

1

2

PROYECTO FINAL

3

INGENIERÍA INFORMÁTICA - ITBA

4

5

SIMULACIÓN Y ANIMACIÓN BIOMECÁNICA DE UN HUMANOIDE

6

7

Alumnos:

8

Enzo Altamiranda Graterol

9

ealtamir@itba.edu.ar

10

Teresa Fontanella De Santis

11

tfontane@itba.edu.ar

12

Tomás Mehdi

13

tmehd@itba.edu.ar

14

Tutor:

15

Dr. Daniel Ricardo Parisi

16

Instituto Tecnológico de Buenos Aires - ITBA

17

Departamento de Ingeniería Informática

18

Mayo 2016

Índice

19

20	Resumen	4
21	1 Introducción	4
22	2 Herramientas	5
23	2.1 Motor físico	5
24	2.1.1 Funcionamiento	5
25	2.1.2 Modelo de fricción y su verificación	5
26	2.1.2.1 Verificación del coeficiente de fricción	6
27	2.1.2.2 Verificación del coeficiente de restitución	10
28	2.1.3 Ventajas	11
29	2.1.4 Desventajas	11
30	2.2 Librería de algoritmos genéticos	12
31	2.3 Código fuente	12
32	3 Modelo utilizado	12
33	3.1 Composición física del humanoide	12
34	3.2 Articulaciones	13
35	4 Actuadores	14
36	4.1 Genérico	14
37	4.2 Coseno doble frecuencia	15
38	4.3 Fourier de orden 2	16
39	4.4 Fourier de orden 9	16
40	5 Condiciones iniciales y de contorno	17
41	5.1 Función partida	17
42	5.2 Fase sincronizada	17
43	6 Algoritmo genético	17
44	6.1 Individuo	18
45	6.1.1 Parámetros	18
46	6.1.2 Valores	18
47	6.1.3 Implementación de individuos	19
48	6.1.4 Constitución del cromosoma	19
49	6.2 Fitness	20
50	6.2.1 Altura	20
51	6.2.2 Velocidad	21
52	6.2.3 Dirección	21
53	6.2.4 Simetría	21
54	6.2.5 Pies abajo	22
55	6.3 Operadores del algoritmo	22
56	6.3.1 Métodos de selección	22
57	6.3.2 Métodos de cruce	22
58	6.3.3 Mutación	22

59	6.3.4 Otras características	23
60	7 Resultados obtenidos	23
61	7.1 Evolución del <i>fitness</i> promedio según tipo de individuos	24
62	7.2 Velocidad según tipo de individuos	24
63	7.3 Altura según tipo de individuos	25
64	7.4 Comparación de tipo de individuos	25
65	7.5 Video	26
66	8 Conclusiones	26
67	Referencias	26
68	Agradecimientos	27

69

Resumen

70

71 Este proyecto tiene como objetivo crear una simulación y animación de un humano
72 virtual, con las siguientes propiedades:

- 73 – Biomecánica: que tanto su estructura (peso, altura y posición de cada una de sus
74 partes) como su interacción con el entorno, respondan a comportamientos físicos
75 reales y exactos.
- 76 – Inteligencia artificial: que aprenda a caminar por sí mismo, utilizando para ello
77 métodos de *soft computing* como algoritmos genéticos.

78

1. Introducción

79 Siempre ha sido de interés la simulación biomecánica de seres vivos, especialmente en las
80 ciencias naturales (zoológia, medicina, etc.).

81 Ahora bien, últimamente se ha incrementado el interés en otras áreas de aplicación, como los
82 videojuegos (creación de personajes con reacciones más reales), y la ingeniería (verbigracia: diseño
83 de espacios cerrados, con mayores medidas de seguridad).

84 Una característica muy importante de este trabajo es que el humanoide no es fruto de una
85 animación realizada por un artesano, que mueve cada uno de los segmentos a mano; sino un
86 objeto compuesto de segmentos físicos, que interactúan entre sí y con el entorno por medio
87 de las leyes físicas; agregando así realismo a la situación simulada. La otra propiedad es que el
88 bípedo aprenda por sí solo a caminar en línea recta, sin tener en su trayectoria ningún obstáculo.

89 Este problema se puede abordar de diversas maneras, involucrando: redes neuronales¹, sistemas
90 de control² (*passive walkers*³)[1], algoritmos genéticos⁴[2], entre otras. Varios de ellos implican
91 modelos teóricos complejos de humanoide (considerando músculos con distintos materiales, etc.).

92 Asimismo, existe un trabajo previo cuyo propósito era lograr la caminata de un cuadrúpedo
93 virtual, utilizando algoritmos genéticos[3]. Continuando con esta última línea de investigación y
94 extendiéndola a bípedos, en este proyecto también se buscó aplicar algoritmos genéticos, y lograr
95 la caminata usando un modelo de humanoide basado en un conjunto de segmentos (cuerpos
96 rígidos), unidos entre sí por articulaciones, cuyo desplazamiento depende de torques aplicados a
97 dichos cuerpos, y sus parámetros se ajustan a partir de la evolución del algoritmo.

98 El presente informe, describe y analiza pormenorizadamente: en la sección 2, las herramientas
99 aplicadas; en la 3, el modelo del humanoide utilizado; en la 4 y 5, los diferentes tipos de actuadores
100 y funciones de partida y contorno; en la 6, el algoritmo genético; y en la 7 y 8, los resultados
101 obtenidos con sus respectivas conclusiones.

¹Una red neuronal es un paradigma de aprendizaje automático. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí, para producir un estímulo de salida. Dada una entrada del sistema, se produce una salida, originada por varias transformaciones intermedias.

²Un sistema de control es un dispositivo (o conjunto de) que maneja, dirige o regula el comportamiento de otros dispositivos o sistemas, para minimizar los fallos y obtener los resultados deseados.

³Un *passive walker* utiliza el movimiento natural (*swinging*) de las piernas para ahorrar energía usada por motores. Para caminar, calcula la posición de ciertos puntos (las articulaciones, mayormente).

⁴Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos, que pueden ser utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en la teoría de la selección natural, planteada por Charles Robert Darwin en 1859.

¹⁰² 2. Herramientas

¹⁰³ 2.1. Motor físico

¹⁰⁴ Se llama motor físico o *physics engine* a un “*software* capaz de realizar simulaciones de
¹⁰⁵ ciertos sistemas físicos, como la dinámica del cuerpo rígido, el movimiento de un fluido y la
¹⁰⁶ elasticidad”[4].

¹⁰⁷ Actualmente, existen muchos motores físicos: ya sea de código propietario (*PhysX*, *Havok*), como
¹⁰⁸ *open-source* (*Bullet Physics*, *Box2D*, *Newton*, *OGRE*). Considerando análisis relacionados [5][6],
¹⁰⁹ y el hecho de que el espacio simulado fuese en 3D, se decidió que *Bullet Physics*[7] es el más
¹¹⁰ idóneo. Está implementado en C++ y ha sido utilizado en varios juegos (*Grand Theft Auto IV*
¹¹¹ y *V*, etc); en los efectos especiales de películas (*Hancock*, *Bolt*, etc.); y proyectos científicos, como
¹¹² la herramienta *open-source Tensegrity Robotics Toolkit* de la NASA⁵; entre otros.

¹¹³ Si bien (como se verá más adelante) *Bullet* tiene problemas asociados con el coeficiente de restitu-
¹¹⁴ ción, posee una muy buena *performance* en la detección de colisiones, la dinámica y la resolución
¹¹⁵ de *constraints*. Esto se debe, en parte, a diferentes algoritmos iterativos de orden lineal (donde
¹¹⁶ el más importante es *Sequential Impulse*), de *caching* y también a la utilización de un modelo
¹¹⁷ de fricción de Coulomb aproximado [8]. Además, el motor físico brinda la posibilidad de regular
¹¹⁸ la precisión requerida en estos cálculos (sin olvidar que, con iguales recursos, a mayor preci-
¹¹⁹ sión, mayor capacidad de cómputo requerida y, ergo, mayor tiempo). Dado que la construcción
¹²⁰ del humanoide implica definir características y restricciones de movimiento de cada uno de sus
¹²¹ segmentos, lo antes mencionado fue crucial para la elección de *Bullet Physics* en este proyecto.

¹²² 2.1.1. Funcionamiento

¹²³ El motor físico se encarga de la simulación de cuerpos rígidos y la interacción entre los mismos.
¹²⁴ En particular debe calcular el resultado de colisiones, arreglar el solapamiento de los cuerpos en
¹²⁵ el espacio de simulación, estimar las fuerzas producidas debido a la fricción, y mantener el
¹²⁶ cumplimiento de restricciones que puedan existir entre los cuerpos (por ejemplo, un vínculo para
¹²⁷ formar una articulación). Para lograrlo, *Bullet* modela, a partir de un conjunto de ecuaciones,
¹²⁸ las distintas restricciones que deben ser respetadas.

¹²⁹ Estos modelos reciben como dato la velocidad lineal y angular de cada objeto, y las fuerzas
¹³⁰ que actúan sobre los mismos. Dada esta información, se resuelve el sistema de ecuaciones, cuya
¹³¹ solución representa las magnitudes de las fuerzas a accionar sobre el mismo, a fin de satisfacer
¹³² todas las restricciones. Para encontrar esta solución, entran en juego los distintos métodos de
¹³³ complejidad lineal mencionados en la subsección anterior.

¹³⁴ Este procedimiento, se lleva a cabo en cada *timestep* de la simulación; donde un *timestep* es el
¹³⁵ intervalo de tiempo que transcurre entre un cálculo de magnitudes y otro. Mientras menor sea
¹³⁶ el *timestep*, el simulador será más preciso pero también consumirá más tiempo de cómputo.

¹³⁷ 2.1.2. Modelo de fricción y su verificación

¹³⁸ Hay reglas físicas relacionadas con el entorno y que son muy importantes para la caminata:
¹³⁹ el modelo de fricción, con sus respectivos coeficientes de fricción y restitución.
¹⁴⁰ En base a los modelos físico-matemáticos que representan a cada uno de los dos fenómenos en
¹⁴¹ cuestión (y que se explicarán a continuación), y pensando en posibles futuras simulaciones de

⁵<http://bulletphysics.org/Bullet/phpBB3/viewtopic.php?f=17&t=9978>

142 varios humanoides chocando e interactuando entre sí; se llevaron a cabo dos ensayos para verificar
 143 el funcionamiento del simulador físico *Bullet*.

144 2.1.2.1. Verificación del coeficiente de fricción

145 Para determinar el modelo utilizado por *Bullet* para simular las fuerzas resultantes sobre un
 146 cuerpo por acción de la fricción, se simuló un cubo, de $m_{cube} = 1kg$ y $l_{cube} = 1m$, que tiene una
 147 velocidad inicial constante (v_i) en el eje horizontal, que gradualmente se detiene por acción de
 148 la fricción, hasta llegar al reposo (Fig. 1).

149

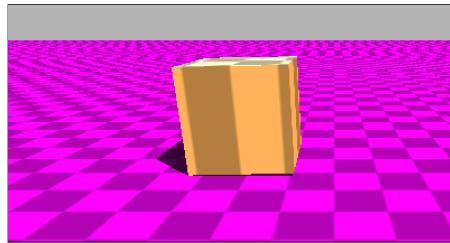


Figura 1: Visualización del sistema del cubo

150 Para esta prueba se utilizó el modelo matemático que representa la posición del cuerpo en el eje
 151 horizontal en función del tiempo t , representado por la siguiente ecuación:

$$x(t) = x_i + v_i t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

152 En este caso, el cuerpo empieza su movimiento en el origen, por lo tanto la posición inicial (x_i)
 153 es cero. v_i es la velocidad inicial, y a , la aceleración. Debido a la fricción entre el cuerpo y el
 154 suelo, se genera una fuerza de rozamiento \mathbf{F}_{μ_d} ⁶ (ec. (2)) en la misma dirección que la velocidad
 155 del sólido y en sentido contrario.

$$-\mathbf{F}_{\mu_d} = \mu_d \mathbf{F}_N \quad (2)$$

156 donde $\mathbf{F}_N = mg$ es la fuerza normal que actúa sobre la caja de masa m por acción de la gravedad
 157 $g = 10 \frac{m}{s^2}$, y μ_d es el coeficiente de fricción dinámico.

158

159 Finalmente, se obtiene la aceleración:

$$a = \frac{\mathbf{F}_{\mu_d}}{m} = \frac{-\mu_d \mathbf{F}_N}{m} = \frac{-\mu_d mg}{m} = -\mu_d g \quad (3)$$

160 Considerando las ec. (1) y (3), se puede obtener el modelo matemático que predice el movimiento
 161 de la caja:

$$x(t) = x_i + v_i t - \frac{1}{2} \mu_d g t^2 \quad (4)$$

162

163 El intervalo de tiempo físico (o *timestep*) utilizado es $\Delta t = \frac{1}{60} s$. El *timestep* de animación (es
 164 decir, cada cuánto tiempo se guardan en un archivo los datos logrados) es $\Delta t' = 0.1$ y el tiempo
 165 de simulación es de $s = 100\Delta t$.

166 Seguidamente, se muestran los gráficos obtenidos al correr los experimentos numéricos con los
 167 siguientes valores: $v_i = \{1, 3 \text{ y } 10\} \frac{m}{s}$ y $\mu_d = \{0.25, 0.50 \text{ y } 0.75\}$. Se compara la distancia en el
 168 eje Z de la caja en Bullet, con su distancia en el mismo eje según la ec. (4).

⁶En las ecuaciones, los vectores se escriben en negrita.



Figura 2: Resultados logrados de simular el sistema descripto en Fig. 1, usando $v_i = 10 \frac{m}{s}$ y:
 (a) $\mu_d = 0.25$, (b) $\mu_d = 0.50$, y (c) $\mu_d = 0.75$



Figura 3: Resultados logrados de simular el sistema descripto en Fig. 1, usando $v_i = 3 \frac{m}{s}$ y:
 (a) $\mu_d = 0.25$, (b) $\mu_d = 0.50$, y (c) $\mu_d = 0.75$

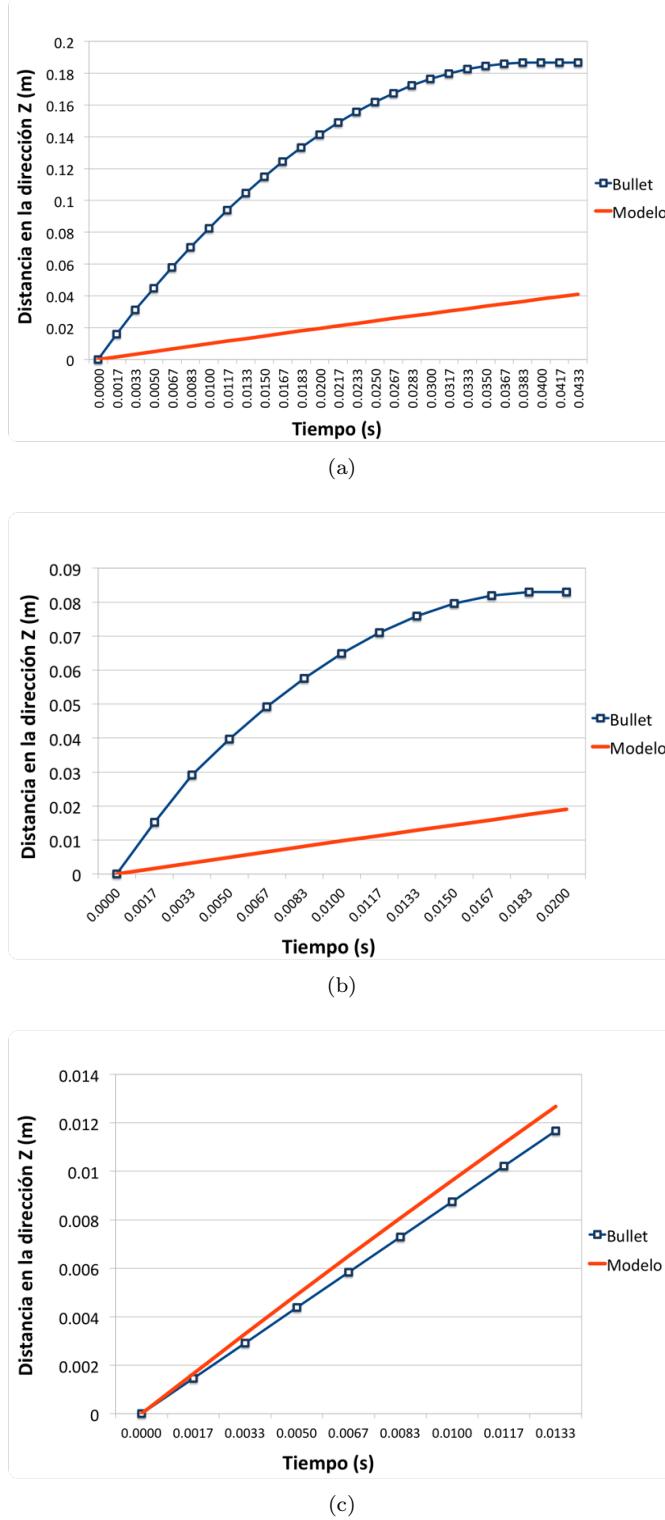


Figura 4: Resultados logrados de simular el sistema descripto en Fig. 1, usando $v_i = 1 \frac{m}{s}$ y:

(a) $\mu_d = 0.25$, (b) $\mu_d = 0.50$, y (c) $\mu_d = 0.75$

¹⁶⁹ Las Fig. 2 y 3 demuestran que los resultados de las pruebas fueron favorables. Los valores
¹⁷⁰ obtenidos a partir de la simulación se corresponden (en mayor o menor medida) con los alcanzados
¹⁷¹ a partir del modelo matemático. Esto es un indicador de que Bullet debe estar usando dichos

modelos para ejecutar las simulaciones. Vale observar que, cuanto mayor es la velocidad inicial (v_i), mayor es la similitud entre los dos casos.

No obstante, los gráficos que corresponden a la Fig. 4, presentan una discrepancia mayor entre la simulación y el modelo. Este hecho puede deberse al mecanismo utilizado por *Bullet* para resolver la fricción de un cuerpo a velocidades muy bajas.

2.1.2.2. Verificación del coeficiente de restitución

El segundo ensayo simula una esfera a una altura determinada sobre el suelo, que tiene una velocidad inicial (v_i) en el eje perpendicular al piso, y que eventualmente colisiona contra el mismo. Se desea comprobar que, la colisión entre el cuerpo y el suelo respete que la velocidad final (v_f) de la esfera después del choque, sea proporcional a su coeficiente de restitución (e) dado por la ecuación:

$$e = \frac{v_f}{v_i} \quad (5)$$

Para efectuar la colisión con el suelo, se empleó una esfera sólida ubicada a 4 metros del suelo, cuya masa y radio son $m_{sphere} = 1 \text{ kg}$ y $r_{sphere} = 1 \text{ m}$, respectivamente (Fig. 5). A la esfera se le asigna, además, un coeficiente de restitución determinado.

Se eligió un ambiente sin gravedad ($g = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$). De esta forma, se podrá tener en cuenta sólo la velocidad inicial (v_i) y la velocidad final (v_f) para el cálculo del coeficiente de restitución (e) (ver ec. (5)).

El intervalo de tiempo físico (o *timestep*) utilizado es $\Delta t = 0.001 \text{ s}$. El *timestep* de animación (es decir, cada cuánto tiempo se guardan en un archivo los datos logrados) es $\Delta t' = 0.1$ y el tiempo de simulación es de $s = 100\Delta t$. El coeficiente de fricción es $\mu = 0.75$.

193

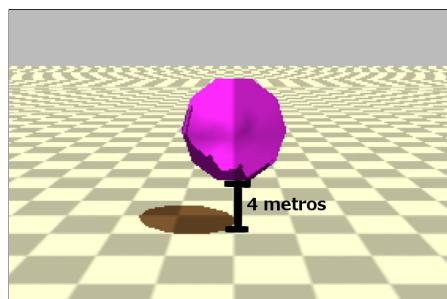


Figura 5: Visualización del sistema de la esfera

El ensayo tiene como parámetros de entrada: v_i (velocidad inicial) y e_{sim} (coeficiente de restitución esperado). Por otro lado, se obtiene v_f (velocidad de la esfera al finalizar la simulación); y luego se calculan e_{medida} (coeficiente de restitución obtenido a partir de la ec. (5)) y ϵ_{rel} , que es el error relativo entre los coeficientes e_{sim} y e_{medida} , calculado de la siguiente manera:

$$\epsilon_{rel} = \frac{e_{sim} - e_{medida}}{e_{sim}} \quad (6)$$

199

En la Tabla 1 se puede observar lo arrojado por los experimentos numéricos que se efectuaron; usando: $v_i = \{-0.5, -3.5, -4, -5\} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y $e_{sim} = \{0.2, 0.5 \text{ y } 0.8\}$.

v_i	e_{sim}	v_f	e_{medida}	ϵ_{rel}
$-0.5 \frac{m}{s}$	0.2	$0.000249 \frac{m}{s}$	0.000498	0.997
	0.5	$0.000219 \frac{m}{s}$	0.000438	0.999
	0.8	$0.001037 \frac{m}{s}$	0.002074	0.997
$-3.5 \frac{m}{s}$	0.2	$0.000057 \frac{m}{s}$	0	1
	0.5	$0.000018 \frac{m}{s}$	0	1
	0.8	$0.3 \frac{m}{s}$	0.0857	0.893
$-4 \frac{m}{s}$	0.2	$0.000473 \frac{m}{s}$	0.00012	1
	0.5	$0.000424 \frac{m}{s}$	0.00011	1
	0.8	$1.23 \frac{m}{s}$	0.3	0.625
$-5 \frac{m}{s}$	0.2	$1 \frac{m}{s}$	0.2	0
	0.5	$2.5 \frac{m}{s}$	0.5	0
	0.8	$4 \frac{m}{s}$	0.8	0
$-10 \frac{m}{s}$	0.2	$2 \frac{m}{s}$	0.2	0
	0.5	$5 \frac{m}{s}$	0.5	0
	0.8	$8 \frac{m}{s}$	0.8	0

Tabla 1: Coeficientes de restitución obtenidos (e_{medida}) de simular el sistema descripto en Fig. 5

202 Los resultados exponen una limitación del motor físico: no representa correctamente las colisiones
 203 elásticas entre esferas y cuerpos rígidos, que ocurren a velocidades bajas. Esto queda en evidencia
 204 en la Tabla 1. En cada una de ellas el error fue de casi 1. La razón por la que ocurre este hecho
 205 se debe a que *Bullet* utiliza un algoritmo de colisión que frena la velocidad de un objeto que está
 206 a punto de colisionar. Haciendo esto puede evitar que los sólidos se traspasen y de esta forma se
 207 pueden realizar cálculos de fuerza más precisos.

208 En el caso de los ensayos, las esferas poseen una velocidad muy baja, cuando están a punto de
 209 colisionar *Bullet* reduce aún más esta velocidad y eventualmente quedan con una velocidad tan
 210 baja que al chocar contra el suelo se aplica el efecto restitutivo a esta velocidad casi nula y se
 211 resuelve que la esfera debe quedar en reposo, cuando en realidad debería poseer una velocidad
 212 baja, pero no despreciable.

213 2.1.3. Ventajas

214 Las ventajas del motor físico son:

- 215 – Código abierto: mayor conocimiento sobre las fórmulas y métodos implementados en el motor.
- 216 – Soporte de la comunidad científica.
- 217 – Licencia libre.

218 2.1.4. Desventajas

219 Como toda herramienta, *Bullet* tiene aspectos negativos, entre los que se encuentran:

- 220 – Documentación poco clara y desordenada.
- 221 – Debido a que la física se aproxima usando métodos numéricos que contienen error, las simu-
 222 laciones son no determinísticas.

- 223 – Utilizar una librería gráfica como *OpenGL* acoplada a una simulación de *Bullet*, puede pro-
224 ducir resultados distintos, que si se usa un programa de visualización externo como OVITO.

225 **2.2. Librería de algoritmos genéticos**

226 Se utilizó la conocida librería de algoritmos genéticos para C++ GaLib, desarrollada por
227 Matthew Wall del MIT [9].
228 Ofrece funcionalidades como: programación paralela, diversos métodos de selección (*elite*, *rou-
229 lette*), estrategias de reemplazo (de padres, aleatorio, del peor), entre otras.
230 Cabe aclarar que, antes de optar por GaLib, se había adoptado la librería de algoritmos genéticos
231 de Mladen Jankovic, pero finalmente fue descartada, debido a errores o *bugs* en la misma (y que,
232 cada vez, resultaban ser más inmanejables).

233 **2.3. Código fuente**

234 Al estar *Bullet* implementado en C++, el código fuente también está desarrollado en ese
235 lenguaje. En *Bullet*, se define un *World* (o mundo físico) en donde se puede insertar, entre otras
236 cosas, cuerpos rígidos. En este caso en particular, el mundo consta de un plano (el suelo), y el
237 bípedo (compuesto por cuerpos rígidos y otros elementos físicos) ubicado sobre él.
238 El *software* creado incluye: construcción del humanoide, siendo éste capaz de desplazarse por
239 medio de actuadores (que se verán en la Sección 4); el desarrollo del algoritmo genético (definición
240 de los individuos, función de *fitness*, métodos de selección, etc.); visualización gráfica del mejor
241 humanoide logrado por el algoritmo genético; y la posibilidad de realizar gráficos referidos a la
242 evolución del algoritmo genético (*fitness* por cada generación, etc.).
243 Se acompañan a esta presentación: el código fuente y el manual de instalación y uso.

244 **3. Modelo utilizado**

245 Dentro de los diversos modelos existentes ([1][2]), en este trabajo se procuró utilizar uno que
246 fuera sencillo pero representativo a la vez.
247 Se modela al cuerpo del bípedo, con el motor *Bullet Physics*, como un conjunto de segmentos
248 unidos entre sí por articulaciones. A cada uno de ellos se les aplica un torque en el centro de
249 masa de cada segmento (denominado actuador). Que la caminata se produzca o no, depende
250 del tipo de actuador empleado (la función utilizada para el torque), y de sus parámetros. El
251 objetivo es encontrar dichos parámetros. Para eso se usan los algoritmos genéticos, un método
252 de inteligencia artificial. De este modo se obtiene, de forma análoga a la selección natural, los
253 individuos que mejor se adapten a la caminata. Tanto los actuadores como el algoritmo genético
254 se explicarán más adelante.

255 **3.1. Composición física del humanoide**

256 Como ya se expresó, el humanoide fue modelado en *Bullet* como un conjunto de segmentos
257 (cuerpos rígidos), unidos entre sí por articulaciones.
258 Sobre la base de la anatomía humana, se dividió el cuerpo del humano virtual en: cabeza, tronco,
259 miembro superior (brazo, antebrazo y mano), pelvis y miembro inferior (muslo, pierna y pie).
260 A los fines de este proyecto, sólo se consideraron pelvis y miembro inferior (Fig. 6).

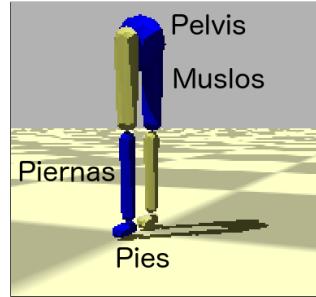


Figura 6: Segmentos del humanoide

²⁶¹ En la Tabla 2 se presenta la composición física de cada uno de los segmentos del humano virtual,
²⁶² de acuerdo a la biomecánica [10].

Segmento		Cantidad	Forma	Largo (en m)	Masa (en kg)	Uniones
Miembro inferior	Pelvis	1	Esférica	0.08655	9.9718	Cadera
	Muslo	2	Esfero-cilíndrica	0.4015	10.3368	Cadera y Rodilla
	Pierna	2	Esfero-cilíndrica	0.4015	3.1609	Rodilla y Tobillo
	Pie	2	Esfero-cilíndrica	-	1.0001	Tobillo

Tabla 2: Composición física de cada segmento del humanoide

3.2. Articulaciones

²⁶³ Para unir los distintos segmentos entre sí, se utilizaron articulaciones bisagra con 1 grado de libertad, en el eje X, para que los segmentos puedan moverse en dos ejes: el Z, donde ocurre la caminata, y el Y, perpendicular al piso (Fig. 7(a) y (b)).

²⁶⁴ A su vez, para cada caso en particular, se definieron cotas para los ángulos que pueden existir entre los segmentos (ver Tabla 3). Esto es muy importante, no sólo porque se adecúa a datos biológicos, sino porque, de otro modo la caminata no podría lograrse: si los ángulos son demasiado altos, la caminata se produce girando las piernas por encima de la pelvis; si por el contrario, son demasiado bajos, las piernas van a estar muy rígidas, originando pocos pasos y muy cortos.

²⁶⁵ Asimismo, se le impide rotar a la pelvis, y se restringe la amplitud con la que puede moverse la cadera (de $-\frac{\pi}{4}$ a $\frac{\pi}{4}$). Esto se realiza porque, en caso contrario, el bípedo necesitaría un sistema de control para mantener el equilibrio, y eso excede el alcance de este trabajo.

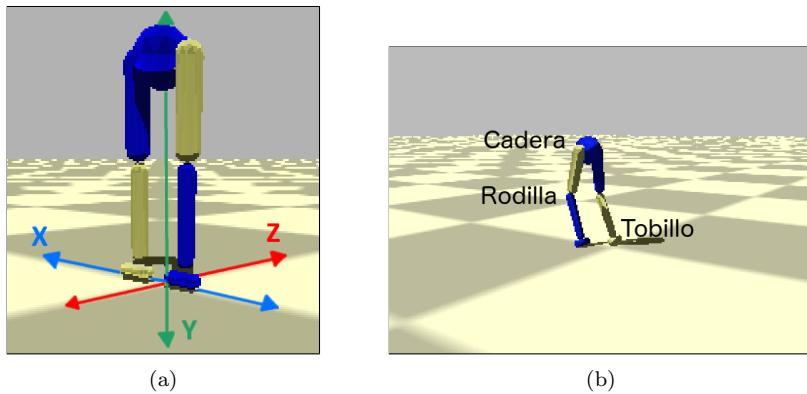


Figura 7: Humanoide diseñado: (a) ejes, y (b) articulaciones

		Ángulo mínimo	Ángulo máximo
Articulación	Cadera	$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
	Rodilla	$-\pi$	π
	Tobillo	0	0

Tabla 3: Rango de valores de ángulo de cada articulación del humanoide

275 4. Actuadores

276 A cada uno de los segmentos correspondientes al muslo y la pierna del bípedo, se le aplica
 277 un torque (o actuador) en el eje X (perpendicular a la trayectoria), como se ve en Fig 8. Así,
 278 pueden moverse para arriba o para abajo (con respecto a la articulación a la que pertenecen).
 279 A fin de simplificar el modelo, el humanoide tiene el mismo tipo de actuador utilizado en todos
 280 los segmentos.

281 Es necesario aclarar que la caminata producida por el humanoide es plana (en 2D). Esto se debe
 282 a que la trayectoria pensada para el bípedo es una línea recta, y logrando que los segmentos se
 283 muevan en un solo eje es suficiente para cumplir con dicha trayectoria. También contribuye el
 284 hecho de que el torque se aplique en una sola dimensión. Por otra parte, los actuadores definidos
 285 a continuación son periódicos, y por eso no se pueden aplicar en el eje Z de los segmentos (se ne-
 286 cesitarían actuadores reactivos, para poder detectar cuando el humanoide se está cayendo, etc.).
 287 Para indicar el módulo de dicho torque, se diseñaron diferentes funciones (todas ellas periódicas),
 288 mencionadas en las subsecciones que siguen.

289

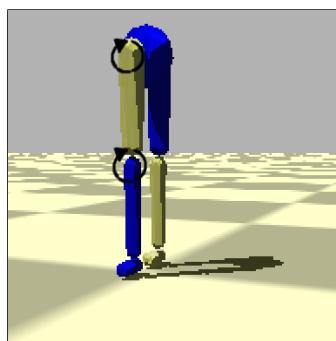


Figura 8: Aplicación de los actuadores en los segmentos del bípedo

290 4.1. Genérico

291 Es el actuador más sencillo, tanto matemática como computacionalmente.

$$f(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \phi) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi) + C \quad (7)$$

292 donde $f(t)$ es la función del actuador evaluada en el instante de tiempo t , A_1 y A_2 son amplitudes,
 293 ω_1 y ω_2 son frecuencias (en $\frac{1}{s}$), ϕ es la fase en radianes, y C es un término independiente (ver
 294 Fig. 9 (a) y (b)).

295 La fase ϕ es la misma en el seno y en el coseno, para evitar que se formen otro tipo de funciones
 296 no cíclicas.

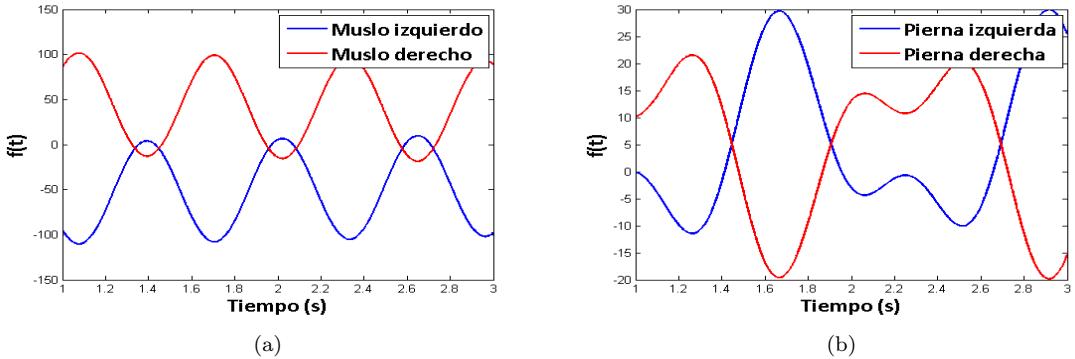


Figura 9: Ejemplo de actuador genérico aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

297 4.2. Coseno doble frecuencia

298 Basada en [3], esta función periódica utiliza medio ciclo de una función sinusoidal, y medio
 299 ciclo de otra (ambas pueden tener frecuencias distintas). Esto podría tener sentido porque en una
 300 caminata, un miembro inferior primero avanza hacia adelante y luego se extiende hacia atrás, y
 301 es razonable que esos dos movimientos se produzcan a frecuencias distintas (Fig. 10 (a) y (b)).
 302 La idea es lograr una función periódica a partir de una que no lo es (ya que t es lineal). Para eso,
 303 se utiliza la función $\psi(t)$ (ec. (8)) que aplica una transformación a los números reales, para que
 304 se encuentren dentro del rango del ciclo completo (con las dos frecuencias). ω es la frecuencia de
 305 $f(t)$ en $\frac{1}{s}$ (ec. (10)), que utiliza medio ciclo con frecuencia ω_1 y medio ciclo con frecuencia ω_2 .

$$\psi(t) = t + \phi - \left\lfloor \frac{t + \phi}{\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2} \right\rfloor (\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2) \quad \psi : \mathbb{R} \rightarrow \left[0, \frac{2\pi}{\omega} \right] \quad (8)$$

306

307

$$\omega = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (9)$$

308

309

$$f(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_1 \psi(t)) + C & \text{si } \omega_1 \psi(t) < \pi \\ A \cos(\omega_2(\psi(t) - (\pi/\omega_1) + (\pi/\omega_2))) + C & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

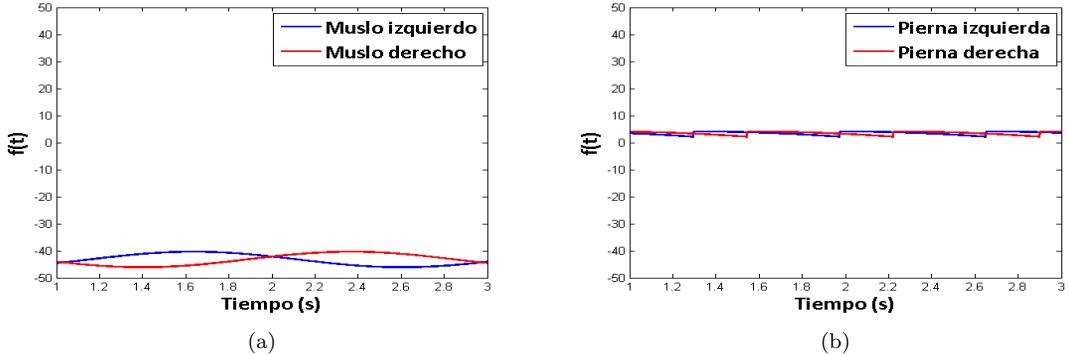


Figura 10: Ejemplo de actuador coseno doble frecuencia aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

310 4.3. Fourier de orden 2

311 Este actuador utiliza una serie de Fourier de dos términos. Dado que origina un resultado
 312 que, si bien es periódico, puede no ser de naturaleza sinusoidal, lo cual puede ser beneficioso para
 313 realizar otro tipo de movimientos.

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi) + B_1 \cos(\omega t + \phi) + A_2 \sin(2\omega t + \phi) + B_2 \cos(2\omega t + \phi) + C \quad (11)$$

314 donde A_1, A_2, B_1 y B_2 son amplitudes (ver Fig. 11 (a) y (b)).

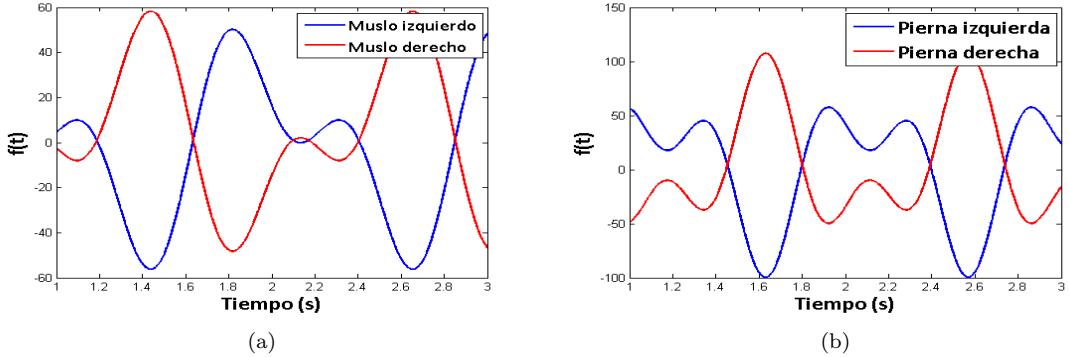


Figura 11: Ejemplo de actuador fourier de orden 2 aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

315 4.4. Fourier de orden 9

316 Es una extensión del actuador anterior, pero con 9 términos. Por ser de mayor grado, brinda
 317 una mayor precisión. Sin embargo, es más difícil de manejar computacionalmente; y, además, que
 318 sea más preciso no garantiza que con él se pueda lograr una buena caminata (ver Fig. 12 (a) y (b)).

$$\begin{aligned} f(t) = & A_1 \sin(\omega t + \phi) + B_1 \cos(\omega t + \phi) + A_2 \sin(2\omega t + \phi) + B_2 \cos(2\omega t + \phi) \\ & + A_3 \sin(3\omega t + \phi) + B_3 \cos(3\omega t + \phi) + A_4 \sin(4\omega t + \phi) + B_4 \cos(4\omega t + \phi) \\ & + A_5 \sin(5\omega t + \phi) + B_5 \cos(5\omega t + \phi) + A_6 \sin(6\omega t + \phi) + B_6 \cos(6\omega t + \phi) \\ & + A_7 \sin(7\omega t + \phi) + B_7 \cos(7\omega t + \phi) + A_8 \sin(8\omega t + \phi) + B_8 \cos(8\omega t + \phi) \\ & + A_9 \sin(9\omega t + \phi) + B_9 \cos(9\omega t + \phi) + C \end{aligned} \quad (12)$$

320 donde A_i y B_i con $1 \leq i \leq 9$ son amplitudes.

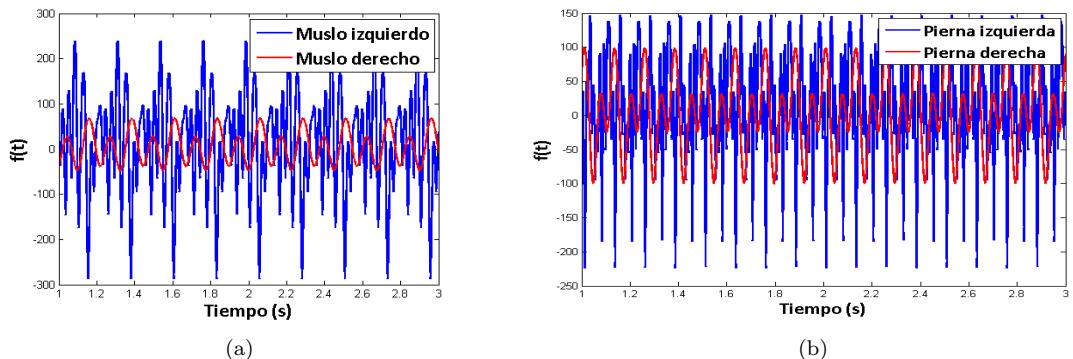


Figura 12: Ejemplo de actuador fourier de orden 9 aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

321 5. Condiciones iniciales y de contorno

322 Como las funciones periódicas señaladas en los actuadores, no fueron suficientes para lograr
 323 la caminata, se le adosaron las funciones que se detallan seguidamente.

324 5.1. Función partida

325 La caminata se divide en dos partes bien definidas:
 326 La primera denominada función partida, es opcional y representa el primer paso dado por el
 327 bípedo. En ella, el humanoide comienza con una posición (las dos extremidades bien extendidas)
 328 diferente a la que tendrá en el resto de la caminata. Se aplican actuadores genéricos en cada uno
 329 de los cuatro segmentos móviles (muslos y piernas). Para simplificar el modelo, se decidió que
 330 esta etapa durara 0.7 segundos. Dicho valor fue extraído de forma experimental.
 331 La segunda es el resto de la caminata, y debe ser cíclica y periódica (para poder eventualmente
 332 repetirse *ad infinitum*). Aquí se puede utilizar cualquiera de los actuadores vistos en la sección
 333 anterior, pero solo un tipo de ellos es aplicado a los segmentos.

334

335 5.2. Fase sincronizada

336 En una caminata, las piernas deben guardar simetría: mientras una va hacia adelante, la otra
 337 va hacia atrás (y viceversa). Esto, de acuerdo con los actuadores definidos en la sección ante-
 338 rior, implica que las funciones de movimiento de cada pierna estén desfasadas en medio ciclo ($\frac{\pi}{2}$):
 339

$$340 \quad f_i(t) = f(t) \quad (13)$$

$$f_d(t) = f(t + \frac{\pi}{2}) \quad (14)$$

341
 342 siendo $f(t)$ la función de movimiento (o actuador) en el momento t , y f_i y f_d las funciones de la
 343 pierna izquierda y derecha, respectivamente.

344

345 6. Algoritmo genético

346 Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos, que pueden ser utilizados para resolver
 347 problemas de búsqueda y optimización. Están inspirados en la teoría darwiniana de la selección
 348 natural. La entidad a optimizar constituye un individuo dentro de una población; que puede
 349 ser cruzado con otros individuos para obtener un “hijo”, que presenta características de sus
 350 “padres”. A través de una función de *fitness* se decide cuáles de ellos son los más “aptos”, que
 351 luego pasarán a una nueva generación de individuos. Este proceso se repite hasta obtener un
 352 individuo lo suficientemente apto, que representa a la entidad optimizada.
 353 El objetivo de este proyecto es optimizar la caminata del humanoide. Ergo, en el algoritmo
 354 genético aplicado, el individuo está definido por rasgos del bípedo, y la función de *fitness* se
 355 focaliza en mejorar diversos aspectos de dicha caminata.

356 6.1. Individuo

357 La información genética de cada individuo, está definida a partir de un vector que contiene de
 358 forma contigua, los parámetros de la función partida (optativa) y los asociados a los actuadores
 359 (obligatorios), que actúan sobre cada uno de los segmentos (muslos y piernas) del humanoide virtual.
 360

361 6.1.1. Parámetros

362 Tanto la función partida como los actuadores tienen como parámetros: amplitud (A o B);
 363 frecuencia (ω); fase (ϕ), que indica dónde comienza el paso y se mide en radianes; y término
 364 independiente (C).

365 La Fig. 13 muestra la estructura del individuo y su composición para un humanoide con función
 366 partida y actuador genérico.

367

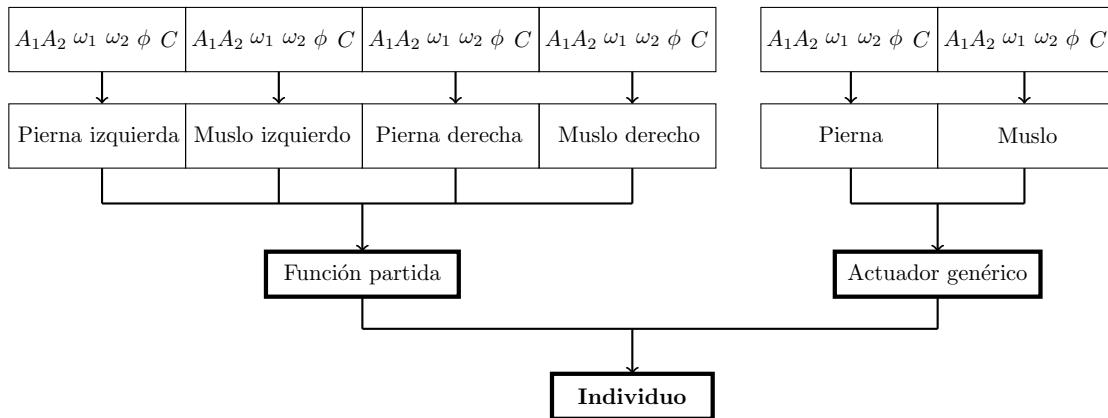


Figura 13: Esquema de un individuo (Ejemplo con actuador genérico)

368 6.1.2. Valores

369 Cada uno de los segmentos tiene una composición física distinta (largo, masa, etc.), razón por
 370 la cual no necesariamente sus genes deban tener los mismos rangos de valores, tal como puede
 371 apreciarse en las Tablas 5 y 4.

372

Segmento	Tipo de gen	Mínimo	Máximo
Muslo	Amplitud	-30	30
Pierna	Amplitud	-60	60
Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10

Tabla 4: Rango de valores que puede tomar cada gen, para la función partida

Actuador	Segmento	Tipo de gen	Mínimo	Máximo
Genérico	Muslo	Amplitud	-30	30
	Pierna	Amplitud	-60	60
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Coseno doble frecuencia	Muslo	Amplitud	-50	50
	Pierna	Amplitud	-30	30
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	5
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-30	30
Fourier de orden 2	Muslo	Amplitud	-60	60
	Pierna	Amplitud	-30	30
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Fourier de orden 9	Muslo y Pierna	Amplitud	-60	60
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.1	2
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	π
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10

Tabla 5: Rango de valores que puede tomar cada gen, según el tipo de actuador

373 6.1.3. Implementación de individuos

374 Para favorecer el análisis de las distintas características arriba indicadas, se implementaron
 375 varios individuos, cada uno de ellos con propiedades distintas (Tabla 6).

376

	Individuo				
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Actuador	Genérico	Genérico	Coseno doble frecuencia	Fourier de orden 2	Fourier de orden 9
Función partida	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Fase sincronizada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 6: Tipo de individuos

377 6.1.4. Constitución del cromosoma

378 Los distintos actuadores y la función partida tienen los parámetros presentados en la sección
 379 6.1.1. Sus respectivas cantidades pueden verse en la Tabla 7.

380 En la Tabla 8 se muestra la composición del cromosoma de cada individuo, que depende de los
 381 actuadores y la función partida usados. En ella se puede observar cómo según el tipo de individuo,
 382 varía la cantidad de genes, es decir, la longitud del cromosoma. Vale aclarar que la función
 383 partida se especifica para cada segmento (los dos muslos y las dos piernas); en cambio, para los

³⁸⁴ actuadores, sólo se definen dos (uno para los muslos y otro para las piernas).

³⁸⁵

		Parámetro			
		Amplitud	Frecuencia	Fase	Término independiente
Actuador	Genérico	2	2	1	1
	Coseno doble frecuencia	1	2	1	1
	Fourier de orden 2	4	1	1	1
	Fourier de orden 9	18	1	1	1
	Función partida	2	2	1	1

Tabla 7: Cantidad de parámetros según tipo de actuador y función partida

Parámetro	Individuo				
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Amplitud	4	12	8	16	44
Frecuencia	2	6	8	6	6
Fase	2	6	6	6	6
Término independiente	2	6	6	6	6
Totales	10	30	28	34	62

Tabla 8: Cantidad de parámetros según tipo de individuos

6.2. Fitness

³⁸⁷ El papel de la función de *fitness* (F) en un algoritmo genético es evaluar qué tan bueno es un
³⁸⁸ individuo. En este caso, está definida como un producto de cinco módulos o propiedades: altura
³⁸⁹ (H), velocidad (V), dirección (D), simetría (S) y pies abajo (PA):

$$F = H \cdot V \cdot D \cdot S \cdot PA \quad (15)$$

³⁹⁰ Los cinco tienen la misma importancia y por eso, como se verá a continuación, están definidos de
³⁹¹ forma similar (con una función exponencial y pueden valer entre 0 y 1). Con todo esto, dado que
³⁹² el *fitness* está pensado como un producto, basta con que uno de los módulos sea muy chico para
³⁹³ “anular” al individuo (es decir, otorgarle un valor que tiende a cero). Sin embargo, los diferentes
³⁹⁴ módulos no son completamente independientes entre sí: por ejemplo, si la altura es demasiado
³⁹⁵ baja, posiblemente la velocidad y la dirección no sean adecuadas.

6.2.1. Altura

³⁹⁷ Es un factor relacionado con la altura del individuo en toda la simulación, y se expresa:

$$H = \frac{\sum_{n=0}^T e^{-C(h_{t_n} - h_{t_0})^2}}{N} \quad (16)$$

³⁹⁹
⁴⁰⁰ donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final, h_{t_n} es la altura de la pelvis en el instante de
⁴⁰¹ tiempo t_n , N la cantidad pasos de simulación y C una constante $C = 5$.

402 Se calcula a partir de la diferencia entre la altura en cada instante de la simulación, con su altura
 403 inicial (la altura está definida como la posición de la pelvis en el eje Z). Cuanto mayor sea esa
 404 diferencia, más rápido el individuo cae, y por eso este módulo tiende a cero. Por el contrario,
 405 valdrá uno si la diferencia es ínfima (lo que significa que el humanoide mantiene su misma altura
 406 durante la caminata).

407 **6.2.2. Velocidad**

408 Indica qué tan cercana es la velocidad del individuo con respecto a una velocidad objetivo
 409 (en este caso, es de 1.2 m/h), y se expresa de la siguiente forma:

410

$$V = \frac{\sum_{n=0}^T e^{-C(v_{t_n} - V_O)^2}}{N} \quad (17)$$

411 donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final, v_{t_n} es la velocidad de la pelvis en el instante de
 412 tiempo t_n , y V_O la velocidad objetivo en el eje Z (el eje de la caminata).
 413 Sigue una lógica y cálculo similares al factor de altura: a mayor discrepancia de la velocidad
 414 real del humanoide con V_O , menor (y más cercano a cero) es el valor arrojado por el módulo de
 415 velocidad.
 416

417 **6.2.3. Dirección**

418 Señala qué tan similares son la dirección objetivo (un vector unitario, que en este caso se
 419 encuentra en el eje Z) y la dirección con la que camine el humanoide. Se calcula como sigue:

$$D = \frac{\sum_{n=0}^T e^{-C(\mathbf{v}_{t_n} \cdot \mathbf{v}_O - 1)^2}}{N} \quad (18)$$

420 donde t_0 es el tiempo inicial, t_T el tiempo final, \mathbf{v}_{t_n} el versor de la dirección del humanoide en
 421 el momento t_n y \mathbf{v}_O el versor de la dirección objetivo.
 422 El producto escalar entre los versores responde a la Similitud Coseno: $\cos \theta = \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{AB}$, donde \mathbf{A} y
 423 \mathbf{B} son vectores que no se encuentran normalizados, y θ es el ángulo formado entre ellos. Así, si
 424 $\cos \theta = 1$, significa que los vectores están paralelos entre sí (que es el efecto buscado en el caso
 425 de la dirección).
 426 Al producto escalar se le resta 1, para que el módulo sea consistente con la función exponencial
 427 utilizada y que valga 1 cuando $\theta = 0$, y 0 cuando $\theta = \pi$. Cabe aclarar que se trata al ángulo en
 428 forma simétrica, ya que, por ejemplo $\cos(-\pi/6) = \cos(\pi/6)$.

429 **6.2.4. Simetría**

430 Este indicador marca qué tan equidistantes se encuentran los pies de la cadera, a lo largo de la
 431 caminata. Aplicando solamente los módulos antes mencionados, provocaba resultados en donde
 432 una pierna quedaba más distante de la pelvis que la otra, lo que producía que el humanoide se
 433 terminara arrastrando, posiblemente afectando a la velocidad.
 434 Para mayor simplicidad, la simetría S se calculó a partir de los pies (y no de las piernas). Se
 435 tomaron en cuenta sólo los ejes X y Z, porque son los relacionados a la velocidad y a la dirección,
 436 respectivamente.

$$S = \frac{\sum_{n=0}^T \frac{1}{2}[e^{-C(|lf_z + rf_z|^2)} + e^{-C(|lf_x + rf_x|^2)}]}{N} \quad (19)$$

437

438 donde lf_x y lf_z es la distancia desde el pie izquierdo hasta la pelvis en los ejes X y Z, respecti-
439 vamente; y en donde rf_x y rf_z es lo mismo, pero para el pie derecho.

440 6.2.5. Pies abajo

441 Con los módulos señalados anteriormente, se busca que el humanoide camine con una velo-
442 cidad y dirección determinadas, que no se caiga y que mantenga simetría mientras ejecuta sus
443 movimientos. Pero, todo esto daría, en el mejor de los casos, una caminata estilo “estrella”.

444 Sin embargo, una característica fundamental en una caminata normal es que las piernas (ergo,
445 los pies también) no sobrepasen la cadera. Si bien ésta es una propiedad negativa (expresa lo que
446 no debe tener una caminata), y se puede correr el riesgo de restringir demasiado, su ausencia da
447 resultados peores.

$$PA = \frac{\sum_{n=0}^T \frac{1}{2}(\alpha[e^{-C(lf^2)} + e^{-C(rf^2)}])}{N} \quad (20)$$

448

449 donde ldf y rdf son las diferencias entre la posición inicial de los pies y la altura en el momento
450 t_n de los pies izquierdo y derecho, respectivamente, y $\alpha = \max(\min(lf, rf) - hip, 0), 1$, siendo
451 lf , rf y hip las alturas del pie izquierdo, pie derecho, y la cadera (es decir, vale 0 si la altura del
452 pie izquierdo o derecho supera a la de la cadera, y 1 en otro caso).

453

454 6.3. Operadores del algoritmo

455 Permiten controlar en detalle el proceso de optimización. En particular, se busca un balance
456 entre la diversidad de los individuos, el aumento del *fitness* a lo largo del algoritmo, y evitar la
457 convergencia hacia una población sobre la cual no se puede seguir mejorando.

458 6.3.1. Métodos de selección

459 De la vasta cantidad de métodos de selección que existen se utilizó **Roulette**, método es-
460 tocástico que selecciona un individuo de la población total al azar, con una probabilidad propor-
461 cional a su *fitness*.

462 Para no perder la mejor solución encontrada en cada generación, se activó el **Elitism**, técnica
463 en la cual el individuo con mayor *fitness* permanece intacto en la siguiente generación.

464 6.3.2. Métodos de crusa

465 El método de crusa (o *crossover*) utilizado es el siguiente: De dos individuos (los padres), se
466 originan dos nuevos individuos (los hijos). Se toma cada uno de los genes de los padres y se elige,
467 con una probabilidad uniforme, uno de ellos para un hijo y el otro para el otro hijo.

468 La probabilidad de que este proceso ocurra es de 0.9.

469 6.3.3. Mutación

470 En el caso de la mutación, para cada gen del individuo, se decide con cierta probabilidad si
471 se lo muta o no. En caso afirmativo, se cambia ese gen por un valor aleatorio (que esté dentro
472 de su rango definido).

473 Dicha probabilidad de mutación es de 0.3.

474 **6.3.4. Otras características**

475 En el algoritmo genético se utilizan 1000 generaciones, de 50 individuos cada una. Además,
476 la simulación de cada individuo (necesaria para calcular el *fitness*) es de 4 segundos.

477 **7. Resultados obtenidos**

478 En la Fig. 14 se representan los individuos definidos con sus características.

479

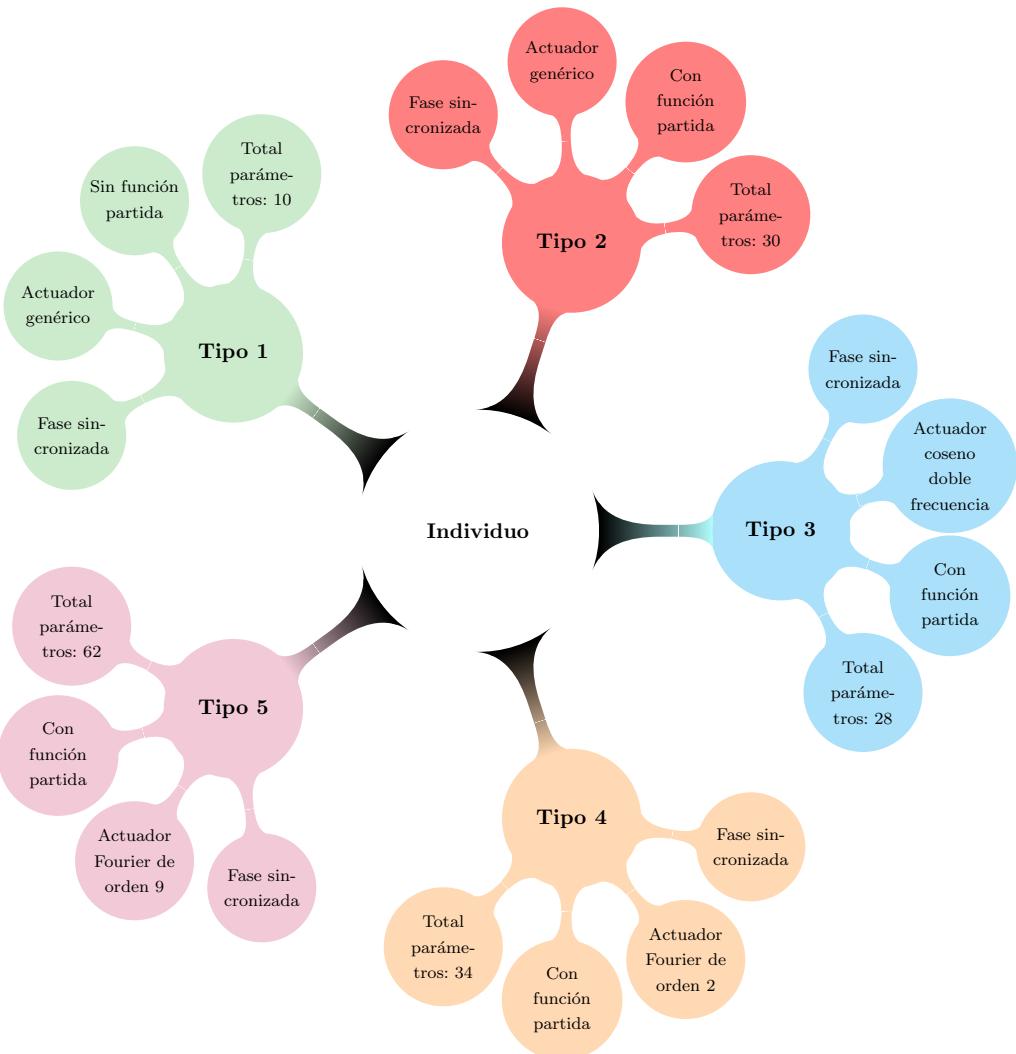


Figura 14: Individuos definidos en el algoritmo genético

480 Sobre ellos se realizaron pruebas, corriendo el algoritmo genético, y evaluando el resultado
481 alcanzado posteriormente (ya sea numérica o gráficamente).
482 A continuación se analizan distintos aspectos relevantes. Vale aclarar que, en el caso de la altura
483 y la velocidad, se muestran los resultados de los mejores caminantes de cada tipo; y en el caso
484 del fitness, los resultados de corridas típicas del algoritmo genético para cada tipo.

485 7.1. Evolución del *fitness* promedio según tipo de individuos

486 En la Fig. 15 se muestra el *fitness* promedio por generación, producido por corridas típicas
 487 del algoritmo genético, según los tipos de individuo definidos. Si bien los resultados no son
 488 concluyentes, sí vale la pena decir que los individuos con actuador genérico (tipo 1 y 2) y coseno
 489 doble frecuencia (tipo 3), logran alcanzar un *fitness* más alto que el resto.
 490 Por otra parte, puede notarse que los rangos manejados casi alcanzan el 0.7 (y no a 1, su cota
 491 superior). Esto se debe a que la función de *fitness* está definida como un producto de ciertos
 492 módulos: suponiendo que cada uno de ellos estuviera al 92 %, se tendría $0.92^5 = 0.659$.

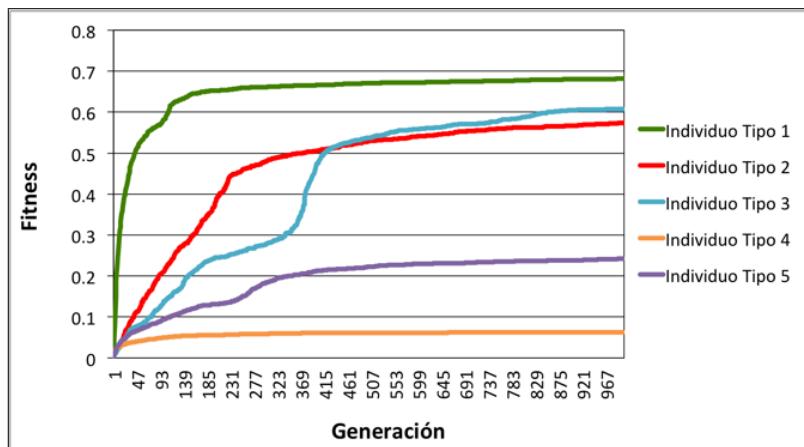


Figura 15: Evolución del *fitness* promedio según tipo de individuos

493 7.2. Velocidad según tipo de individuos

494 Seguidamente, se muestra para cada tipo de individuo, su velocidad instantánea de la pelvis
 495 a lo largo del tiempo.

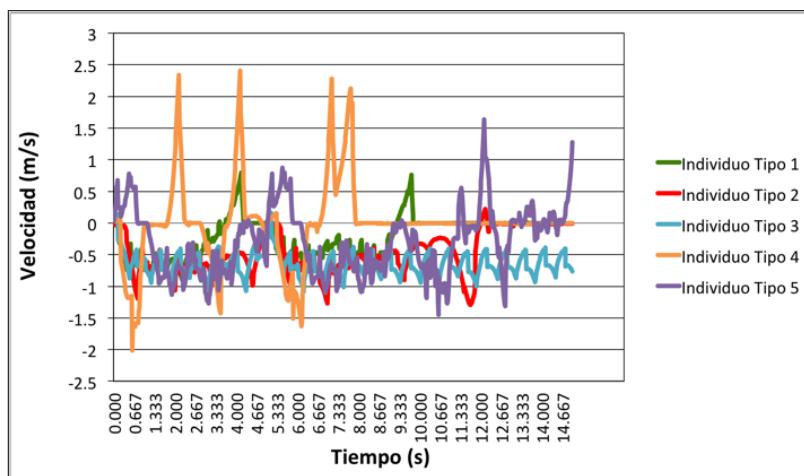


Figura 16: Velocidad instantánea según tipo de individuos

496 Como puede observarse en el caso de los individuos 4 y 5 (Fourier de orden 2 y 9, respectivamente),
 497 se producen picos altos y pronunciados en la velocidad. Eso repercute en que la velocidad media no
 498 sea $1.3 \frac{m}{s}$ (que es la velocidad objetivo), y ergo, en el módulo de velocidad del *fitness* (provocando
 499 que éste sea más bajo).

- 500 En el individuo de tipo 1, también se producen picos un poco menos pronunciados, pero luego
 501 de los 10 segundos, no se registra ninguna velocidad. Eso sucede porque el humanoide queda
 502 suspendido cuando intenta caer hacia atrás.
 503 La velocidad del individuo de tipo 2 oscila de forma irregular, pero no tiene picos muy elevados.
 504 Por último, en el individuo de tipo 3, la velocidad oscila de forma cíclica, continuada y armoniosa
 505 (no hay picos altos).

506 7.3. Altura según tipo de individuos

507 Como puede identificarse en la Figura 17, la altura de los individuos es otra característica
 508 para diferenciarlos en su rendimiento.

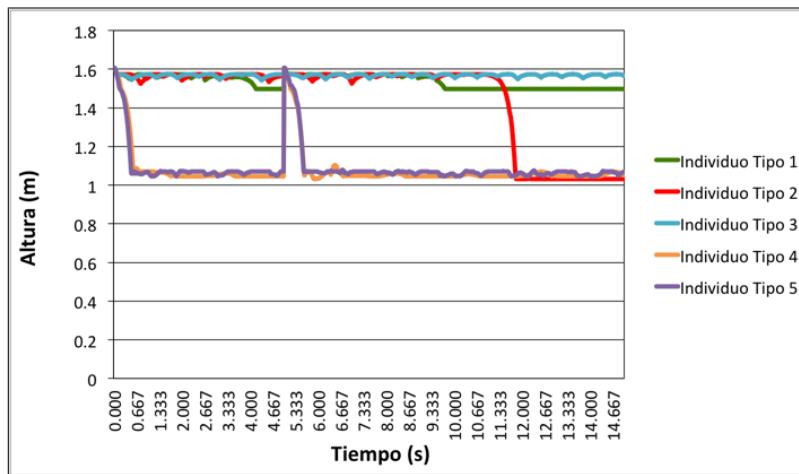


Figura 17: Altura (posición de la pelvis) según tipo de individuos

- 509 En efecto, los individuos de tipo 4 y 5 (que utilizan actuadores de Fourier de orden 2 y 9,
 510 respectivamente), son los que caen de forma más abrupta, y aunque intentan levantarse, vuelven
 511 a caer con la misma intensidad.
 512 A su vez, el individuo de tipo 1 (actuador genérico sin función partida) mantiene su altura, hasta
 513 que a los 10 segundos queda suspendido a una altura levemente menor. Esto ocurre porque se
 514 cae para atrás, y las limitaciones de la cadera impiden que caiga. El individuo de tipo 2, con
 515 actuador genérico y función partida, logra mantener la altura, hasta que cae hacia adelante, en
 516 cuclillas. Considerando que cuando cae no vuelve a levantarse (ya que en ese movimiento suelen
 517 emplearse los brazos y manos), tiene un comportamiento similar a una caminata real.
 518 En lo que respecta al individuo de tipo 3, que utiliza como actuador la función coseno doble
 519 frecuencia, mantiene su altura de forma constante, pero con oscilaciones leves y continuadas en
 520 el tiempo. De los cinco, es el que da mayor cantidad de pasos.

521 7.4. Comparación de tipo de individuos

- 522 Según lo visto, queda claro que los actuadores de Fourier no dieron buenos resultados.
 523 Asimismo, es necesario incluir la función partida (es decir, separar a la caminata en un “primer
 524 paso”, y el ciclo), ya que si bien su ausencia puede originar *fitness* más altos, genera inestabilidad
 525 a los pocos segundos (como en el individuo de tipo 1).
 526 El individuo de tipo 3 logra un movimiento cíclico y repetitivo, que deriva en una caminata *ad infinitum*, con el costo de que sea “robótica” (muy parecida a lo observado con un *passive walker*).
 527

528 **7.5. Video**

529 De los cinco individuos presentados, los que mejor pudieron realizar la caminata fueron tres,
530 a saber: tipo 1 y 2 (genérico con y sin función partida), y tipo 3 (coseno doble frecuencia).

531 Para poder visualizar mejor su comportamiento, se acompañan los videos.

532 Individuo Tipo 1: <https://www.youtube.com/watch?v=J6j8UN1bg3w>

533 Individuo Tipo 2: <https://www.youtube.com/watch?v=t7jtbVL7eyY>

534 Individuo Tipo 3: <https://www.youtube.com/watch?v=z9QRa7wH1QI>

535

536 **8. Conclusiones**

537 El objetivo principal de este proyecto fue lograr producir la simulación y animación biomecánica de la caminata de un humano virtual. Para eso, se eligió el motor físico *Bullet Physics*,
538 lo que requirió no solo aprender sobre su funcionamiento y los métodos físicos implementados,
539 sino también realizar pruebas para verificar qué tan próximos eran el modelo fisico-matemático
540 ideado y el utilizado por Bullet.

541 Una vez modelado el humanoide, se implementaron individuos con diferentes características (en
542 especial, actuadores), para facilitar la comparación. En la sección 7 se verifica que las funciones
543 utilizadas en los actuadores son decisivas para lograr una caminata.

544 Los actuadores que mejores resultados dieron, fueron aquellos en donde se empleaba dos frecuencias ω en vez de una.

545 Se comprobó que los individuos con actuadores genérico y coseno doble frecuencia son los que
546 mejor caminan, manteniendo su altura por más tiempo y con *fitness* más alto. Sin embargo, son
547 caminatas muy distintas: la del primero resulta ser más natural, pero se cae más rápido; mientras
548 que la del segundo es más “robótica” (ya que parece un *passive walker*), pero más estable (no se
549 cae ni se queda quieto).

550 Si hay que elegir como mejor a uno de los dos, habría que decidir entre realismo (el humanoide
551 se cae, pero es más natural), y estabilidad (no se cae, pero parece un *passive walker*).

552 La función de fitness que se plantea (con sus módulos) indica propiedades ideales para una caminata,
553 pero que no implican realismo en la misma. Y entonces dos individuos con *fitness* parecidos
554 dieron como fruto caminatas muy distintas.

555 Por otra parte, el haber seguido la línea de investigación de los cuadrúpedos, si bien logró una
556 caminata, no fue suficiente. Un sistema de control para manejar el equilibrio sería necesario.

557 Entre los trabajos a futuro para integrar a este proyecto, se encuentran lograr que la caminata
558 se produzca en 3 dimensiones; y analizar el comportamiento de varios humanoides chocando e
559 interactuando entre sí.

560 Se puede concluir que, la caminata de una persona, algo que parece simple y sencillo, muestra
561 su verdadera complejidad cuando debe ser simulada por medio de actuadores aplicados a un
562 conjunto de segmentos interconectados.

563 **Referencias**

- 564 [1] Marek Wojtyra, *Multibody Simulation Model of Human Walking - Warsaw University of*
565 *Technology, 2003*

- 568 [2] Thomas Geijtenbeek, Michiel van de Panne y A. Frank van der Stappen, *Flexible Muscle-*
569 *Based Locomotion for Bipedal Creatures, 2013*
- 570 [3] Kevin Kenny, Máximo Videla y Axel Wassingon, *Proyecto Final para la obtención del título*
571 *Ingeniero en Informática: Simulación y animación de un cuadrúpedo virtual - ITBA, 2014*
- 572 [4] Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Physics_engine
- 573 [5] Andreas Gerndt y otros, *An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual*
574 *Reality Assembly Simulations. Fecha de publicación: 2012*
- 575 [6] Tom Erez y otros, *Simulation Tools for Model-Based Robotics: Comparison of Bullet, Havok,*
576 *MuJoCo, ODE and PhysX*
- 577 [7] Sitio web de Bullet Physics: <http://www.bulletphysics.org/>
- 578 [8] Erin Catto, *Iterative Dynamic with Temporal Coherence. Fecha de publicación: 2005*
- 579 [9] Sitio web de GaLib: <http://lancet.mit.edu/ga/>
- 580 [10] <http://www.exrx.net/Kinesiology/Segments.html>

581 **Agradecimientos**

582 A la Dra. Silvia Alicia Gómez, directora de la carrera de Ingeniería Informática, por su apoyo
583 incondicional durante todos estos años. Asimismo, a todos los docentes que tuvimos a lo largo de
584 la carrera, por la calidad y excelencia académica recibidas, que nos permitió realizar un proyecto
585 final que integra los conocimientos y capacidades adquiridos. Y muy especialmente a nuestro
586 tutor Dr. Daniel Ricardo Parisi, a quien también le agradecemos su valiosa colaboración y su
587 experta ayuda en la preparación de este proyecto.