

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](mailto:ealtamir@itba.edu.ar)

10

**Teresa Fontanella De Santis**

11

[tfontane@itba.edu.ar](mailto:tfontane@itba.edu.ar)

12

**Tomás Mehdi**

13

[tmehd@itba.edu.ar](mailto:tmehd@itba.edu.ar)

14

**Tutor:**

15

**Dr. Daniel Ricardo Parisi**

16

**Instituto Tecnológico de Buenos Aires - ITBA**

17

**Departamento de Ingeniería Informática**

18

**Abril 2016**

# Índice

19

20	<b>Resumen</b>	4
21	<b>1 Introducción</b>	4
22	<b>2 Herramientas</b>	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	<b>3 Modelo utilizado</b>	12
33	3.1 Composición física del humanoide . . . . .	12
34	3.2 Articulaciones . . . . .	13
35	<b>4 Actuadores</b>	14
36	4.1 Genérico . . . . .	14
37	4.2 Fourier de orden 2 . . . . .	15
38	4.3 Fourier de orden 9 . . . . .	15
39	4.4 Coseno doble frecuencia . . . . .	16
40	<b>5 Condiciones iniciales y de contorno</b>	17
41	5.1 Función partida . . . . .	17
42	5.2 Fase sincronizada . . . . .	17
43	<b>6 Algoritmo genético</b>	17
44	6.1 Individuo . . . . .	17
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 . . . . .	20
52	6.2.3 Dirección . . . . .	21
53	6.2.4 Simetría . . . . .	21
54	6.2.5 Pies abajo . . . . .	21
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 . . . . .	22
60	<b>7 Resultados obtenidos</b>	<b>22</b>
61	7.1 Evolución del <i>fitness</i> según tipo de individuos . . . . .	22
62	7.2 Velocidad según tipo de individuos . . . . .	23
63	7.3 Altura según tipo de individuos . . . . .	24
64	7.4 Comparación de tipo de individuos . . . . .	24
65	7.5 Video . . . . .	24
66	<b>8 Conclusiones</b>	<b>25</b>
67	<b>Referencias</b>	<b>25</b>

68

## Resumen

69

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

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

## 77 1. Introducción

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

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

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

88 Este problema se puede abordar de diversas maneras, involucrando: redes neuronales<sup>1</sup>, sistemas  
89 de control<sup>2</sup> (*passive walkers*<sup>3</sup>)[1], algoritmos genéticos<sup>4</sup>[2], entre otras. Pero varios de ellos impli-  
90 can modelos teóricos complejos de humanoide (considerando músculos con distintos materiales,  
91 etc.).

92 En este proyecto se buscó aplicar algoritmos genéticos, y lograr la caminata usando un modelo  
93 de humanoide basado en un conjunto de segmentos (cuerpos rígidos), unidos entre sí por articu-  
94 laciones, cuyo desplazamiento depende de torques aplicados a dichos cuerpos, y sus parámetros  
95 se ajustan a partir de la evolución del algoritmo.

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

---

<sup>1</sup>Una 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.

<sup>2</sup>Un 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.

<sup>3</sup>Un *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).

<sup>4</sup>Los 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.

## <sup>100</sup> 2. Herramientas

### <sup>101</sup> 2.1. Motor físico

<sup>102</sup> Se llama motor físico o *physics engine* a un “*software* capaz de realizar simulaciones de  
<sup>103</sup> ciertos sistemas físicos, como la dinámica del cuerpo rígido, el movimiento de un fluido y la  
<sup>104</sup> elasticidad”[3].

<sup>105</sup> Actualmente, existen muchos motores físicos: ya sea de código propietario (*PhysX*, *Havok*), como  
<sup>106</sup> *open-source* (*Bullet Physics*, *Box2D*, *Newton*, *OGRE*). Considerando análisis relacionados [4][5],  
<sup>107</sup> y el hecho de que el espacio simulado fuese en 3D, se decidió que *Bullet Physics*[6] es el más  
<sup>108</sup> idóneo. Está implementado en C++ y ha sido utilizado en varios juegos (*Grand Theft Auto IV*  
<sup>109</sup> y *V*, etc); en los efectos especiales de películas (*Hancock*, *Bolt*, etc.); y proyectos científicos, como  
<sup>110</sup> la herramienta *open-source Tensegrity Robotics Toolkit* de la NASA<sup>5</sup>; entre otros.

<sup>111</sup> Si bien (como se verá más adelante) *Bullet* tiene problemas asociados con el coeficiente de restitu-  
<sup>112</sup> ción, posee una muy buena *performance* en la detección de colisiones, la dinámica y la resolución  
<sup>113</sup> de *constraints*. Esto se debe, en parte, a diferentes algoritmos iterativos de orden lineal (donde  
<sup>114</sup> el más importante es *Sequential Impulse*), de *caching* y también a la utilización de un modelo  
<sup>115</sup> de fricción de Coulomb aproximado [7]. Además, el motor físico brinda la posibilidad de regular  
<sup>116</sup> la precisión requerida en estos cálculos (sin olvidar que, con iguales recursos, a mayor preci-  
<sup>117</sup> sión, mayor capacidad de cómputo requerida y, ergo, mayor tiempo). Dado que la construcción  
<sup>118</sup> del humanoide implica definir características y restricciones de movimiento de cada uno de sus  
<sup>119</sup> segmentos, lo antes mencionado fue crucial para la elección de *Bullet Physics* en este proyecto.

#### <sup>120</sup> 2.1.1. Funcionamiento

<sup>121</sup> El motor físico se encarga de la simulación de cuerpos rígidos y la interacción entre los mismos.  
<sup>122</sup> En particular debe calcular el resultado de colisiones, arreglar el solapamiento de los cuerpos en  
<sup>123</sup> el espacio de simulación, estimar las fuerzas producidas debido a la fricción, y mantener el  
<sup>124</sup> cumplimiento de restricciones que puedan existir entre los cuerpos (por ejemplo, un vínculo para  
<sup>125</sup> formar una articulación). Para lograrlo, *Bullet* modela, a partir de un conjunto de ecuaciones,  
<sup>126</sup> las distintas restricciones que deben ser respetadas.

<sup>127</sup> Estos modelos reciben como dato la velocidad lineal y angular de cada objeto, y las fuerzas  
<sup>128</sup> que actúan sobre los mismos. Dada esta información, se resuelve el sistema de ecuaciones, cuya  
<sup>129</sup> solución representa las magnitudes de las fuerzas a accionar sobre el mismo, a fin de satisfacer  
<sup>130</sup> todas las restricciones. Para encontrar esta solución, entran en juego los distintos métodos de  
<sup>131</sup> complejidad lineal mencionados en la subsección anterior.

<sup>132</sup> Este procedimiento, se lleva a cabo en cada *timestep* de la simulación; donde un *timestep* es el  
<sup>133</sup> intervalo de tiempo que transcurre entre un cálculo de magnitudes y otro. Mientras menor sea  
<sup>134</sup> el *timestep*, el simulador será más preciso pero también consumirá más tiempo de cómputo.

#### <sup>135</sup> 2.1.2. Modelo de fricción y su verificación

<sup>136</sup> Hay reglas físicas relacionadas con el entorno y que son muy importantes para la caminata:  
<sup>137</sup> el modelo de fricción, con sus respectivos coeficientes de fricción y restitución.  
<sup>138</sup> En base a los modelos físico-matemáticos que representan a cada uno de los dos fenómenos en  
<sup>139</sup> cuestión (y que se explicarán a continuación), y pensando en posibles futuras simulaciones de

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

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

#### 142 2.1.2.1. Verificación del coeficiente de fricción

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

147

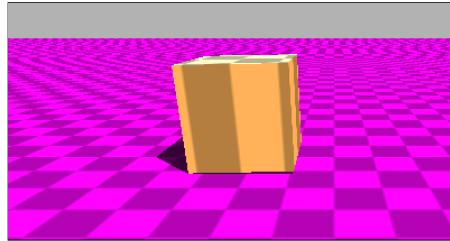


Figura 1: Visualización del sistema del cubo

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

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

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

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

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

156

157 Finalmente, se obtiene la aceleración:

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

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

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

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

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

<sup>6</sup>En 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)  $\mu_d = 0.75$

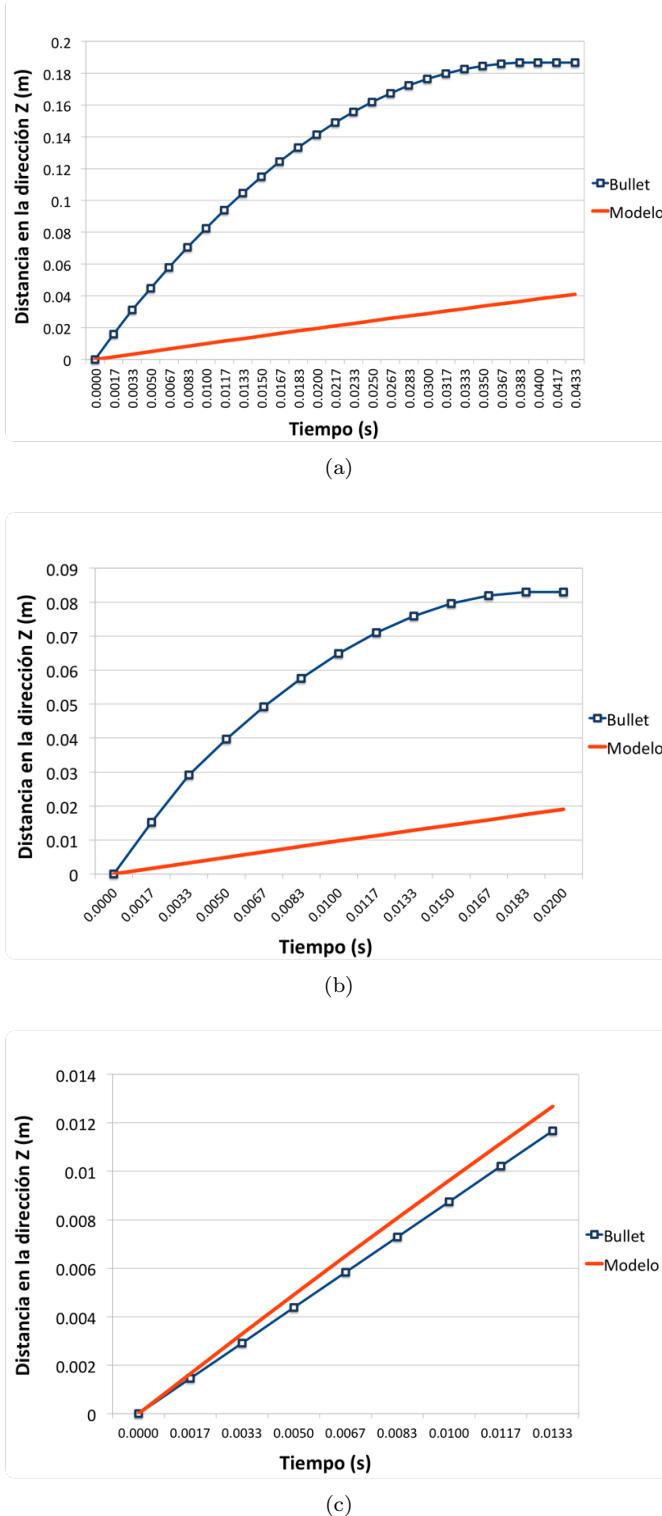


Figura 4: Resultados logrados de simular el sistema descripto en Fig. 1, usando  $v_i = 1 \frac{m}{s}$  y:

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

<sup>166</sup> Las Fig. 2 y 3 demuestran que los resultados de las pruebas fueron favorables. Los valores  
<sup>167</sup> obtenidos a partir de la simulación se corresponden (en mayor o menor medida) con los alcanzados  
<sup>168</sup> 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  $\mu = 0.75$ .

190

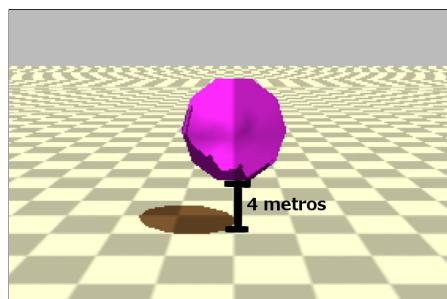


Figura 5: Visualización del sistema de la esfera

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  $\epsilon_{rel}$ , que es el error relativo entre los coeficientes  $e_{sim}$  y  $e_{medida}$ , calculado de la siguiente manera:

195

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

En la Tabla 1 se puede observar lo arrojado por los experimentos numéricos que se efectuaron; usando:  $v_i = \{-0.5, -3.5, -4, -5 \text{ y } -10\} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  y  $e_{sim} = \{0.2, 0.5 \text{ y } 0.8\}$ .

$v_i$	$e_{sim}$	$v_f$	$e_{medida}$	$\epsilon_{rel}$
$-0.5 \frac{m}{s}$	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

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

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

### 209 2.1.3. Ventajas

210 Las ventajas del motor físico son:

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

### 214 2.1.4. Desventajas

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

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

- 219 – Utilizar una librería gráfica (como *OpenGL*) acoplada a una simulación de *Bullet* puede  
220 producir resultados distintos, que si se usa un programa de visualización externo (como  
221 OVITO).

222 **2.2. Librería de algoritmos genéticos**

223 Se utilizó la conocida librería de algoritmos genéticos para C++ GaLib, desarrollada por  
224 Matthew Wall del MIT [8].

225 Ofrece funcionalidades como: programación paralela, diversos métodos de selección (*elite*, *rou-  
lette*), estrategias de reemplazo (de padres, aleatorio, del peor), entre otras.

227 **2.3. Código fuente**

228 Al estar *Bullet* implementado en C++, el código fuente también está desarrollado en ese  
229 lenguaje. En *Bullet*, se define un *World* (o mundo físico) en donde se puede insertar, entre otras  
230 cosas, cuerpos rígidos. En este caso en particular, el mundo consta de un plano (el suelo), y el  
231 bípedo (compuesto por cuerpos rígidos y otros elementos físicos) ubicado sobre él.

232 El *software* creado incluye: construcción del humanoide, siendo éste capaz de desplazarse por  
233 medio de actuadores (que se verán en la Sección 4); el desarrollo del algoritmo genético (definición  
234 de los individuos, función de *fitness*, métodos de selección, etc.); visualización gráfica del mejor  
235 humanoide logrado por el algoritmo genético; y la posibilidad de realizar gráficos referidos a la  
236 evolución del algoritmo genético (*fitness* por cada generación, etc.).

237 Se acompañan a esta presentación: el código fuente y el manual de instalación y uso.

238 **3. Modelo utilizado**

239 Dentro de los diversos modelos existentes ([1][2]), en este trabajo se procuró utilizar uno que  
240 fuera sencillo pero representativo a la vez.

241 Se modela al cuerpo del bípedo, con el motor *Bullet Physics*, como un conjunto de segmentos  
242 unidos entre sí por articulaciones. A cada uno de ellos se les aplica un torque en el centro de  
243 masa de cada segmento (denominado actuador). Que la caminata se produzca o no, depende  
244 del tipo de actuador empleado (la función utilizada para el torque), y de sus parámetros. El  
245 objetivo es encontrar dichos parámetros. Para eso se usan los algoritmos genéticos, un método  
246 de inteligencia artificial. De este modo se obtiene, de forma análoga a la selección natural, los  
247 individuos que mejor se adapten a la caminata. Tanto los actuadores como el algoritmo genético  
248 se explicarán más adelante.

249 **3.1. Composición física del humanoide**

250 Como ya se expresó, el humanoide fue modelado en *Bullet* como un conjunto de segmentos  
251 (cuerpos rígidos), unidos entre sí por articulaciones.

252 Sobre la base de la anatomía humana, se dividió el cuerpo del humano virtual en: cabeza, tronco,  
253 miembro superior (brazo, antebrazo y mano), pelvis y miembro inferior (muslo, pierna y pie).

254 A los fines de este proyecto (lograr la caminata), sólo se consideraron pelvis y miembro inferior  
255 (Fig. 6).

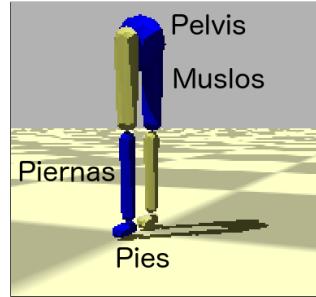


Figura 6: Segmentos del humanoide

256 En la Tabla 2 se presenta la composición física de cada uno de los segmentos del humano virtual,  
257 de acuerdo a la biomecánica [9].

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

258 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)).

259 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. 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.

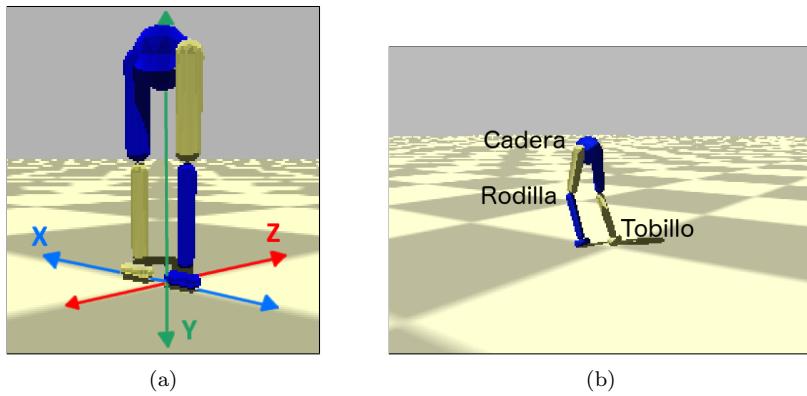


Figura 7: Humanoide diseñado: (a) ejes, y (b) articulaciones

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

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

## 270 4. Actuadores

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

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

284

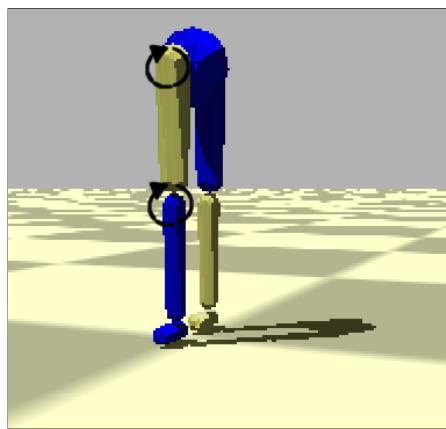


Figura 8: Aplicación de los actuadores en los segmentos del bípedo

### 285 4.1. Genérico

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

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

287 donde  $f(t)$  es la función del actuador evaluada en el instante de tiempo  $t$ ,  $A_1$  y  $A_2$  son amplitudes,  
 288  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son frecuencias (en  $\frac{1}{s}$ ),  $\phi$  es la fase en radianes, y  $C$  es un término independiente (ver  
 289 Fig. 9 (a) y (b)).

290 La fase  $\phi$  es la misma en el seno y en el coseno, para evitar que se formen otro tipo de funciones  
291 no cíclicas.

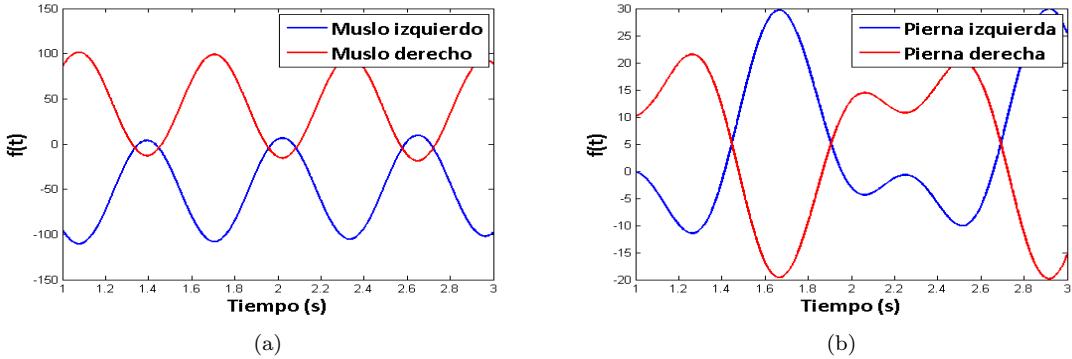


Figura 9: Ejemplo de actuador genérico aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

#### 292 4.2. Fourier de orden 2

293 Este actuador utiliza una serie de Fourier de dos términos.

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi) + B_1 \cos(\omega t + \phi) + A_2 \sin(2\omega t + \phi) + B_2 \cos(2\omega t + \phi) + C \quad (8)$$

294 donde  $A_1, A_2, B_1$  y  $B_2$  son amplitudes y  $\omega$  es frecuencia (en  $\frac{1}{s}$ ) (ver Fig. 10 (a) y (b)).

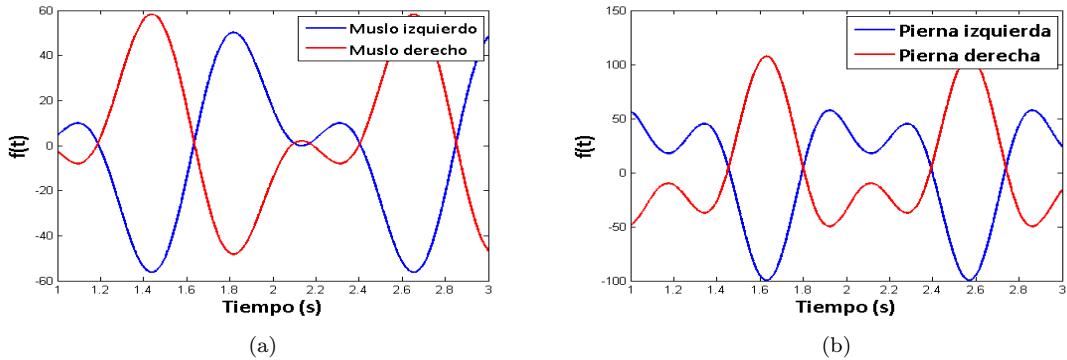


Figura 10: Ejemplo de actuador fourier de orden 2 aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

#### 295 4.3. Fourier de orden 9

296 Es una extensión del actuador anterior, pero con 9 términos. Por ser de mayor grado, brinda  
297 una mayor precisión. Sin embargo, es más difícil de manejar computacionalmente; y, además, que  
298 sea más preciso no garantiza que con él se pueda lograr una buena caminata (ver Fig. 11 (a) y (b)).

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

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

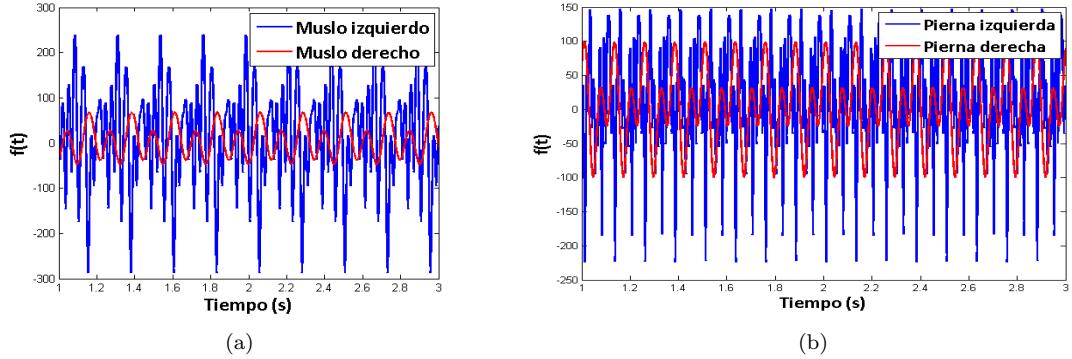


Figura 11: Ejemplo de actuador fourier de orden 9 aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

#### 4.4. Coseno doble frecuencia

Basada en [10], esta función periódica utiliza medio ciclo de una función sinusoidal, y medio ciclo de otra (ambas pueden tener frecuencias distintas). Esto podría tener sentido porque en una caminata, un miembro inferior primero avanza hacia adelante y luego se extiende hacia atrás, y es razonable que esos dos movimientos se produzcan a frecuencias distintas (Fig. 12 (a) y (b)). La idea es lograr una función periódica a partir de una que no lo es (ya que  $t$  es lineal). Para eso, se utiliza  $\psi(t)$  (ec. (10)) que aplica una transformación a los números reales, para que se encuentren dentro del rango del ciclo completo (con las dos frecuencias).  $\omega$  es la frecuencia de  $f(t)$  (ec. (12)), que utiliza medio ciclo con frecuencia  $\omega_1$  y medio ciclo con frecuencia  $\omega_2$ .

$$\psi(t) = t + \phi - \left\lfloor \frac{t + \phi}{\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2} \right\rfloor (\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2) \quad \psi : \mathbb{R} \rightarrow \left[0, \frac{2\pi}{\omega}\right] \quad (10)$$

$$\omega = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (11)$$

$$f(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_1 \psi(t)) + C & \text{si } \omega_1 \psi(t) < \pi \\ A \cos(\omega_2(\psi(t) - (\pi/\omega_1) + (\pi/\omega_2))) + C & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (12)$$

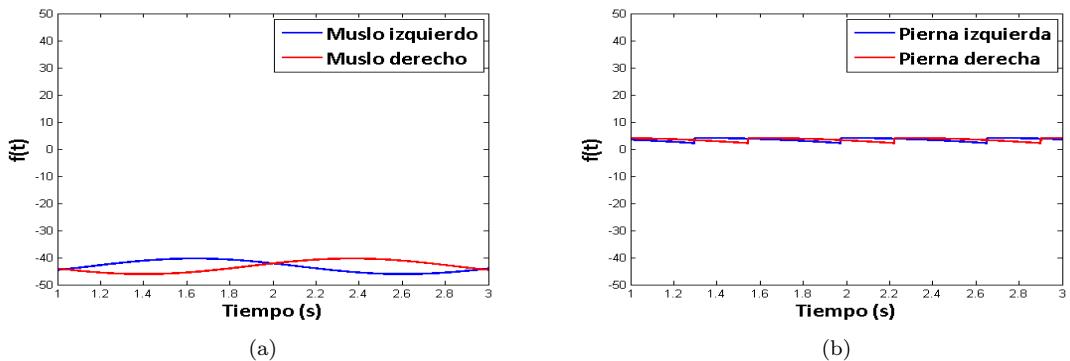


Figura 12: Ejemplo de actuador coseno de doble frecuencia aplicado en: (a) muslo, y (b) pierna

## <sup>314</sup> 5. Condiciones iniciales y de contorno

<sup>315</sup> Como las funciones periódicas señaladas en los actuadores, no fueron suficientes para lograr  
<sup>316</sup> la caminata, se le adosaron las funciones que se detallan seguidamente.

### <sup>317</sup> 5.1. Función partida

<sup>318</sup> El andar del humanoide es cíclico. Sin embargo, por la posición inicial del individuo, se requiere  
<sup>319</sup> para el tiempo del primer paso, una función distinta a la del resto de la caminata. El tipo de  
<sup>320</sup> función puede ser cualquiera de los actuadores vistos anteriormente (pero no necesariamente con  
<sup>321</sup> los mismos valores de amplitud, frecuencia y fase asignados a las piernas). Empero, se utilizó la  
<sup>322</sup> función vista en el actuador genérico.  
<sup>323</sup> Por otra parte, para simplificar el modelo, se decidió que el tiempo considerado para el primer  
<sup>324</sup> paso sea fijo, y de 0.7 segundos. Dicho valor fue extraído de forma experimental.

### <sup>325</sup> 5.2. Fase sincronizada

<sup>326</sup> En una caminata, las piernas deben guardar simetría: mientras una va hacia adelante, la otra  
<sup>327</sup> va hacia atrás (y viceversa). Esto, de acuerdo con los actuadores definidos en la sección anterior,  
<sup>328</sup> implica que las funciones de movimiento de cada pierna estén desfasadas en medio ciclo ( $\frac{\pi}{2}$ ):

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

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

<sup>330</sup> siendo  $f(t)$  la función de movimiento (o actuador) en el momento  $t$ , y  $f_i$  y  $f_d$  las funciones de la  
<sup>331</sup> pierna izquierda y derecha, respectivamente.

## <sup>332</sup> 6. Algoritmo genético

<sup>333</sup> Los algoritmos genéticos son un conjunto de técnicas de optimización, inspiradas en la teoría  
<sup>334</sup> darwiniana de la selección natural. La entidad a optimizar constituye un individuo dentro de  
<sup>335</sup> una población; que puede ser cruzado con otros individuos para obtener un “hijo”, que presenta  
<sup>336</sup> características de sus “padres”. A través de una función de *fitness* se decide cuáles de ellos son  
<sup>337</sup> los más “aptos”, que luego pasarán a una nueva generación de individuos. Este proceso se repite  
<sup>338</sup> hasta obtener un individuo lo suficientemente apto, que representa a la entidad optimizada.  
<sup>339</sup> El objetivo de este proyecto es optimizar la caminata del humanoide. Ergo, en el algoritmo  
<sup>340</sup> genético aplicado, el individuo está definido por rasgos del bípedo, y la función de *fitness* se  
<sup>341</sup> focaliza en mejorar diversos aspectos de dicha caminata.

### <sup>342</sup> 6.1. Individuo

<sup>343</sup> La información genética de cada individuo, está definida como un vector y se compone de  
<sup>344</sup> dos partes, ubicadas en forma contigua: función partida (optativa) y los parámetros asociados a  
<sup>345</sup> los actuadores (obligatorios).

346 **6.1.1. Parámetros**

347 Tanto la función partida como los actuadores tienen como parámetros: amplitud ( $A$  o  $B$ );  
 348 fase ( $\phi$ ), que indica dónde comienza el paso y se mide en radianes; frecuencia ( $\omega$ ); y término  
 349 independiente ( $C$ ).

350 **6.1.2. Valores**

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

354

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	$-\pi$	$\pi$
	Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10
Fourier de orden 2	Muslo	Amplitud	-60	60
	Pierna	Amplitud	-30	30
	Muslo y Pierna	Frecuencia	0.01	10
	Muslo y Pierna	Fase	$-\pi$	$\pi$
	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	$-\pi$	$\pi$
	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	$-\pi$	$\pi$
	Muslo y Pierna	Término independiente	-30	30

Tabla 4: Rango de valores que puede tomar cada gen, según el tipo de actuador

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	$-\pi$	$\pi$
Muslo y Pierna	Término independiente	-10	10

Tabla 5: Rango de valores que puede tomar cada gen, para la función partida

**355 6.1.3. Implementación de individuos**

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

358

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

Tabla 6: Tipo de individuos

**359 6.1.4. Constitución del cromosoma**

360 Los distintos actuadores y la función partida tienen los parámetros presentados en la sección  
 361 6.1.1. Sus respectivas cantidades pueden verse en la Tabla 7.

362 En la Tabla 8 se muestra la composición del cromosoma de cada individuo, que depende de los  
 363 actuadores y la función partida usados. En ella se puede observar cómo según el tipo de individuo,  
 364 varía la cantidad de genes, es decir, la longitud del cromosoma. Vale aclarar que la función  
 365 partida se especifica para cada segmento (las dos piernas y los dos muslos); en cambio, para los  
 366 actuadores, sólo se definen dos (uno para las piernas y otro para los muslos).

367

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

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

		Individuo				
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Parámetro	Amplitud	12	12	16	44	8
	Frecuencia	2	6	6	6	8
	Fase	2	6	6	6	6
	Término independiente	2	6	6	6	6
	Totales	18	30	34	62	28

Tabla 8: Cantidad de parámetros según tipo de individuos

## 6.2. Fitness

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

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

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

### 6.2.1. Altura

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

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

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 tiempo  $t_n$ ,  $N$  la cantidad pasos de simulación y  $C$  una constante  $C = 5$ . Se calcula a partir de la diferencia entre la altura en cada instante de la simulación, con su altura inicial (la altura está definida como la posición de la pelvis en el eje Z). Cuanto mayor sea esa diferencia, más rápido el individuo cae, y por eso este módulo tiende a cero. Por el contrario, valdrá uno si la diferencia es ínfima (lo que significa que el humanoide mantiene su misma altura durante la caminata).

### 6.2.2. Velocidad

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

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

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 tiempo  $t_n$ , y  $V_O$  la velocidad objetivo en el eje Z (el eje de la caminata). Sigue una lógica y cálculo similares al factor de altura: a mayor discrepancia de la velocidad real del humanoide con  $V_O$ , menor (y más cercano a cero) es el valor arrojado por el módulo de velocidad.

### 6.2.3. Dirección

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

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

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

#### 411 6.2.4. Simetría

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

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

419  
 420 donde  $lf_x$  y  $lf_z$  es la distancia desde el pie izquierdo hasta la pelvis en los ejes X y Z, respecti-  
 421 vamente; y en donde  $rf_x$  y  $rf_z$  es lo mismo, pero para el pie derecho.

#### 422 6.2.5. Pies abajo

423 Con los módulos señalados anteriormente, se busca que el humanoide camine con una velo-  
 424 cidad y dirección determinadas, que no se caiga y que mantenga simetría mientras ejecuta sus  
 425 movimientos. Pero, todo esto daría, en el mejor de los casos, una caminata estilo “estrella”.  
 426 Sin embargo, una característica fundamental en una caminata normal es que las piernas (ergo,  
 427 los pies también) no sobrepasan la cadera. Si bien ésta es una propiedad negativa (expresa lo que  
 428 no debe tener una caminata), y se puede correr el riesgo de restringir demasiado, su ausencia da  
 429 resultados peores.

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

430  
 431 donde  $ldf$  y  $rdf$  son las diferencias entre la posición inicial de los pies y la altura en el momento  
 432  $t_n$  de los pies izquierdo y derecho, respectivamente, y  $\alpha = \max(\min(lf, rf) - hip, 0), 1$ , siendo  
 433  $lf$ ,  $rf$  y  $hip$  las alturas del pie izquierdo, pie derecho, y la cadera (es decir, vale 0 si la altura del  
 434 pie izquierdo o derecho supera a la de la cadera, y 1 en otro caso).

### 436 6.3. Operadores del algoritmo

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

440 **6.3.1. Métodos de selección**

441 De la vasta cantidad de métodos de selección que existen, se utilizaron: ***Elite*** (en donde  
442 se elige el individuo con mayor aptitud de la población); y ***Roulette*** (método estocástico, que  
443 selecciona un individuo de la población total al azar, con una probabilidad proporcional a su  
444 *fitness*).

445 **6.3.2. Métodos de crusa**

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

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

450 **6.3.3. Mutación**

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

454 Dicha probabilidad de mutación es de 0.3.

455 **6.3.4. Otras características**

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

458 **7. Resultados obtenidos**

459 Considerando los individuos definidos en el punto 6.1.3, se realizaron pruebas, corriendo  
460 el algoritmo genético, y evaluando el resultado alcanzado posteriormente (ya sea numérica o  
461 gráficamente). A continuación se analizan distintos aspectos relevantes.

462 **7.1. Evolución del *fitness* según tipo de individuos**

463 Los individuos que usan actuadores de Fourier son los que producen *fitness* más bajos; el de  
464 orden 2 (individuo de tipo 3) se estanca a las pocas generaciones (al igual que el de tipo 1); el  
465 *fitness* del individuo con actuadores Fourier de orden 9 se “ameseta” progresivamente (después  
466 de 500 generaciones).

467 El individuo de tipo 1 es el individuo con *fitness* más alto, pero que se obtuvo a las pocas  
468 generaciones (es decir que es un máximo local). El individuo de tipo 2 (con actuadores genéricos  
469 y función partida) va aumentando su *fitness* progresivamente, aunque sin superar al de tipo 1.  
470 Por otra parte, el individuo de tipo 5 (con actuadores coseno doble frecuencia), va mejorando su  
471 *fitness* paulatinamente, lo que impide estancarse en un máximo local. Además, tiene el segundo  
472 mejor *fitness*.

473 Puede notarse que los rangos manejados en la Fig. 13 casi alcanzan el 0.7 (y no a 1, su cota  
474 superior). Esto se debe a que la función de *fitness* está definida como un producto de ciertos  
475 módulos: suponiendo que cada uno de ellos estuviera al 92 %, se tendría  $0.92^5 = 0.659$ .

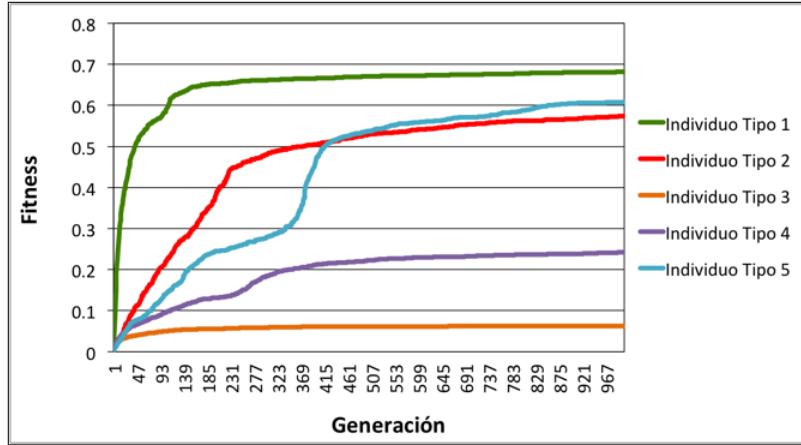


Figura 13: Evolución del *fitness* según tipo de individuos

## 476 7.2. Velocidad según tipo de individuos

477 Seguidamente, se muestra para cada individuo, su velocidad instantánea a lo largo del tiempo.

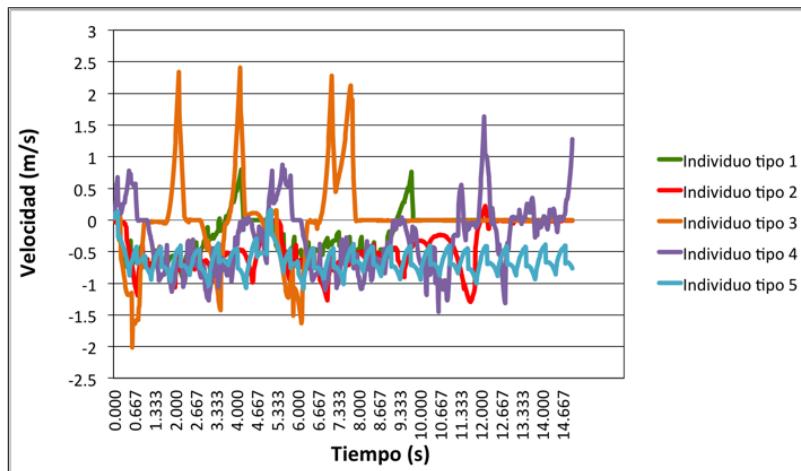


Figura 14: Velocidad según tipo de individuos

478 Como puede observarse en el caso de los individuos 3 y 4 (Fourier de orden 2 y 9, respectivamente),  
479 se producen picos altos y pronunciados en la velocidad. Eso repercute en que la velocidad media no  
480 sea  $1.3 \frac{m}{s}$  (que es la velocidad objetivo), y ergo, en el módulo de velocidad del *fitness* (provocando  
481 que éste sea más bajo).

482 En el individuo de tipo 1, también se producen picos un poco menos pronunciados, pero luego  
483 de los 10 segundos, no se registra ninguna velocidad. Eso sucede porque el humanoide queda  
484 suspendido cuando intenta caer hacia atrás.

485 La velocidad del individuo de tipo 2 oscila de forma irregular, pero no tiene picos muy elevados.

486 Por último, en el individuo de tipo 5, la velocidad oscila de forma cíclica, continuada y armoniosa  
487 (no hay picos altos).

## 488 7.3. Altura según tipo de individuos

489 Como puede identificarse en la Figura 15, la altura de los individuos es otra característica  
490 para diferenciarlos en su rendimiento.

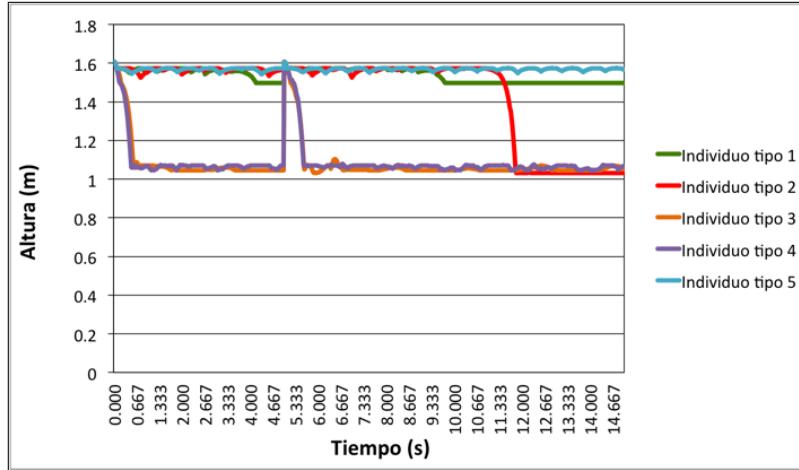


Figura 15: Altura (posición de la pelvis) según tipo de individuos

491 En efecto, los individuos de tipo 3 y 4 (que utilizan actuadores de Fourier de orden 2 y 9,  
 492 respectivamente), son los que caen de forma más abrupta, y aunque intentan levantarse, vuelven  
 493 a caer con la misma intensidad.

494 A su vez, el individuo de tipo 1 (actuador Genérico sin función partida) mantiene su altura,  
 495 hasta que a los 10 segundos queda suspendido a una altura levemente menor. Esto ocurre porque  
 496 se cae para atrás, y las limitaciones de la cadera impiden que caiga. El individuo de tipo 2, con  
 497 actuadores genéricos y función partida, logra mantener la altura, hasta que cae hacia adelante, en  
 498 cuclillas. Considerando que cuando cae no vuelve a levantarse (ya que en ese movimiento suelen  
 499 emplearse los brazos y manos), tiene un comportamiento similar a una caminata real.

500 En lo que respecta al individuo de tipo 5, que utiliza como actuadores la función coseno doble  
 501 frecuencia, mantiene su altura de forma constante, pero con oscilaciones leves y continuadas en  
 502 el tiempo. De los cinco, es el que da mayor cantidad de pasos.

#### 503 7.4. Comparación de tipo de individuos

504 En base a lo visto anteriormente, queda claro que los actuadores de Fourier no dieron buenos  
 505 resultados tanto en fitness, como en altura y velocidad.

506 Por otra parte, es necesario incluir la función partida (es decir, separar a la caminata en un  
 507 “primer paso”, y el ciclo), ya que si bien su ausencia puede originar *fitness* más altos, genera  
 508 inestabilidad a los pocos segundos (como en el individuo de tipo 1).

509 El individuo de tipo 5 logra un movimiento cíclico y repetitivo, que deriva en una caminata *ad*  
 510 *infinitum*, pero con el costo de que sea “robótica”(muy parecida a lo visto con un *passive walker*).

#### 511 7.5. Video

512 Para una mejor visualización de los distintos individuos obtenidos, y de su evolución a lo  
 513 largo de las generaciones del algoritmo genético, se acompaña video.

514 **Acá va el link del video**

## 515 8. Conclusiones

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

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

524 Los actuadores que mejores resultados dieron, fueron aquellos en donde se empleaba dos frecuen-  
525 cias  $\omega$  en vez de una.

526 Lo ocurrido con el individuo de tipo 1 (genérico y sin función partida), que es el que tiene un  
527 *fitness* más alto, aunque no produce una caminata acorde, posiblemente se deba a que el tiempo  
528 de simulación empleado en el algoritmo genético, fuera corto.

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

534 La función de fitness que se plantea (con sus módulos) indica propiedades ideales para una cami-  
535 nata, pero que no implican realismo en la misma. Y entonces dos individuos con *fitness* parecidos  
536 dieron como fruto caminatas muy distintas.

537 Si hay que elegir como mejor a uno de los dos, habría que decidir entre realismo (el humanoide  
538 se cae, pero es más natural), y estabilidad (no se cae nunca, pero parece un *passive walker*).  
539 Entre los trabajos a futuro para integrar a este proyecto, se encuentran lograr que la caminata  
540 se produzca en 3 dimensiones; y analizar el comportamiento de varios humanoides chocando e  
541 interactuando entre sí.  
542 Se puede concluir que, la caminata de una persona, algo que parece simple y sencillo, muestra  
543 su verdadera complejidad cuando debe ser simulada por medio de actuadores aplicados a un  
544 conjunto de segmentos interconectados.

## 545 Referencias

- 546 [1] Marek Wojtyra, *Multibody Simulation Model of Human Walking - Warsaw University of*  
547 *Technology, 2003*
- 548 [2] Thomas Geijtenbeek, Michiel van de Panne y A. Frank van der Stappen, *Flexible Muscle-  
549 Based Locomotion for Bipedal Creatures, 2013*
- 550 [3] Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Physics\\_engine](https://es.wikipedia.org/wiki/Physics_engine)
- 551 [4] Andreas Gerndt y otros, *An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual*  
552 *Reality Assembly Simulations. Fecha de publicación: 2012*
- 553 [5] Tom Erez y otros, *Simulation Tools for Model-Based Robotics: Comparison of Bullet, Havok,  
554 MuJoCo, ODE and PhysX*

- 555 [6] Sitio web de Bullet Physics: <http://www.bulletphysics.org/>
- 556 [7] Erin Catto, *Iterative Dynamic with Temporal Coherence*. Fecha de publicación: 2005
- 557 [8] Sitio web de GaLib: <http://lancet.mit.edu/ga/>
- 558 [9] <http://www.exrx.net/Kinesiology/Segments.html>
- 559 [10] Kevin Kenny, Máximo Videla y Axel Wassington, *Proyecto Final para la obtención del título:*  
560 *Ingeniero en Informática - ITBA, 2014*