlado. El destino celular simplifica el proceso de desarrollo durante la aplicación de la gramática. La canalización permite corregir errores durante el desarrollo de la morfología de la criatura. En síntesis:

Gramáticas. Durante el desarrollo embrionario de un ser vivo, conjuntos de células

se expanden y dividen en grupos que eventualmente se desarrollan en partes del cuerpo de ese ser. Las gramáticas formales, específicamente los L-systems perimétricos [37] son capaces de abstraer este proceso. Las células (no terminales) se dividen en eslabones, articulaciones o neuronas (terminales) de acuerdo con las reglas de producción definidas en la gramática empleada. Forma la base del modelo.

Destino celular. Durante el desarrollo embrionario y a lo largo de la vida de un ser vivo, sus células eventualmente se especializan para ser parte de un sistema o aparato en su cuerpo. De este modo todas las células cumplen un rol durante el desarrollo. De esta premisa se abstrae la predeterminación de cada elemento de la gramática para generar un elemento específico del fenotipo.

Canalización. El desarrollo embrionario de un ser vivo es susceptible a alteraciones externas por el ambiente e internas por su composición genética. Estas alteraciones son nocivas con alta probabilidad [13], por lo que el proceso tiene una robustez que permite corregir errores en el desarrollo y producir un ser vivo viable (capaz de sobrevivir). Esta premisa se abstrae con un manejo de errores en las producciones de la gramática que puedan ser corregidos para cumplir con la definición de morfología de la criatura.

Las tres premisas seleccionadas permiten contar con una base inicial de la morfología de la criatura virtual. Estas premisas se encuentran embebidas en una gramática guía (inicial) para el desarrollo morfológico de las criaturas virtuales mediante destino celular, lo que permite contar con una cubierta para la generación de morfologías viables con respecto a la canalización.

4.5. Generación del modelo gramatical

En esta sección se expone la formalización de las gramáticas donde se embeben las tres premisas seleccionadas para el desarrollo morfológico de criaturas virtuales.

4.5.1. Modelo Gramatical

El modelo gramatical propuesto se basa en conceptos básicos de los L-systems paramétricos, debido a que este tipo de gramáticas toman en cuenta las afectaciones del entorno virtual, lo que permita que las premisas embebidas se comporten como procesos regulatorios al momento de la construcción morfológica de la criatura virtual.

La formalización de la gramática utilizada para la construcción morfológica de la criatura virtual se considera como ecuación de forma lineal como se observa en 4.3:

$$G = (V, P, x, S) \tag{4.3}$$

donde:

- V es el alfabeto; un conjunto compuesto de terminales (Σ) y no-terminales (nT)
 $V = \Sigma \cup nT$.
- P es el conjunto de reglas de producción con la función $p : (V, \mathbb{Z}) \mapsto (V^*, \mathbb{Z})$ y la forma $n \in nT \rightarrow v \in V^* | R_e(x), C_o(x)$, con $R_e(x)$ una función booleana y $C_o(x)$ una función aritmética que cambia el valor de x .
- $x \in \mathbb{Z}$ es el indicador de energía, entregada para el desarrollo de la nueva criatura virtual.
- $S \in nT$ es un no terminal empleado como axioma.

El conjunto de terminales Σ define la morfología de la criatura virtual, y se expresa por la ecuación 4.4.

$$\Sigma = \{a, b, c, [,], ;\} \tag{4.4}$$

donde:

- a es un hueso del esqueleto E_s representado por un cilindro.
- b es una articulación fija que esta unida mediante M_u .

- c es una articulación móvil M_u con un movimiento básico de bisagra (abrir y cerrar).
- $[]$ son delimitadores de las extremidades a , los cuales deben presentarse en pares.
- $;$; separador entre extremidades a .

El manejo de los no terminales nT se basa en el formalismo de los sistemas Framsticks [65]. En la Figura 4.4 se muestra como ejemplo una criatura formada a partir de una cadena con delimitadores de extremidades ($ab[ab; ab]abab$). Como se puede observa en la Figura 4.4 la morfología de la criatura virtual esta conformada por tres huesos que delimitan su tamaño y dos extremidades; una a lado de la otra conformando un tipo de patas que le permitirá la locomoción a su fuente de energía (comida).

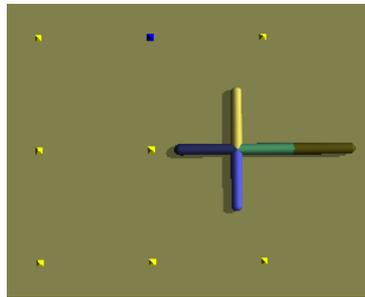


Figura 4.4: Visualización de las extremidades de la criatura virtual.

Para la construcción de la morfología de la criatura virtual, se definen características restrictivas que evitan la posibilidad de contar con múltiples extremidades en una articulación, lo que imposibilitaría la locomoción de la criatura virtual. Estas restricciones se en lista a continuación:

1. Entre cada hueso debe haber una articulación, ya sea fija o de bisagra.
2. Las articulaciones fijas no deben tener conectada ninguna neurona motora.
3. Debe haber sólo una neurona motora conectada a una articulación no fija.
4. Debe haber sólo una neurona sensora conectada a un sensor.

Con el objetivo de acotar el tamaño de las criaturas, x se emplea como delimitador de la profundidad de las producciones. Cada producción reduce el contador tal que al no contar con suficiente energía para más producciones, los no terminales se definen a su terminal correspondiente.

4.5.2. Destino celular

La gramática define los elementos terminales y no terminales, su interacción a través de las reglas de producción y su relación con los elementos de morfología en el fenotipo de la criatura virtual.

La premisa de *destino celular* se implementa en los elementos no terminales en la forma de restricciones para su uso. En específico se toman los no terminales S , X y Y como especiales de la siguiente forma:

- S es el no terminal inicial de la gramática, llamado axioma.
- $X \Rightarrow^+ V^*a$ no terminal ligado al crecimiento del esqueleto E_s .
- $Y \Rightarrow^+ V^*\{b, c\}$ no terminal ligado al crecimiento de una articulación.

Con esta restricción en los no terminales se garantiza la generación de elementos de morfología por parte de la gramática durante la producción del fenotipo.

4.5.3. Canalización

Durante la generación de producciones es susceptible encontrar errores gramaticales que provocan el ciclado de alguna regla, lo que resulta en una criatura no formada o con una morfología no adecuada para ser evaluada dentro del ambiente virtual. Alguno de los posibles errores son:

- Instrucciones de generación de extremidades contiguas que se convierten en instrucciones de una nueva extremidad, como se observa en la siguiente producción:

$$"ab[ac][ab]" \rightarrow "ab[ac; ab]"$$

- Instrucciones de una nueva extremidad superiores a la cuarta se convierten en uniones de huesos en las primeras cuatro extremidades, es decir:

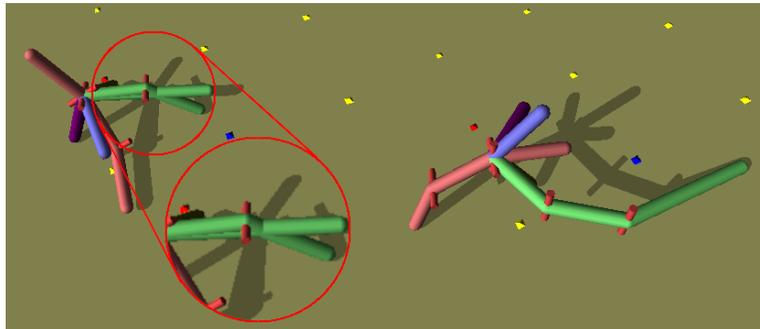
$$”ab[ab; ac; ab; ac; ac; ab; ac; ab]acab” \rightarrow ”ab[abac; acab; abac; acab]acab”$$

- Instrucciones de una nueva extremidad fuera de los delimitadores de extremidad son encapsuladas en los mismos de la siguiente manera:

$$”acabab; ac; ab; abac” \rightarrow ”acabab[ac; ab; ab]ac”$$

La forma de tratar los errores de producción se utiliza la premisa de canalización donde es el ambiente quien pone a prueba a la criatura y permite corregir estos errores morfológicos para la siguiente generación.

En la Fig. 4.5, (a) se observa una criatura virtual generada con errores y (b) la corrección de los mismos hecha por la canalización. Cada hueso es representado por un cilindro con diferente color y las articulaciones móviles por cilindros rojos. El error que se visualiza es la generación de múltiples extremidades en la misma posición y con la misma orientación, lo que causa una superposición de las mismas. La corrección realizada por la canalización combina estas extremidades en una sola.



(a) Producción errónea:
“ac[acac;ac;ab;ac;abab]acab”

(b) Producción corregida por canalización:
“ac[acacabab;ac;ab;ac]acab”

Figura 4.5: Corrección del número de extremidades mediante la canalización.

4.5.4. Generación del modelo gramatical para la construcción de la criatura virtual

Se utiliza un mecanismo aleatorio dentro de la construcción de las criaturas virtuales con la finalidad de poder contar con diversas características morfológicas que puedan ser utilizadas para mejorar a las criaturas virtuales en futuras generaciones y así converger a la solución planteada.

El genotipo de la criatura se forma por el modelo gramatical 4.3 y se desarrolla mediante un L -system paramétrico embebiendo las premisas seleccionadas, así como, un mecanismo energético que limita el crecimiento exponencial de una criatura virtual.

La gramática comienza por una palabra definida por el axioma S , generando las palabras $\omega \in V^+$, estas son interpretadas de forma secuencial siguiendo las reglas de producción y tomando en cuenta el nivel de energía que se utilice durante el crecimiento de la criatura virtual.

Las aplicación de reglas de producción se definen para una palabra $\omega = \omega_0\omega_1\dots\omega_{n-1}$ con $n = \|\omega\|$ de la siguiente manera:

$$p(\omega_0, x_0)p(\omega_1, x_1)\dots p(\omega_i, x_i)\dots p(\omega_{n-1}, x_{n-1})$$

Donde x_0 es el nivel de energía al iniciar la iteración y x_i el resultado de sustraer el costo de la producción $p(\omega_{i-1}, x_{i-1})$ al nivel de energía. De esta forma, el nivel de energía de la criatura decrece por cada regla de producción aplicada.

La utilización del parámetro x_0 , como se comentó anteriormente, refiere al nivel energético que tendrá una criatura virtual al momento de su crecimiento, este elemento es una aportación que se obtiene dentro de la construcción de morfologías para criaturas virtuales y que fue evaluado y expuesto en un artículo científico.

Las reglas de producción concatenan las palabras de tal forma que mediante ciclos recursivos la morfología de la criatura sólo cuente con elementos terminales.

La adaptación de las criaturas virtuales para lograr sus objetivos requieren la posibilidad de tomar carga genética utilizada en generaciones anteriores para evolucionar de acuerdo a las condiciones del medio ambiente virtual. Para ello, se hace uso de los

algoritmos genéticos que permiten tomar cadenas de caracteres y recombinarlos para obtener nuevas cadenas que podrán ser evaluadas dentro del ambiente virtual.

4.6. Estrategia de evolución

La estrategia de evolución se basa en los principios Darwinistas [13] que parte de los preceptos que las poblaciones de individuos compiten por transferir carga genética, si y solo si, éstos tuvieron un buen desempeño dentro del medio ambiente. En nuestro caso, nuestras poblaciones de criaturas virtuales parten de una población inicial comprendida por 100 individuos, mismos que son situados dentro del ambiente virtual realizando objetivos de locomoción. Las criaturas que logren una mayor distancia del punto de origen al punto objetivo son las que podrán participar en la transferencia genética para las futuras generaciones.

Nuestra maqueta de experimentación cuenta con las siguientes características:

- Se mantiene una población de 100 individuos.
- La población avanza en 50 generaciones por experimento, en concordancia con las simulaciones realizadas por Sims [4] quien notó que las poblaciones tienden a converger tras este número.
- Cada generación cumple con 500 iteraciones en simulación y se mide la distancia que recorrieron.
- Se calcula el fitness de cada individuo como su aporte relativo a la distancia total recorrida por la generación.
- Cada nueva generación se conforma por 80 hijos obtenidos de cruzar dos criaturas, 15 de las criaturas con mejor rendimiento y 5 de las criaturas con peor rendimiento. Esta división tiene el propósito de mantener diversidad en la población.

4.6.1. Algoritmo genético

La adaptación de las criaturas virtuales a las condiciones del medio ambiente en el que se encuentran embebidas, se realiza mediante un algoritmo genético que permite evaluar las poblaciones iniciales mediante la evaluación de características superiores al resto de las criaturas que producen nuevas generaciones, bajo los preceptos de la teoría de la evolución [41].

De manera general el algoritmo genético utilizado sigue los siguientes procedimientos para evolución de las morfologías de nuestras criaturas virtuales.

Inicio:

tiempo $t:=0$;

población inicial $P(t)$;

while $t < 50$ **do**

 Correr simulación con $P(t)$;

 Evaluar función fitness de cada individuo de la población $P(t)$;

seleccionar individuos de $P(t)$ basados en la función fitness;

newP(t) a partir de los individuos seleccionados;

reemplazar $P(t)$ por *newP(t)*

$t = t + 1$

end while

Generación aleatoria de individuos

La población inicial de individuos se realiza de forma que estos contengan gramáticas y premisas embebidas para lograr individuos con morfologías aleatorias. Esto se lleva a cabo en dos etapas:

1. Generación de una lista ordenada de reglas de producción iniciales.
2. Selección aleatoria de un subconjunto de reglas de producción para construir el genotipo de un individuo.

La generación de la lista ordenada de reglas se realiza una única vez para el experimento y es la referencia para la generación aleatoria de los individuos. Tomando en

cuenta al no terminal empleado en la producción; el primer conjunto de reglas en la lista tienen como precedente al no terminal especial S , con el orden de los siguientes conjuntos siendo alfabético igualmente de acuerdo a su precedente.

Al concluir la selección de reglas de producción se aplica la restricción de destino celular: Se toman todos los no terminales y se agregan reglas de producción genéricas al genotipo del individuo. Para los no terminales especiales X y Y se agregan las producciones $X \rightarrow aY$ y $Y \rightarrow b$ sin costo o requerimiento como se definió en el modelo propuesto. Para los otros no terminales se agregan producciones vacías (por ejemplo a A se agregaría $A \rightarrow$) para indicar que no producen elementos de morfología.

Finalmente, el nuevo individuo recibe un nivel de energía de 100 para el proceso de derivación de su gramática y subsecuente generación de morfología.

La generación aleatoria esta conformada por 100 individuos situados en el ambiente virtual para ser evaluados y poder seleccionar aquellos que serán los padres para la siguiente generación.

Selección de individuos

Los “mejores individuos” son considerados los padres para la siguiente generación, de acuerdo a la eficiencia que obtuvieron al alcanzar los objetivos.

Cada generación de individuos es puesta a prueba por periodos de 500 iteraciones antes de crear una nueva generación. Al final de cada iteración se calcula el rendimiento de la criatura como la distancia alcanzada desde el origen hacia el objetivo.

La selección se realiza en forma de ruleta, donde la probabilidad de seleccionar un individuo es proporcional al aporte relativo de su distancia recorrida a la distancia total recorrida por la generación actual.

Los individuos padres aportan características genéticas que son utilizadas para la generación de nuevos individuos (hijos) que reemplazan a aquellos que no aportan soluciones a los problemas definidos. Este proceso se lleva a cabo a través del algoritmo de *cruza*.

Cruza

El método recibe como entrada dos padres y genera dos hijos que contienen cada uno un genotipo (en nuestro caso una gramática) resultante de combinar los genotipos de sus padres. El proceso de combinación de genotipos para los dos hijos es el siguiente:

1. El primer hijo recibe una copia de la gramática del primer padre.
2. Se selecciona la mitad de las reglas de producción del segundo padre de manera aleatoria.
3. Se intercambian reglas con una misma palabra. Si no existen reglas similares, la regla de producción se agrega a la gramática del hijo.
4. Se realiza el proceso complementario en el segundo hijo. El cual consiste en completar los cromosomas que conforman a la criatura virtual.

Tras aplicar el método de cruza a los padres seleccionados, se generan los dos hijos (Hijo I e Hijo II) que forman parte de la siguiente generación.

Este proceso se ilustra en la Tabla 4.3. Los dos padres y sus gramáticas aparecen en la parte superior de la tabla y los hijos resultantes en la parte inferior. En cada gramática de los padres se resalta en verde cada una de las reglas seleccionadas aleatoriamente que un padre pasa al hijo opuesto. En cada gramática de los hijos se observa que cada hijo recibe la gramática de uno de los padres y ésta es modificada para agregar las reglas recibidas por el padre opuesto.

Este ejemplo resulta ilustrativo del funcionamiento del método. Todas las reglas pueden ser seleccionadas, ya sean las iniciales que lidian con S o las reglas generadas por destino celular como $X \rightarrow aY \circ Y \rightarrow b$ y son agregadas al hijo opuesto. En el ejemplo el Padre II entrega una regla de S que tiene la misma producción y costo que otra regla en el hijo, lo que vuelve inocuo su traspaso; del mismo modo, la selección de la regla $Y \rightarrow b$ hace referencia a la restricción de destino celular que comparten todos los individuos.

Otro efecto del método se visualiza en la regla $X \rightarrow X[A]$ seleccionada en el Padre II. El traspaso de esta regla al Hijo I no conlleva transferir todo el funcionamiento de la gramática con este no terminal; por destino celular se agrega una producción vacía

Tabla 4.3: Ejemplo del método de cruce aplicado a dos padres; se resalta en verde las reglas seleccionadas aleatoriamente que cada padre pasa al hijo opuesto.

Padre I	Padre II
$G = (N, E, P, x, S)$ $x = 100$ $S \rightarrow XX \quad \quad x > 10, \quad x - 10$ $X \rightarrow XX \quad \quad x > 40, \quad x - 10$ $X \rightarrow aY \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $Y \rightarrow c \quad \quad x > 5, \quad x - 1$ $Y \rightarrow b \quad \quad x > 0, \quad x - 0$	$G = (N, E, P, x, S)$ $x = 100$ $S \rightarrow XX \quad \quad x > 10, \quad x - 10$ $A \rightarrow A; X \quad \quad x > 10, \quad x - 5$ $A \rightarrow X \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $X \rightarrow X[A] \quad \quad x > 60, \quad x - 10$ $X \rightarrow aY \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $Y \rightarrow c \quad \quad x > 5, \quad x - 2$ $Y \rightarrow b \quad \quad x > 0, \quad x - 0$
Hijo I	Hijo II
$G = (N, E, P, x, S)$ $x = 100$ $S \rightarrow XX \quad \quad x > 10, \quad x - 10$ $A \rightarrow \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $X \rightarrow XX \quad \quad x > 40, \quad x - 10$ $X \rightarrow X[A] \quad \quad x > 60, \quad x - 10$ $X \rightarrow aY \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $Y \rightarrow c \quad \quad x > 5, \quad x - 1$ $Y \rightarrow b \quad \quad x > 0, \quad x - 0$	$G = (N, E, P, x, S)$ $x = 100$ $S \rightarrow XX \quad \quad x > 10, \quad x - 10$ $A \rightarrow A; X \quad \quad x > 10, \quad x - 5$ $A \rightarrow X \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $X \rightarrow XX \quad \quad x > 40, \quad x - 10$ $X \rightarrow X[A] \quad \quad x > 60, \quad x - 10$ $X \rightarrow aY \quad \quad x > 0, \quad x - 0$ $Y \rightarrow c \quad \quad x > 5, \quad x - 1$ $Y \rightarrow b \quad \quad x > 0, \quad x - 0$

con el no terminal A y, como su único funcionamiento es con esta producción vacía, la regla que recibe el Hijo I se vuelve perjudicial pues le puede llevar a gastar energía sin producir elementos de morfología.

Latosinski [65] reconoce este fenómeno en su propuesta y argumenta que esta carga genética puede resultar útil en futuras generaciones si el individuo logra reproducirse a pesar de este efecto nocivo en el corto plazo; concordamos con esta filosofía, por lo que decidimos permitir que este evento ocurra durante la aplicación del método.

Mutación

La mutación se aplica a un individuo. Este método hace modificaciones a una de las producciones de la gramática del individuo y tiene probabilidad de aplicarse cada vez que se genera un nuevo individuo. Los cambios son de acuerdo a una de las siguientes dos opciones:

- **Cambio de parámetro:** Tanto el costo $C_o(x)$ como el requerimiento $R_e(x)$ son modificados positiva o negativamente en un 10 %.
- **Modificación de regla:** Se adiciona un no terminal del alfabeto de la gramática

a la producción.

En la Tabla 4.4 se ilustran ambos tipos de mutaciones en un individuo. Se resaltan en color verde las producciones a mutar y el resultado de su mutación. La producción $S \rightarrow XX$ es modificada en cuanto a su costo y requerimiento. La producción $A \rightarrow A; X$ es modificada agregando un nuevo no terminal.

Tabla 4.4: Ejemplo del método de mutación aplicado a un individuo. Por motivos ilustrativos se muestran los dos tipos de mutaciones en un sólo individuo.

Individuo		Individuo mutado	
G=(N, E, P, x, S) x=100		G=(N, E, P, x, S) x=100	
S → XX	x > 10 , x - 10	S → XX	x > 11 , x - 11
A → A; X	x > 10 , x - 5	A → AA; X	x > 10 , x - 5
A → X	x > 0 , x - 0	A → X	x > 0 , x - 0
X → X[A]	x > 60 , x - 10	X → X[A]	x > 60 , x - 10
X → aY	x > 0 , x - 0	X → aY	x > 0 , x - 0
Y → c	x > 5 , x - 2	Y → c	x > 5 , x - 2
Y → b	x > 0 , x - 0	Y → b	x > 0 , x - 0

Como es sabido y como ocurre en la naturaleza la mutación es un fenómeno que se da en tiempos muy largos en las poblaciones de individuos, esto sucede de forma aleatoria y en una población mínima. La mutación puede verse de dos formas: como un elemento que permite a las poblaciones adecuarse a cambios drásticos en el medio ambiente o como una evolución para apropiarse de los recursos que ofrece el entorno en donde se encuentren embebidos.

En nuestro caso, se parte de una mutación de 10% en los parámetros de la regla de producción está ligada al parámetro de energía del modelo gramatical y su valor de acuerdo a la generación aleatoria de individuos. Como el nivel de energía de los individuos generados aleatoriamente y los costos y requerimientos de las reglas de producción se encuentran acotados al rango $[0, 100] \in (\mathbb{Z})$, un cambio en los costos se vuelve aparente conforme aumenta el costo original.

En cuanto a la adición de un no terminal a una regla de producción, estos no terminales se acotan al alfabeto de la gramática del individuo. Los no terminales agregados son únicamente los disponibles en el alfabeto del individuo.

Para esta propuesta se evita la introducción de nuevos no terminales, esto reduce la susceptibilidad del genotipo de los individuos a un crecimiento descontrolado causado por la inclusión de nuevos no terminales, que es la mayor desventaja de las gramáticas formales al lidiar con criaturas virtuales [65].

La construcción morfogenética de las criaturas virtuales a partir de la gramática propuesta y de las premisas embebidas son evaluadas en ambiente virtual $3D$ que nos permita observar las diferentes morfologías obtenidas y la evolución de estas morfologías para el logro de sus objetivos.

Resultados

De acuerdo a la metodología propuesta, el modelo de generación de morfología es validado en cuanto a su capacidad de producir morfologías siguiendo la definición usada, y en cuanto a su capacidad evolutiva para generar criaturas virtuales adaptadas a una tarea.

Con la implementación del modelo gramatical y los métodos evolutivos propuestos se procede a validar que inicialmente sea capaz de generar morfologías válidas y, finalmente, que la aplicación de un algoritmo genético a éstos genere actividad evolutiva.

5.1. Validación de generación de morfologías

La Tabla 5.1 muestra las gramáticas de dos criaturas generadas aleatoriamente, nombradas Padre I y Padre II en la tabla, y sus hijos resultantes tras aplicar el método de cruce. El Hijo I recibe la gramática completa del Padre I y la mitad de las reglas de producción del Padre II seleccionadas aleatoriamente; el proceso inverso se aplica al Hijo II.

Se resalta en azul las reglas de producción que fueron reemplazadas y en verde las que fueron añadidas al no existir una similar anteriormente. Como es de esperar, la diferenciación de estas criaturas no es aparente por sus genotipos, pero el desarrollo de

su morfología (mostrado en la Figura 5.1) muestra la herencia de características.

Tabla 5.1: Genotipos de dos criaturas (los Padres) y dos nuevas obtenidas por su cruce (los Hijos). Se observa como cada hijo recibe el genotipo de uno de sus padres y éste es actualizado con reglas del otro padre, modificando el costo y requerimiento de algunas reglas o agregando nuevas.

Padre I		Padre II	
G = (N, E, P, x, S) x = 100		G=(N, E, P, x, S) x=100	
S->XX	x>10 , x-10	S->XX	x>10 , x-10
A->A;X	x>20 , x-15	A->A;X	x>10 , x- 5
A->X	x> 0 , x- 0	A->X	x> 0 , x- 0
X->X[A]	x>60 , x-20	X->acX	x>80 , x- 5
X->XX	x>40 , x-10	X->ac[A]	x>75 , x-20
X->ac	x>20 , x- 2	X->XX	x>60 , x-10
X->aY	x> 0 , x- 0	X->X[A]	x>30 , x-15
Y->c	x> 5 , x- 1	X->aY	x> 0 , x- 0
Y->b	x> 0 , x- 0	Y->c	x> 5 , x- 2
		Y->b	x> 0 , x- 0
Hijo I		Hijo II	
G = (N, E, P, x, S) x = 100		G=(N, E, P, x, S) x=100	
S->XX	x>10 , x-10	S->XX	x>10 , x-10
A->A;X	x>10 , x- 5	A->A;X	x>20 , x -15
A->X	x> 0 , x- 0	A->X	x> 0 , x- 0
X->acX	x>80 , x - 5	X->acX	x>80 , x- 5
X->X[A]	x>60 , x-20	X->ac[A]	x>75 , x-20
X->XX	x>60 , x -10	X->XX	x>60 , x-10
X->ac	x>20 , x- 2	X->X[A]	x>30 , x-15
X->aY	x> 0 , x- 0	X->ac	x>20 , x- 2
Y->c	x> 5 , x- 1	X->aY	x> 0 , x- 0
Y->b	x> 0 , x- 0	Y->c	x> 5 , x- 2
		Y->b	x> 0 , x- 0

Al contar con las gramáticas de las nuevas criaturas se procede a aplicar el generador de morfología, que realiza las derivaciones requeridas por sus genotipos, como se muestra en la Tabla 5.2 Aquí se muestra el desarrollo morfológico de la criatura durante las derivaciones de su gramática y se aprecia el control que tiene su nivel de energía (x).

Cada renglón indica un paso en el desarrollo de la morfología de la criatura, causado por una iteración de la aplicación de reglas de producción a la palabra actual, y el costo energético de la iteración.

El renglón final indica el fin de las iteraciones por la falta de no terminales en la palabra actual; esta palabra es la lista de instrucciones para generar los elementos morfológicos de la criatura en simulación

Este proceso se aplica a cada criatura para obtener su morfología e insertarla en el simulador físico donde se construyen los huesos, músculos y articulaciones de su fenotipo.

Tabla 5.2: Desarrollo de la gramática del Hijo I. La columna x indica el nivel actual de energía de la criatura durante su desarrollo morfológico. La columna resultado indica la palabra actual resultado de derivaciones causadas por las reglas de producción de su genotipo. El último renglón es la derivación final de este proceso que indica todos los elementos morfológicos de la criatura.

Hijo I	
x	resultado
100	S
90	XX
80	acXacX
55	acacXacX[A]
46	acacacacac[A;X]
39	acacacacac[A;X;ac]
32	acacacacac[A;X;ac;ac]
25	acacacacac[A;X;ac;ac;ac]
18	acacacacac[A;X;ac;ac;ac;ac]
13	acacacacac[A;X;aY;ac;ac;ac;ac]
7	acacacacac[A;X;aY;ac;ac;ac;ac;ac]
6	acacacacac[X;aY;ac;ac;ac;ac;ac;ac]
5	acacacacac[aY;ac;ac;ac;ac;ac;ac;ac]
4	acacacacac[ac;ac;ac;ac;ac;ac;ac;ac]
4	acacacacac[ac;ac;ac;ac;ac;ac;ac;ac]
	acacacacac[acac;acac;acac;acac]

El simulador permitan visualizar y medir el desempeño de las criaturas virtuales en la realización de la tarea de locomoción, como se observa en la Figura 5.1.

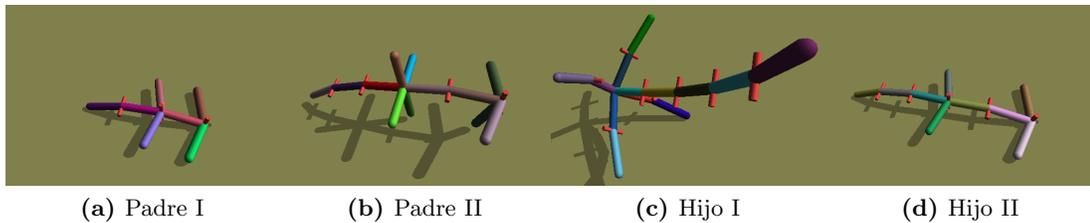


Figura 5.1: Morfologías de las cuatro criaturas virtuales generadas.

En la Figura 5.1 se observa la herencia de características como el número de extremidades en los segmentos donde las hay o la longitud de las mismas. El Padre I presenta dos extremidades móviles en sus enlaces y un cuerpo rígido; mientras tanto, el Padre II presenta tres o cuatro extremidades, la mayoría de ellas inmóviles, y un cuerpo articulado más largo.

Los hijos presentan una combinación de estas características. El Hijo I tiene cuatro extremidades móviles en un enlace y un cuerpo articulado; por otro lado, el Hijo II presenta una morfología similar al Padre I con un cuerpo alargado y articulado.

Una función senoidal alimenta las neuronas motoras de las criaturas virtuales, que mueven cada uno de sus segmentos articulados. La intensidad de la señal proporcionada a cada una de las articulaciones es igual para todas, por lo que, el desplazamiento y la eficiencia de desplazamiento esta determinada únicamente por la morfología de la criatura virtual, como se ilustra en la Figura 5.2.

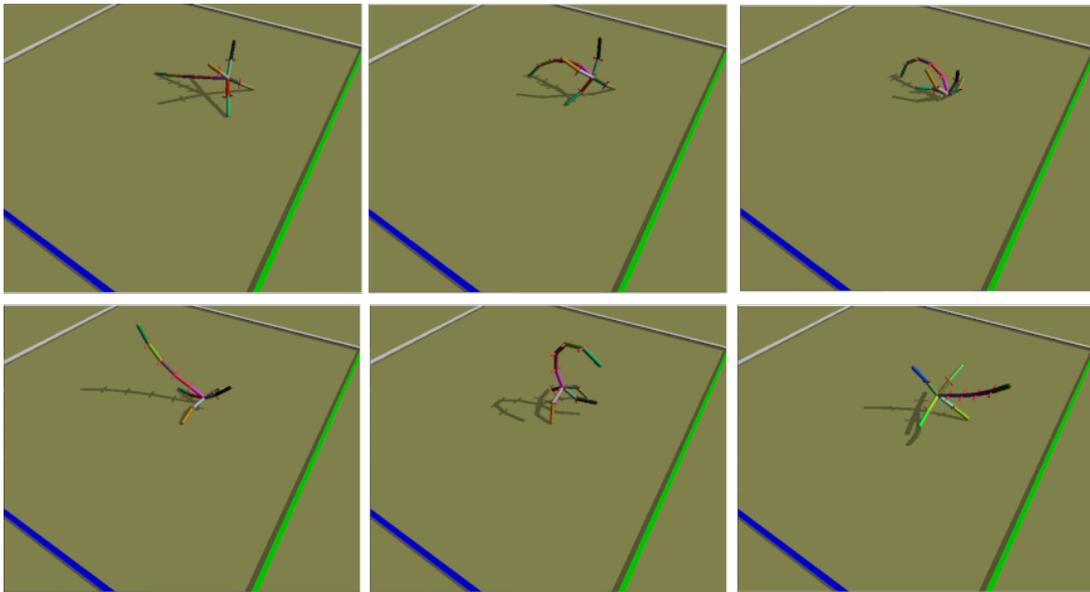


Figura 5.2: Locomoción generada por la criatura virtual, Hijo I.

La Figura 5.2 muestra capturas de distintos tiempos durante la simulación del Hijo I. El orden cronológico de las imágenes es de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

La Figura 5.1 muestra la recombinación genética de Padre I y Padre II, como resul-

tado se obtiene Hijo I e Hijo II. En la simulación realizada se observó que la estructura morfológica obtenida en el Hijo I resulta adecuada para el proceso de locomoción. Este primer resultado valida el uso del modelo gramatical propuesto y las premisas seleccionadas en el proceso evolutivo.

Los primeros resultados permiten validar los procesos morfogenéticos desarrollados mediante las gramáticas y las premisas acopladas al motor generador en el ambiente 3D utilizado. También, se logra delimitar las extremidades de las criaturas evitando tener más de una extremidad en una sola articulación.

Nuestra maqueta de experimentación esta conformada por características antes ya mencionadas como los son:

- Tamaño de la población de 100 individuos.
- La simulación se corre por 50 generaciones.
- Cada generación cumple con 500 iteraciones en simulación.
- La selección de candidatos para transferencia genética se basa por la distancia recorrida a partir del origen al objetivo.
- Se forma una nueva generación de 100 individuos tomando los 15 mejores individuos, los 5 peores individuos y cruza de individuos para los 80 puestos restantes.

La funcionalidad del proceso evolutivo mediante el algoritmo genético puede verse en la Figura 5.3, donde, conforme se construyen las generaciones el proceso de locomoción observado en las criaturas virtuales va de forma incremental.

La gráfica muestra la distancia promedio de cada generación. Conforme pasan las generaciones, la distancia promedio de cada generación aumenta hasta llegar a la generación 25, donde una morfología en específico obtenida en generaciones anteriores logra un rendimiento superior al resto de los individuos y eventualmente esparce su carga genética en la totalidad de la población.

La criatura que esparce su carga genética tiende un fenotipo específico. El fenotipo remarcado en el proceso evolutivo de las criaturas virtuales son morfologías que privilegian el largo de la criatura más que el número de extremidades. Esto hace que las criaturas tengan un mayor desplazamiento por movimientos de tipo látigo, esto es que, las criaturas virtuales en lugar de caminar brincan. Este tipo de fenómenos pueden ser

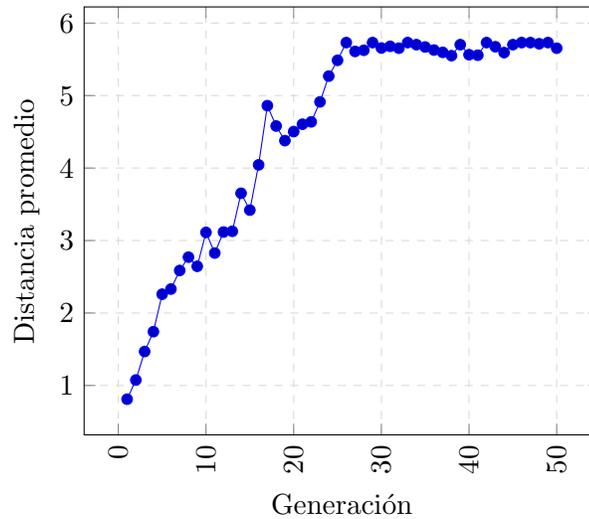


Figura 5.3: Distancia promedio alcanzada por cada generación.

ampliamente observados en la naturaleza, por lo que nos permitimos dejar converger este tipo de morfologías. Como se puede observar en la Figura 5.4.

5.2. Conclusiones

Se realizó un estudio multidisciplinario en el área de las ciencias biológicas (vida) donde se identificaron premisas aplicables al desarrollo morfológico de las criaturas virtuales. A partir de estas premisas se desarrolló una metodología que permitiera embeber estas premisas a un modelo gramatical que generará la morfogenésis de criaturas virtuales evaluadas e un ambiente virtual 3d.

Se realizó una lista de premisas que son susceptibles a incorporarse en la generación de criaturas virtuales y mediante la metodología propuesta estas pueden agregarse de forma incremental.

Se implementa un mecanismo de adaptación y evolución de las criaturas virtuales sin perder fenotipos basados en las premisas seleccionadas lo que permite contar con

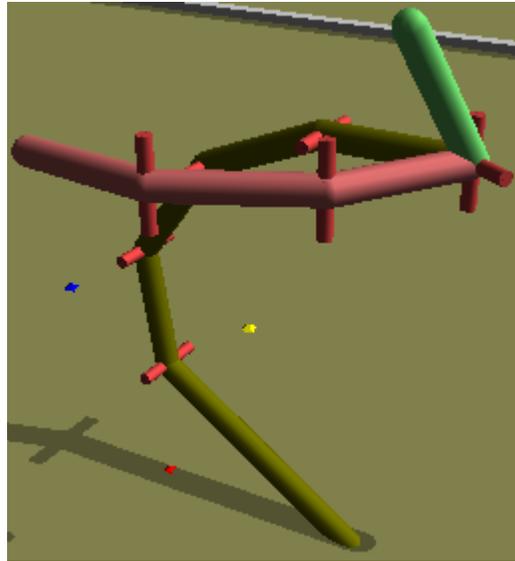


Figura 5.4: La morfología más recurrente tras el proceso evolutivo se caracteriza por el largo de sus extremidades.

morfologías aptas para resolver el objetivo seleccionado para su estudio.

Se delimitaron los tamaños de poblaciones a 100 individuos y con una transferencia genética del 10% para garantizar diversidad en la población a evaluar por cada generación.

La posibilidad de realizar estudios basados en criaturas virtuales nos permite contar con herramientas que puedan ser útiles para el diseño de mecanismos de diferentes tipos para resolver problemas en actividades cotidianas que realiza el ser humano.

Las premisas seleccionadas como destino celular, canalización permitieron construir una gramática basada en L -paramétricos como un generador morfogenético para criaturas virtuales.

La metodología propuesta responde al planteamiento del problema y a la hipótesis planteada en este trabajo de investigación gracias a las etapas realizadas y formalizadas para la construcción de un generador morfológico embebiendo premisas multidisciplinarias que durante la experimentación arrojaron resultados prometedores.

La investigación permite mostrar los resultados obtenidos en diferentes foros de difusión destacándose una publicación en una revista especializada dentro del área de criaturas virtuales.

Como se mencionó anteriormente los resultados obtenidos del modelo gramatical así como de la incrustación de premisas de vida en este modelo gramatical abre las puertas para mejorar y agregar mayor número de premisas multidisciplinarias en la construcción de las criaturas virtuales que puedan ser utilizadas en diferentes ambientes virtuales gracias a la especialización por medio de procesos evolutivos.

5.3. Trabajos Futuros

Se identifican los siguientes elementos como tareas adicionales y posibles elementos a estudiar:

- Seleccionar nuevos grupos de premisas para añadir a la propuesta y evaluarlos.
- Hacer modificaciones al entorno virtual para volverlo dinámico y estudiar sus efectos en las criaturas.
- Expandir el objetivo de la evolución de las criaturas más allá de la locomoción.
- Expandir la caracterización de las criaturas y permitir la modificación de rangos de libertad.
- Mejorar la metodología en cuanto a la validación y formalización de las gramáticas posibles a utilizar en la construcción de criaturas virtuales.
- Definir un modelo gramatical que permita restringir la morfología de las criaturas virtuales basado en premisas multidisciplinarias, que permitan responder favorablemente a objetivos específicos.
- Mejorar la eficiencia de los L -paramétricos debido al costo computacional en el proceso de generación de criaturas virtuales.
- Optimizar el mecanismo evolutivo por los tiempos de convergencia a la obtención de morfologías que puedan ser evaluadas en el proceso de locomoción.

5.4. Contribución Social

Durante esta investigación se realizaron las siguientes ponencias de difusión científica y de aporte a la comunidad científica:

- Participación en “3° coloquio de investigación en Ingeniería y 12° Curso-Taller Temas actuales en ciencias del agua, CICTTACA” con la ponencia titulada “Propuesta de una gramática para la creación de la estructura morfológica de criaturas virtuales considerando premisas de vida e inteligencia artificial” llevada a cabo en diciembre de 2020.
- Participación en “Muestra de proyectos de investigación con innovación y tecnología” con el proyecto “Modelo gramatical para generar la estructura morfológica inicial de criaturas virtuales considerando premisas de vida y evolución” llevada a cabo en abril de 2022.
- Participación en “14th Mexican Conference on Pattern Recognition, MCPR” con la ponencia titulada “Virtualizing 3D Real Environments Using 2D Pictures Based on Photogrammetry” llevada a cabo en junio de 2022.
- Participación en “2022 Annual International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence, BICA” con la ponencia titulada “Modeling of a Cognitive Hybrid Architecture for the Hygrothermal Regulation of a Room Manipulated by an Agent” llevada a cabo en septiembre de 2022.
- Participación en “5° coloquio de investigación en Ingeniería y 14° Curso-Taller Temas actuales en ciencias del agua, CICTTACA” con la ponencia titulada “Vida artificial y criaturas virtuales” llevada a cabo en noviembre de 2022.

5.5. Publicaciones

Se han enviado los siguientes artículos:

Artificial life and Robotics: Revista indexada en SCOPUS. Publicado.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10015-022-00767-6>

Mexican Conference on Pattern Recognition (MCPR) 2022: Artículo de conferencia publicado en revista *Lecture Notes in Computer Science indexada en SCOPUS*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07750-0_16.

Brain-Inspired Cognitive Architectures (BICA) 2022: Artículo de conferencia publicado en *Procedia Computer Science*.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.079>

Ciencia erg-sum: Revista indexada en Redalyc con ISSN 2395-8782. En *postprint*.
URL: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/15660>

ReCIBE: Revista indexada en Latindex con ISSN 2007-5448.
URL: <http://recibe.cucei.udg.mx/index.php/ReCIBE/article/view/253>

Computación y Sistemas: Revista indexada. En revisión.

A continuación se muestran las primeras páginas de los artículos enviados



Generation of virtual creatures under multidisciplinary biological premises

Rafael Mercado¹ · Vianney Muñoz-Jiménez¹ · Marco Ramos¹ · Félix Ramos²

Received: 21 April 2022 / Accepted: 17 May 2022
© International Society of Artificial Life and Robotics (ISAROB) 2022

Abstract

Artificial life is an open topic that seeks to create artificial entities capable of mimicking biological life or, where appropriate, improve it. Within virtual environments, we find entities known as virtual creatures that inhabit them. These entities interact directly with the environment in which they are immersed, thus adapting to the conditions and generating ecosystems as complex as those observed in nature. As it happens in nature, creatures will have varying degrees of adaptation to the ecosystem and will be the parents of the following generations to maintain the species. This inherent adaptation and selective procedure will define the creatures' morphological structures. The emergence of particular behaviors within virtual creatures is observed in their problem-solving in the environment. In this research, the creation of virtual creatures is explored under the premises of biological life and related disciplines, focusing on the construction of morphologies. Understanding the processes of life, then, aids in the construction of artifacts that improve human life.

Keywords Virtual creature · Morphogenetic evolution · Formal grammars

1 Introduction

Throughout the history of humanity, life sciences have sought to define and explain the origin of life. In truth, there is still no clear definition of what life is, and it is only limited to specific properties such as autonomy in the process of morphology, reproductive capacity, among others. These properties are taken up by computer science to create what we now know as artificial life. One of the most notable works is that of Karl Sims [46]; he computationally created 3D geometric structures capable of moving and evolving in a virtual world, living artificially and competing for survival. Sims applies Darwinian evolution to virtual creatures made up of blocks; several hundred virtual creatures are simulated on a computer, where each creature is tested on its ability

to perform a particular task. Those that achieve the goal, or are closer, are used for the next generation. These methods of simulated evolution managed to evolve creatures capable of locomotion in different environments. Artificial life offers a tool to solve problems in various areas of knowledge, for example, robotics, biology, medicine, among others. Artificial life makes it possible to study varying systems at multiple levels, including cellular processes. Understanding the morphogenetic processes of living organisms allows artificial life to reproduce them and study their characteristics that will enable the generation of new virtual creatures capable of performing tasks in so-called complex environments.

2 General concepts

Talking about life and artificial life requires knowing some basic concepts to establish a frame of reference that allows us to recognize the connections between different disciplines and specific contributions. Here is a list of the basics:

Virtual environment: A collection of objects in a space as well as their rules of interaction and relationships [45].

✉ Rafael Mercado
rmercadoh098@alumno.uaemex.mx
Marco Ramos
marco.corchado@gmail.com

¹ Department of Engineering, Autonomous University of the State of Mexico, Toluca 50000, Mexico

² Computer Science Department, Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, Guadalajara Jal 45017, Mexico



Virtualizing 3D Real Environments Using 2D Pictures Based on Photogrammetry

Rafael Mercado Herrera¹(✉) , Vianney Muñoz Jiménez¹ ,
Marco Antonio Ramos Corchado¹ , Félix Francisco Ramos Corchado² ,
and José Raymundo Marcial Romero¹ 

¹ Computer Science Department, Universidad Autónoma del Estado de México,
Toluca de Lerdo, Mexico

rmercadoh098@alumno.uaemex.mx, {vmunozj,jrmarcialr}@uaemex.mx

² Computer Science Department, Cinvestav-IPN Unidad Guadalajara,
Zapopan, Mexico

felix.ramos@cinvestav.mx

Abstract. Virtual creatures are situated agents capable of interacting with the virtual environment where they inhabit. Experiments with virtual creatures require an environment where they can develop. Depending on the task, a scene from the real world may be the best candidate; it is possible to generate a virtual representation according to the specific case study. Usually, this is known as 3D reconstruction. This paper focuses on this possibility. It presents a quick rundown of the more common approaches to 3D reconstruction, along with some of their strengths and weaknesses. With this background information, a proposal is made and tested for a workflow for reconstruction using a photogrammetry approach. The workflow's capabilities are tested in the indoor and outdoor settings regarding the approach's ability to generate a usable environment for virtual creature experimentation. The results presented are based on using a database for the community and generating a personal database to test the proposed workflow. The result shows that the reconstruction 3D environment using photogrammetry is possible, and it is feasible to obtain a virtual environment of the real world.

Keywords: Virtual environment · 3D reconstruction ·
Photogrammetry

1 Introduction

Currently, several areas use virtual environments for different activities, ranging from learning to training. These environments are no longer based on the designer's imagination but are recreated from real environments, for example, the reconstruction or assembly of an aircraft engine. For this reason, it is necessary

Supported by CONACYT.

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2022
O. O. Vergara-Villegas et al. (Eds.): MCPR 2022, LNCS 13264, pp. 169–180, 2022.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-07750-0_16



2022 Annual International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: The 13th Annual Meeting of the BICA Society

Modeling of a Cognitive Hybrid Architecture for the Hygrothermal Regulation of a Room Manipulated by an Agent

Rafael Mercado^{a,*}, Vianney Muñoz-Jiménez^a, Marco A. Ramos^a

^aComputer Science Department of the Autonomous University of the State of Mexico, Toluca de Lerdo, Mx., 50000, Mexico.

Abstract

This paper applies components of cognitive architectures to hygrothermal (humidity and temperature) control in a simulated room; an agent can affect the room hygrothermal state. Hygrothermal control and its optimization is an important field of research due to constraints on fuel acquisition and the transition to renewable energies. The cognitive theory looks to model a mind's behavior as the joint work of multiple components. This first work implements two features of cognition related to hygrothermal regulation: procedural memory and attention. An agent uses these two modules to control the hygrothermal state of a room under environmental pressure.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2022 Annual International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: The 13th Annual Meeting of the BICA Society.

Keywords: Formal grammars; cognitive theory; Attention; Procedural memory

1. Introduction

Over the years, multiple models and architectures have surfaced with the intent of using cognitive theory to achieve a general intelligence [10]. These advances help us understand the inner workings of our minds, and we can apply these models to practical tasks that may benefit from such distributed approaches.

This paper presents a case study for the modeling and implementation of attention and procedural memory specific to the task of hygrothermal control of a room. Attention is a cognitive function that mediates while selecting information from sensory input [18]. Procedural memory stores information regarding actions; it activates when forming a plan. An agent uses modules based on cognitive theory for these two functions to control a room's humidity and temperature independently. Our objective is to model these two functions and connect them in an agent to achieve the task of hygrothermal control.

* Corresponding author. Tel.: +52-722-363-2593.

E-mail address: rmercadoh098@alumno.uaemex.mx



Emergencia de la vida artificial basada en premisas biológicas

Mercado Herrera, R., Muñoz Jiménez, V. y Ramos Corchado, M. A. (2022). Emergencia de la vida artificial basada en premisas biológicas. *CIENCIA ergo-sum*, 30(1). *Postprint*.

Sección: Espacio del divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Emergencia de la vida artificial basada en premisas biológicas Emergence of artificial life based on biological premises

Rafael Mercado Herrera, Universidad Autónoma del Estado de México, México¹

Correo electrónico: rmercadoh098@alumno.uaemx.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2135-5973>

Vianney Muñoz Jiménez, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Correo electrónico: vmunozj@uaemex.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2180-6743>

Marco Antonio Ramos Corchado, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Correo electrónico: marco.corchado@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3982-6988>

Recepción: 18 de enero de 2021

Aprobación: 10 de septiembre de 2021

RESUMEN

La inteligencia artificial hoy en día parece una frase de moda, lo cierto es que este término nace en 1956 gracias al matemático John McCarthy y otros investigadores como, Marvin Minsky y Claude Shannon. Este concepto definía la palabra como la ciencia e ingeniería de “hacer máquinas inteligentes.” Indudablemente, el otro término fundamental es la vida artificial, ¿cómo podemos hablar de inteligencia sin un organismo que la porte? En la actualidad investigadores de ambas áreas se complementan mutuamente y describen una nueva clase de organismos artificiales. En este artículo presentaremos de manera general los avances obtenidos en el área de la vida artificial, la creación de las denominadas criaturas virtuales y su posible aplicación en las actividades del ser humano.

PALABRAS CLAVE: criaturas virtuales, evolución morfogenética, L-systems.

ABSTRACT

Artificial intelligence seems to be in vogue as a term lately; however, this term was coined back in 1956 by mathematician John McCarthy, Marvin Minsky, and Claude Shannon. This concept defined the word as the science and engineering of “making machines intelligent.” its sibling term, artificial life, is equally fundamental. How can we talk about intelligence without an organism to use it after all? Currently, researchers from both fields complement each other and describe a new class of artificial organisms. This paper presents a general overview of advancements achieved in artificial life, the creation of so-called virtual creatures and their possible application to the activities of human beings.

KEYWORDS: virtual creatures, morphogenetic evolution, L-systems.

¹ Autor para correspondencia.

Vida artificial y criaturas virtuales

Artificial life and virtual creatures

Rafael Mercado Herrera¹
rmercadoh098@alumno.uaemex.mx

Vianney Muñoz-Jiménez¹
vmunozj@uaemex.mx

Marco Antonio Ramos¹
maramosc@uaemex.mx

¹Universidad Autónoma del Estado de México

Resumen– Los organismos vivos son estructuras complejas que cumplen funciones como alimentación, desarrollo y reproducción, todo esto inmerso en un ecosistema. La vida artificial busca generar entidades llamadas criaturas virtuales que imiten las propiedades de los organismos vivos y que realicen funciones similares a las encontradas en la naturaleza, pero con ciertas restricciones. El área de las ciencias computacionales provee la capacidad de cálculo para reproducir ciertas propiedades de los organismos vivos y simularlas en ambientes controlados, llamados ambientes virtuales. Las simulaciones permiten acelerar la adaptabilidad de estos organismos sintéticos, a fin de comprender características más finas de estos fenómenos e incluso emplearlos para otros fines, tales como: investigación, desarrollo, diseño, simulación, esparcimiento, etc. Las funciones que realizan las criaturas virtuales son más simples que las de los organismos vivos, pero son similares, por ejemplo búsqueda de alimento (energía), reproducción y evolución; esta similitud nos permite observar los posibles comportamientos de los seres vivos en ambientes controlados. Una criatura virtual no necesariamente debe tener una estructura morfológica conocida, pero si una que le permita realizar sus funciones o acciones definidas, por lo que, la criatura virtual debe contar con una cabeza, un cuerpo y extremidades que le permitan evolucionar de manera continua para adaptarse al medio ambiente en el que se encuentra inmersa. Este artículo muestra una vista de los avances que se han hecho en el área de morfología de criaturas virtuales, desde su invención hasta la actualidad y los acercamientos empleados para dar una idea de cómo son modeladas.

Palabras clave: *vida artificial; criaturas virtuales; morfología*

Abstract– Living organisms as we know them are complex structures that fulfill functions such as foraging, development, and reproduction, all immersed in an ecosystem. Artificial life seeks to generate entities called virtual creatures that mimic the properties of living organisms and perform functions similar to those found in nature but with certain restrictions. The area of computer science provides us with the ability to calculate and reproduce specific properties of living organisms, and be able to simulate them in controlled environments, called virtual environments. In virtual environments, it is possible to accelerate the adaptability of these synthetic organisms to understand the characteristics of these phenomena and even use them for other purposes, such as research, development, design, simulation, recreation, etc. Whereas the functions performed by virtual creatures are not as complex as those of living organisms, but they have to do actions such as foraging (energy), reproduction, and evolution. These actions allow us to generate an entity to observe the possible behaviors of living beings in controlled environments. A virtual creature's morphological structure may not be known, but it enables the creature's functions or actions. So the virtual creature must have a head, a body, and limbs that allow it to evolve continuously to adapt to the environment in which it is immersed. This article shows an overview of the advances in the area of virtual creature morphology, from inception to actuality as well as the different approaches used to give the reader an idea of the modeling process for virtual creatures.

Keywords: *artificial life; virtual creatures; morphology*

Grammatical Model for the Morphogenetic Evolution of Virtual Creatures

John Smith¹, Juan Perez², Ivan Petrov²

¹ Insitute, Faculty, City,
Country

² Insitute, Faculty, City,
Country

author1@xxx.xx, author2@xxx.xx

Abstract. Most of the elements that humans use to carry out a job or task are inspired by aspects of nature. For example, the tools that mechanics use resemble the beaks of certain birds. The most classic is the adjustable wrench, which has the shape of a parrot's head. Observing living beings allows us to abstract properties that we can simulate through computational algorithms to find new morphologies to carry out some activities. In this article, a Lindenmayer-type grammar is presented in which extended properties of biological life are incorporated, which allows having an initial morphology and, from evolutionary processes, finding a morphological structure (creature) capable of fulfilling objectives and performing tasks within a virtual environment. The novelty of the proposal is to make use of a parametric grammar in which biological assumptions can be embedded that rapidly improve the initial morphology.

Keywords. Virtual creatures, artificial life, L-systems.

1 Introduction

It is common to find artifacts and devices that mimic properties observed in nature in everyday life. The engineers' solution is easily observed that nature has worked out over the years. For example, in the automotive industry, there are robotic arms inspired by the limbs of birds to perform tasks such as fixing bolts in the car's chassis in a precise way. This task is expensive and difficult for humans due to the intricate structure of the chassis [13, 5]. That is why the need to continue researching and

studying the behavior of living beings to solve complex tasks where the integrity of the human being is at risk [4].

Currently, several areas use various mechanisms observed in nature to solve problems or generate easy-to-use tools for humans. The field of medicine, specifically biomedicine, studies the cells responsible for building the morphology of a living organism to understand these processes and reproduce them to improve the quality of life of each living being. Computational sciences offer the possibility of simulating this type of structure to study and understand the processes that compose them so that the final result is a valuable artifact for the activities carried out by human beings. *Artificial life* allows the simulation of autonomous virtual creatures capable of adapting to their environment through evolutionary processes, modifying their morphology and behavior [21, 17].

This research work explores the possibility of using grammars to generate initial morphological structures incorporating biological premises and through evolutionary processes to achieve specialized structures for the fulfillment of tasks or objectives to have systems and artifacts that support the tasks of humans.

A literary review of the works related to the proposal dealing with morphology and evolution is presented in the following section. Afterwards, the grammar and how the selected biological premises

Referencias

- [1] W. R. Sherman and A. B. Craig, “CHAPTER 1 - Introduction to Virtual Reality,” in *Understanding Virtual Reality* (W. R. Sherman and A. B. Craig, eds.), The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics, pp. 5–37, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003.
- [2] M. Wooldridge, *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [3] N. Marfenin and I. Kosevich, “Morphogenetic evolution of hydroid colony pattern,” *Hydrobiologia*, vol. 530, no. 1-3, pp. 319–327, 2004.
- [4] K. Sims, “Evolving virtual creatures,” in *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 15–22, ACM, 1994.
- [5] C. Adami, C. Brown, and W. Kellogg, “Evolutionary learning in the 2D artificial life system ‘Avida’,” in *Artificial life IV*, vol. 1194, pp. 377–381, MIT press Cambridge, MA, 1994.
- [6] J. Lehman, J. Clune, D. Misevic, C. Adami, L. Altenberg, J. Beaulieu, P. J. Bentley, S. Bernard, G. Beslon, D. M. Bryson, P. Chrabaszcz, N. Cheney, A. Cully, S. Doncieux, F. C. Dyer, K. O. Ellefsen, R. Feldt, S. Fischer, S. Forrest, A. Frénoy, C. Gagné, L. K. L. Goff, L. M. Grabowski, B. Hodjat, F. Hutter, L. Keller, C. Knibbe, P. Krcak, R. E. Lenski, H. Lipson, R. MacCurdy, C. Maestre, R. Miikkulainen, S. Mitri, D. E. Moriarty, J. Mouret, A. Nguyen, C. Ofria, M. Parizeau, D. P. Parsons, R. T. Pennock, W. F. Punch, T. S. Ray, M. Schoenauer, E. Shulte, K. Sims, K. O. Stanley, F. Taddei, D. Tarapore, S. Thibault, W. Weimer, R. Watson, and J. Yosinski, “The Surprising Creativity of Digital Evolution: A Collection of Anecdotes from the Evolutionary Computation and Artificial Life Research Communities,” *CoRR*, vol. abs/1803.03453, 2018.

-
- [7] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, "Population and evolutionary dynamics based on predator-prey relationships in a 3d physical simulation," *Artificial life*, vol. 22, no. 2, pp. 226–240, 2016.
- [8] S. Bornhofen and C. Lattaud, "Competition and evolution in virtual plant communities: a new modeling approach," *Natural Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 349–385, 2009.
- [9] T. S. Ray, "An evolutionary approach to synthetic biology: Zen and the art of creating life," *Artificial Life*, vol. 1, no. 1_2, pp. 179–209, 1993.
- [10] J. Hooper and M. Scott, "The molecular genetic basis of positional information in insect segments," in *Early embryonic development of animals*, pp. 1–48, Springer, 1992.
- [11] K. O. Stanley and R. Miikkulainen, "A taxonomy for artificial embryogeny," *Artificial Life*, vol. 9, no. 2, pp. 93–130, 2003.
- [12] P. Bentley and S. Kumar, "Three ways to grow designs: A comparison of embryogenies for an evolutionary design problem.," in *GECCO*, vol. 99, pp. 35–43, 1999.
- [13] A. J. Griffiths, S. R. Wessler, R. C. Lewontin, W. M. Gelbart, D. T. Suzuki, J. H. Miller, *et al.*, *An introduction to genetic analysis*. W. H. Freeman, 2000.
- [14] P. Cariani, "Emergence and Artificial Life," in *Artificial Life II* (C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen, eds.), vol. X, pp. 775–797, Santa Fe Institute, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [15] M. A. Bedau and N. H. Packard, "Measurement of evolutionary activity, teleology, and life," in *Proceedings of Artificial Life II* (J. F. C. Langton, C. Taylor and S. Rasmussen, eds.), pp. 431–461, Addison-Wesley, 1992.
- [16] A. Hintze, "Open-endedness for the sake of open-endedness," *Artificial life*, vol. 25, no. 2, pp. 198–206, 2019.
- [17] M. Pilat and C. Jacob, "Creature academy: A system for virtual creature evolution," in *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, pp. 3289–3297, IEEE, 2008.
- [18] D. Baum, "Trait evolution on a phylogenetic tree: Relatedness, similarity, and the myth of evolutionary advancement," *Nature Education*, vol. 1, no. 1, p. 191, 2008.

-
- [19] F. R. Amthor, A. B. Theibert, D. G. Standaert, and E. D. Roberson, eds., *Essentials of Modern Neuroscience*. New York, NY: McGraw Hill, 2020.
- [20] D. Purves, *Neuroscience*. New York: Oxford University Press, 2018.
- [21] F. Dellaert and R. D. Beer, “A developmental model for the evolution of complete autonomous agents,” in *Proceedings of the fourth international conference on simulation of adaptive behavior*, pp. 393–401, MIT Press Cambridge, MA, 1996.
- [22] D. Lessin, D. Fussell, and R. Miikkulainen, “Trading control intelligence for physical intelligence: Muscle drives in evolved virtual creatures,” in *Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pp. 705–712, ACM, 2014.
- [23] M. Komosiński and S. Ulatowski, “Framsticks: Towards a simulation of a nature-like world, creatures and evolution,” in *European Conference on Artificial Life*, pp. 261–265, Springer, 1999.
- [24] K. Miras and A. Eiben, “Effects of environmental conditions on evolved robot morphologies and behavior,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 125–132, ACM, 2019.
- [25] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, “Alife approach for body-behavior predator–prey coevolution: body first or behavior first?,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 18, no. 1-2, pp. 36–40, 2013.
- [26] D. Lessin and S. Risi, “Soft-body muscles for evolved virtual creatures: the next step on a bio-mimetic path to meaningful morphological complexity,” in *Artificial Life Conference Proceedings 13*, pp. 604–611, MIT Press, 2015.
- [27] D. Lessin, D. Fussell, and R. Miikkulainen, “Open-ended Behavioral Complexity for Evolved Virtual Creatures,” in *Proceedings of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, GECCO ’13, (New York, NY, USA), pp. 335–342, ACM, 2013.
- [28] S. Doncieux, N. Bredeche, J.-B. Mouret, and A. E. G. Eiben, “Evolutionary Robotics: What, Why, and Where to,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 2, p. 4, 2015.
- [29] R. A. Watson, S. G. Ficici, and J. B. Pollack, “Embodied evolution: Distributing an evolutionary algorithm in a population of robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 1–18, 2002.

-
- [30] S. Kriegman, N. Cheney, F. Corucci, and J. C. Bongard, “A minimal developmental model can increase evolvability in soft robots,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, GECCO '17, (New York, NY, USA), p. 131–138, Association for Computing Machinery, 2017.
- [31] S. Kriegman, N. Cheney, and J. Bongard, “How morphological development can guide evolution,” *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [32] J. Lehman and K. O. Stanley, “Abandoning objectives: Evolution through the search for novelty alone,” *Evolutionary computation*, vol. 19, no. 2, pp. 189–223, 2011.
- [33] D. Gravina, A. Liapis, and G. Yannakakis, “Surprise search: Beyond objectives and novelty,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2016*, pp. 677–684, 2016.
- [34] D. Gravina, A. Liapis, and G. N. Yannakakis, “Fusing novelty and surprise for evolving robot morphologies,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 93–100, 2018.
- [35] A. Klejda, M. Komosinski, and A. Mensfelt, “Diversification techniques and distance measures in evolutionary design of 3d structures,” in *GECCO '22: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, GECCO '22, (New York, NY, USA), p. 124–127, Association for Computing Machinery, 2022.
- [36] K. Basiukajc, M. Komosinski, and K. Miazga, “Fitness diversification in the service of fitness optimization: A comparison study,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, GECCO '22, (New York, NY, USA), p. 471–474, Association for Computing Machinery, 2022.
- [37] A. Lindenmayer, P. Prusinkiewicz, *et al.*, *The algorithmic beauty of plants*, vol. 1. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [38] A. Lindenmayer, “Mathematical models for cellular interactions in development Parts I and II,” *Journal of theoretical biology*, vol. 18, no. 3, pp. 280–315, 1968.
- [39] M. L. Pilat and C. Jacob, “Creature Academy: A system for virtual creature evolution,” *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, pp. 3289–3297, 2008.

-
- [40] D. Lessin, D. Fussell, and R. Miikkulainen, “Adopting morphology to multiple tasks in evolved virtual creatures,” in *Artificial Life Conference Proceedings 14*, pp. 247–254, MIT Press, 2014.
- [41] J. Lehman and K. Stanley, “Novelty search and the problem with objectives,” in *Genetic programming theory and practice IX*, pp. 37–56, Springer, 2011.
- [42] P. Przemyslaw, P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, and J. Hanan, “Developmental models of herbaceous plants for computer imagery purposes,” *Computer Graphics*, vol. 22, no. 4, 1988.
- [43] P. Eichhorst and W. Savitch, “Growth functions of stochastic lindenmayer systems,” *Information and Control*, vol. 45, no. 3, pp. 217–228, 1980.
- [44] M. Komosinski, “The Framsticks system: versatile simulator of 3D agents and their evolution,” *Kybernetes*, vol. 32, no. 1/2, pp. 156–173, 2003.
- [45] A. Channon, “Unbounded evolutionary dynamics in a system of agents that actively process and transform their environment,” *Genetic Programming and Evolvable Machines*, vol. 7, no. 3, pp. 253–281, 2006.
- [46] C. Jacob and S. Von Mammen, “Swarm grammars: growing dynamic structures in 3d agent spaces,” *Digital Creativity*, vol. 18, no. 1, pp. 54–64, 2007.
- [47] S. Von Mammen and C. Jacob, “The evolution of swarm grammars-growing trees, crafting art, and bottom-up design,” *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 10–19, 2009.
- [48] S. von Mammen and S. Edenhofer, “Swarm grammars gd: Interactive exploration of swarm dynamics and structural development,” in *ALIFE 14: The Fourteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pp. 312–319, MIT Press, 2014.
- [49] Y. Raies and S. v. Mammen, “A swarm grammar-based approach to virtual world generation,” in *International Conference on Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design (Part of EvoStar)*, pp. 459–474, Springer, 2021.
- [50] A. Loula, R. Gudwin, C. N. El-Hani, and J. Queiroz, “Emergence of self-organized symbol-based communication in artificial creatures,” *Cognitive Systems Research*, vol. 11, no. 2, pp. 131–147, 2010.

-
- [51] M. Joachimczak and B. Wróbel, “Evolution of the morphology and patterning of artificial embryos: Scaling the tricolour problem to the third dimension,” in *Advances in Artificial Life. Darwin Meets von Neumann* (G. Kampis, I. Karsai, and E. Szathmáry, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 35–43, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [52] C. Adami, D. Bryson, C. Otria, and R. Pennock, eds., *Open Ended Evolution of 3D Multicellular Development Controlled by Gene Regulatory Networks*, vol. ALIFE 2012: The Thirteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems of *ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life*, 07 2012.
- [53] H. Sayama, J. Rieffel, S. Risi, R. Doursat, and H. Lispon, eds., *Fine Grained Artificial Development for Body-Controller Coevolution of Soft-Bodied Animals*, vol. ALIFE 14: The Fourteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems of *ALIFE 2021: The 2021 Conference on Artificial Life*, 07 2014.
- [54] M. L. Pilat, T. Ito, R. Suzuki, and T. Arita, “Evolution of virtual creature foraging in a physical environment,” in *Artificial Life Conference Proceedings 12*, pp. 423–430, MIT Press, 2012.
- [55] T. Ito, M. Pilat, R. Suzuki, and T. Arita, “Coevolutionary dynamics caused by asymmetries in predator-prey and morphology-behavior relationships,” in *Artificial Life Conference Proceedings 13*, pp. 439–445, MIT Press, 2013.
- [56] J. E. Auerbach and J. C. Bongard, “Environmental influence on the evolution of morphological complexity in machines,” *PLOS Computational Biology*, vol. 10, pp. 1–17, 01 2014.
- [57] A. Asakura, R. Suzuki, and T. Arita, “Evolving 3d virtual creatures through exaptation triggered by environmental change,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 20, no. 3, pp. 244–250, 2015.
- [58] T. Arita, M. Joachimczak, T. Ito, A. Asakura, and R. Suzuki, “Alife approach to eco-evo-devo using evolution of virtual creatures,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 21, no. 2, pp. 141–148, 2016.
- [59] M. Joachimczak, R. Suzuki, and T. Arita, “Artificial metamorphosis: Evolutionary design of transforming, soft-bodied robots,” *Artificial Life*, vol. 22, pp. 271–298, 08 2016.

-
- [60] D. Gravina, A. Liapis, and G. N. Yannakakis, “Fusing novelty and surprise for evolving robot morphologies,” in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 93–100, ACM, 2018.
- [61] D. Howard, A. E. Eiben, D. F. Kennedy, J.-B. Mouret, P. Valencia, and D. Winkler, “Evolving embodied intelligence from materials to machines,” *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 12–19, 2019.
- [62] G. Lai, F. F. Leymarie, W. Latham, T. Arita, and R. Suzuki, “Virtual creature morphology-a review,” in *Computer Graphics Forum*, vol. 40, pp. 659–681, Wiley Online Library, 2021.
- [63] J. Lehman, J. Clune, D. Misevic, C. Adami, L. Altenberg, J. Beaulieu, P. J. Bentley, S. Bernard, G. Beslon, D. M. Bryson, N. Cheney, P. Chrabaszcz, A. Cully, S. Doncieux, F. C. Dyer, K. O. Ellefsen, R. Feldt, S. Fischer, S. Forrest, A. Frenoy, C. Gagné, L. Le Goff, L. M. Grabowski, B. Hodjat, F. Hutter, L. Keller, C. Knibbe, P. Krcah, R. E. Lenski, H. Lipson, R. MacCurdy, C. Maestre, R. Miikkulainen, S. Mitri, D. E. Moriarty, J.-B. Mouret, A. Nguyen, C. Ofria, M. Parizeau, D. Parsons, R. T. Pennock, W. F. Punch, T. S. Ray, M. Schoenauer, E. Schulte, K. Sims, K. O. Stanley, F. Taddei, D. Tarapore, S. Thibault, R. Watson, W. Weimer, and J. Yosinski, “The Surprising Creativity of Digital Evolution: A Collection of Anecdotes from the Evolutionary Computation and Artificial Life Research Communities,” *Artificial Life*, vol. 26, pp. 274–306, 05 2020.
- [64] J. Bongard and C. Cappelle, *Pyrosim - Simulator documentation*. University of Vermont, 2017.
- [65] G. Latosiński, “Development and comparison of genetic representations for evolving 3d structures,” Master’s thesis, Poznan University of Technology, Institute of Computing Science, 2018.