



**Universidad de las Ciencias Informáticas**  
**Facultad 5**

Trabajo de Diploma para optar por el título de  
Ingeniero en Ciencias Informáticas

**SIMULACIÓN DEL HILO DE SUTURA**

**Autores:** Ernesto Carrasco de la Torre  
Marileisy Castillo García

**Tutores:** Lic. Juan Manuel Medero Martínez  
Ing. Liudmila Pupo Peña

## DATOS DE CONTACTO

**Nombre y Apellidos:** Juan M. Mederos Martínez

**Edad:** 27 años

**Ciudadanía:** cubano

**Institución:** Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI)

**Título:** Lic. en Ciencias de la Computación

**Categoría Docente:** Profesor Asistente

**E-mail:** [juanm@uci.cu](mailto:juanm@uci.cu)

Tres años de experiencia en el tema de la Gráfica Computacional y la Simulación.

**Nombre y Apellidos:** Liudmila Pupo Peña

**Edad:** 24 años

**Ciudadanía:** cubano

**Institución:** Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI)

**Título:** Ingeniero en Ciencias Informáticas

**Categoría Docente:** Profesor Instructor

**E-mail:** [lpupo@uci.cu](mailto:lpupo@uci.cu)

Graduado de la UCI, con cuatro años de experiencia en el tema de la Gráfica Computacional y de la simulación basada en la física, y líder de un proyecto de Realidad Virtual aplicando técnicas de estereoscopia en la Universidad de las Ciencias Informáticas.

## DEDICATORIA

### Marileisy

*A Ana Julia: ojalá pudiera sanar esa sonrisa de levantarte.*

*Para Idalmi, que cocina mis sueños a pesar de los suyos.*

*Para Marisleydis, por ser mayor antes de hora.*

*A Amelie, por devolvernos la sonrisa perdida.*

### Ernesto

*A toda mi familia y a mis amigos.*

## AGRADECIMIENTOS

- A nuestros tutores Juan y Liudmila por la constancia y el cariño. A Osley por su ayuda, a la UCI por la oportunidad.

### Ernesto

- A la Revolución por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales honrados y calificados.
- A mi padre cuyos consejos me guiaron siempre
- A mi madre por el amor infinito que guarda cada palabra o gesto.
- A mi hermano por su constante apoyo y cariño, a toda mi familia.
- Agradecer a Aly por su amor, apoyo y por sus palabras de aliento en todo momento.
- A Felipe por sus consejos y preocupación constante.
- A todos los amigos del apartamento que también formaron parte del desarrollo de este trabajo.
- A mis eternos amigos de Camagüey.
- A todos los que de una forma u otra nos ayudaron y se preocuparon.

### Marileisy

- A esta isla, por el placer de ser CUBANA, a la revolución.
- A las cuatro mujeres de mi vida, mi abuela, mi mamá, mi hermana y mi sobrina por existir.
- A Ore y a papi por no estar, a Orelvito por compartir mi suerte.
- A Raissel, por el amor de cada día, por toda la magia que sin saber me ha regalado.
- A mi familia, toda ella, mis padres, mis tíos, los primos, mis hermanas las personas de siempre y de todo.
- A mis amigos de la UCI, Luis, Leti, Yonnier, Toni, Maylin, Yuri, Heri, y a todos los demás por enseñarme la herida de tantas formas.
- A mis compañeros y amigos de cinco años, Feli, Yadiel, Yaniert, Marlen, a Ale y a Aliuska aunque ya no estén por las sonrisas, las horas y cada espacio que compartimos.
- A Ernesto, por la suerte de conocerlo, por su ejemplo y la inconsistencia de habernos soportado.
- A todos las personas que por accidente olvidé mencionar.

## RESUMEN

“Simulación del Hilo de Sutura” propone un modelo físico-matemático para la simulación dinámica del hilo empleado en simuladores quirúrgico o en otras escenas de realidad virtual donde se necesite modelar objetos extremadamente finos como cuerdas, cables, pelos o hilos con diferentes funcionalidades.

A partir del estudio de las técnicas que se han utilizado hasta el momento para modelar hilos se decidió utilizar un método de simulación que integre un sistema de Masa-Resorte con una topología formada por cadenas de objetos lineales y Jerarquías Volumen-Frontera para detectar y tratar las colisiones, además de introducir cilindros envolventes para hacer más exactas las respuestas de colisiones.

Se utiliza Runge-Kutta de orden cuatro como método de integración numérica para obtener la posición de cada punto del hilo en cada interacción. Se hace un estudio además sobre la posibilidad de hacer nudos en tiempo real, asumiendo el hilo como un sistema basado en transformación de energías.

**PALABRAS CLAVES:** Dinámica, Realidad Virtual, Sutura, Simulación.

## SUMMARY

*“Dynamic Simulation of Suture Thread” proposes a physical-mathematical model for dynamic simulation of thread employed in surgical simulators or other virtual reality scene where it may be needed to represent extremely thin objects like ropes, cables, hair or threads with much functionality.*

*After the analysis of the main techniques that have been used in the world to model threads, it was decided to use a simulation method that incorporates a Mass-Spring system with a topology consisting of lineal objects chain and Bounding-Volume Hierarchy (BVH) to detect and treat collisions, furthermore it was suggested the introduction of superficial cylinders to obtain most exact results in collision tests.*

*The fourth order method of Runge-Kutta’s of numerical integration is used to obtain the position of each point in the thread for each time step. Furthermore, it is studied the possibility of making knots in real time, assuming the thread as a system based on energy transformations.*

**KEYWORDS:** *Dynamic, Virtual Reality, Suture, Simulation.*

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Principales características de la Simulación del hilo de Sutura.</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Simulación del Hilo de Sutura</b>	<b>12</b>
1.2.1 Topología	12
1.2.2 Deformación de objetos. Introducción	13
1.2.3 Métodos de Deformación aplicados a objetos finos	15
➤ Splines	15
➤ Masa-Resorte	19
➤ Sigue al líder (FTL)	21
<b>1.3 Detección y tratamiento de Colisiones</b>	<b>23</b>
1.3.1 Métodos de detección y tratamiento de Colisiones y Auto-Colisiones en hilos	24
➤ Jerarquías Volumen-Frontera (BVH)	24
➤ Basado en Ángulos	26
➤ Número de Puntos Adaptativos	27
1.3.2 Nudos	29
<b>1.4 Recapitulación</b>	<b>30</b>
<b>CAPITULO II. SOLUCIÓN TÉCNICA</b>	<b>32</b>
<b>2.1 Método de simulación</b>	<b>32</b>
<b>2.2 Características Generales</b>	<b>34</b>
➤ Masa-Resorte	34
➤ Método de Integración	38
➤ Jerarquías Volumen-Frontera (BVH)	39
➤ Cilindros Envoltentes	40
<b>2.3 Consideraciones Técnicas</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Modelo del Dominio</b>	<b>43</b>
3.1.1. Reglas del Negocio	43
3.1.2. Modelo del dominio	43
<b>3.2 Requerimiento</b>	<b>44</b>
3.2.1. Requisitos Funcionales	44
3.2.2. Requisitos no Funcionales	45
3.2.3. Diagrama de Casos de Uso del Sistema	46
3.2.4. Modelo de Casos de Uso del Sistema	46
<b>3.3 Diseño</b>	<b>53</b>

3.3.1.	Paquetes del Diseño	53
3.3.2.	Diagrama de Clases del Diseño	56
3.3.1.	Descripción de las clases del diseño	57
3.3.2.	Diagramas de Secuencia	62
<b>3.4</b>	<b>Implementación</b>	<b>64</b>
3.4.1.	Diagramas de Componentes	64
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>67</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>68</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>69</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>		<b>71</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>		<b>72</b>
<b>ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>		<b>73</b>
<b>ANEXO 2: ESTÁNDARES DE CODIFICACIÓN</b>		<b>79</b>



## INTRODUCCIÓN

Paralelas al gran desarrollo de las tecnologías de la informática han nacido y evolucionado ramas como la Realidad Virtual (RV), complejo proceso que traduce la realidad a un entorno gráfico tridimensional en tiempo real soportado por hardware y software especialmente diseñado para ello. La Realidad Virtual se ha convertido en uno de los más prometedores e inquietantes temas dentro de las ciencias informáticas. Hoy en día se construyen sistemas para simular procesos que en la vida real reportarían grandes sumas, pondrían en riesgo recursos naturales y humanos o simplemente serían imposibles de realizar bajo circunstancias normales.

Grandes compañías y universidades de gran prestigio se dedican al desarrollo de sistemas que responden en gran medida a problemáticas del mundo actual. Existen reportes del uso de la RV en disímiles áreas de interés social y científico como por ejemplo en la física para la visualización de fluidos y partículas o la simulación espacial, en la ingeniería a la hora de ensamblajes complejos, en estudios geográficos para la previsión de fenómenos catastróficos y visualización de relieves topográficos u oceánicos, en la arquitectura a la hora de modelar estructuras complejas y prever errores de diseño, en el arte y la historia mediante la representación de museos y sitios arqueológicos, o en la medicina en el tratamiento de fobias, en terapias de relajación o simulaciones quirúrgicas. [1]

Brindar la posibilidad a los cirujanos de ensayar operaciones complejas totalmente simuladas antes de enfrentarse a las cirugías reales y garantizar el entrenamiento de estudiantes de medicina sin atentar contra la integridad física de los pacientes han sido algunos de los objetivos más ambiciosos de la RV en las últimas dos décadas. Proyectos con altos índices de aceptación y fiabilidad han surgido desde la segunda mitad de la década de los ochenta, es el caso de *KISMET 3D-Simulation Software*, *Laparoscopic Cholecystectomy* desarrollado por Michael Downes *et al.* en la Universidad de California, el *Laparoscopic Simulator* desarrollado por Srinivasan *et al.* en el *Laboratory for human and machine haptics* de la Universidad de Missouri-Columbia, el *Hepatic Surgery Simulator* desarrollado por S. Cotin *et al.* en el centro de investigación INRIA de Francia, el *Anastomosis Simulator* desarrollado por *Boston Dynamics Inc.*, el *Mimic Technologies* y el *Simbionix*, estos dos últimos actuales líderes en el campo de la simulación quirúrgica. [2]

Actualmente estos proyectos están sometidos a un constante perfeccionamiento de forma tal que su evolución y despliegue hacia otras áreas sea inevitable. Muchos países pagan altos costes por poseer estos simuladores y otros buscan la vía de desarrollarlos.

Cuba, que da sus primeros pasos en el mundo del software, ya se inicia en el campo de la Realidad Virtual y los simuladores quirúrgicos no han quedado fuera de su mirada. La posibilidad de contar con un sistema de este tipo crea expectativas en la comunidad médica nacional. La Universidad de las Ciencias Informáticas, insipiente productora de software se proyecta ante esta necesidad real y ha comenzado a desarrollar su propio Sistema de Simulación Quirúrgica.

Una de las prioridades del proyecto es crear escenarios que permitan a los médicos ganar determinadas habilidades en prácticas puntuales como es el caso del proceso de sutura. Ante este requerimiento se vuelve imprescindible modelar el comportamiento, lo más cercano a la realidad, de objetos que intervienen en dichas escenas, como por ejemplo el hilo. El **problema científico** que da origen a esta investigación surge ante la necesidad de modelar el comportamiento del hilo de sutura en escenas virtuales de Cirugías de Mínimo Acceso (CMA).

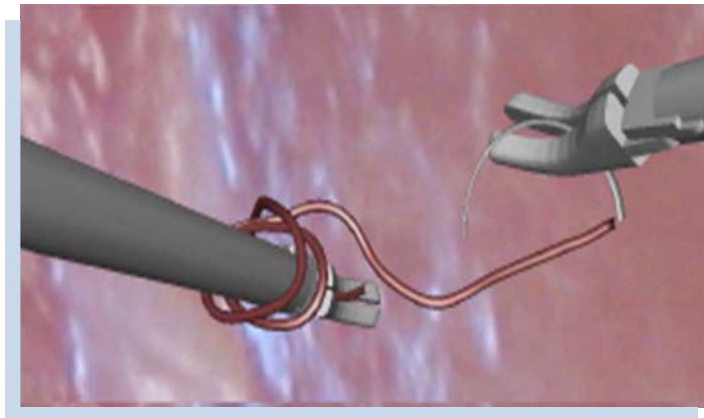
Para lograr una fiel representación del hilo que se utiliza en estas cirugías es preciso estudiar las leyes bajo las que puede estar sujeto, para ello tomamos como **objeto de estudio** la simulación del comportamiento de hilos y como **campo de acción** las técnicas y algoritmos para la modelación del comportamiento del hilo.

El **objetivo general** de este trabajo es definir e implementar un modelo físico-matemático que simule el comportamiento del hilo de sutura. Para lograr este objetivo es imprescindible el total cumplimiento de las siguientes **tareas**:

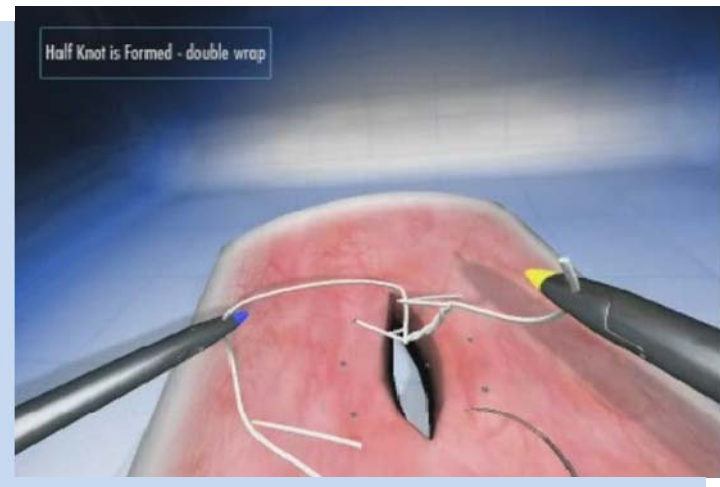
- 1) Estudio y caracterización del proceso de simulación de hilos de suturas en entornos quirúrgicos.
- 2) Selección y estudio de las técnicas adecuadas para simular el hilo.
- 3) Interpretación de los algoritmos involucrados en la técnica seleccionada.
- 4) Selección del modelo físico-matemático para la simulación del hilo a partir del análisis de técnicas y algoritmos.
- 5) Implementación del modelo físico-matemático que caracterice el comportamiento del hilo.
- 6) Implementación de un demo que visualice el comportamiento del hilo.

La simulación de escenas quirúrgicas no es un proceso sencillo. Intervienen un gran número de objetos como pinzas, agujas y el hilo de sutura que hacen de la simulación un proceso engorroso y complejo sujeto a leyes físicas y matemáticas con un nivel científico consideradamente alto.

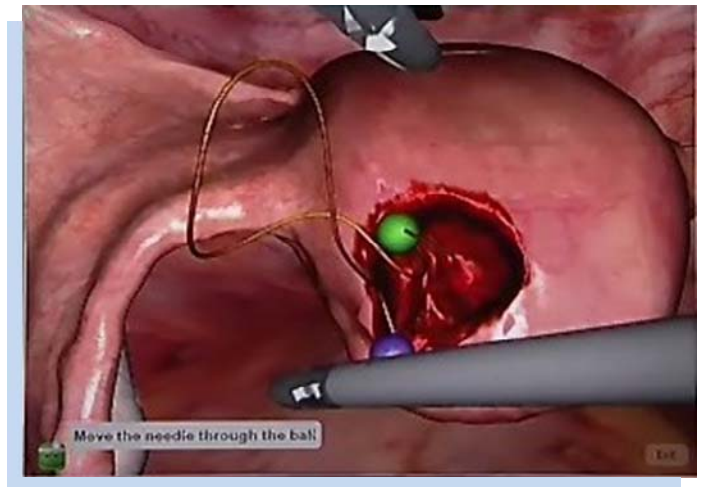
A pesar de ello el hilo de sutura ha sido simulado de varias formas, en algunos de los más avanzados simuladores alcanza un grado de credibilidad reconocido y altamente valorado, sin embargo es muy difícil lograr una simulación cien por ciento fiel a la realidad. Aún cuando no se garantice un comportamiento idéntico a la vida real, los avances son considerados alentadores. Sobre todo en este principio de siglo, se ha ganado en la calidad visual de los modelos, en la velocidad y sobre todo en la definición del comportamiento, esto por supuesto ha llevado implícito en muchas ocasiones análisis e implementaciones más complejas.



A



B



C

**FIGURA 1:** Imágenes del hilo de sutura pertenecientes a los simuladores **A:** Xitact **B:** Simbionix **C:** Lapsim

Dada la necesidad planteada con anterioridad y las consideraciones hechas sobre el mundo de los simuladores quirúrgicos y su desarrollo es propuesto este trabajo que abarca desde el estudio de las técnicas utilizadas para la simulación del hilo de sutura hasta la selección de una de ellas para conformar un modelo y su posterior implementación. Para garantizar la claridad y un mejor aprovechamiento de la información esta fue organizada en tres capítulos según la evolución gradual de la investigación y su aporte al objetivo final. De esta manera la información queda estructurada de la siguiente forma:

**Capítulo I. Fundamentación teórica:** Presenta una introducción al proceso de simulación del hilo de sutura, sus principales características y la lógica que guarda un modelo de este tipo. Propone además técnicas de deformación que han sido previamente usadas para simular el hilo y un análisis de las posibles formas de tratamiento de colisiones.

**Capítulo II. Solución Técnica:** Propone una solución al problema científico después de haber analizado las diferentes variantes, sus ventajas y desventajas. Describe el método de simulación que se desarrollará, sus características fundamentales y hace referencia a las consideraciones técnicas a tener en cuenta para el desarrollo del modelo propuesto.

**Capítulo III. Desarrollo de la Solución Propuesta:** Contendrá la ingeniería aplicada al modelo siguiendo los flujos de trabajo de RUP modelo del dominio, requerimientos, diseño y por último implementación.

## CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### *1.1 Principales características de la Simulación del hilo de Sutura.*

El desarrollo de los gráficos por computadora y el continuo incremento de las simulaciones vinculadas a la medicina, más específicamente a la cirugía garantiza una constante búsqueda de nuevas vías para modelar entornos quirúrgicos, órganos y herramientas de cirugía. La exigencia del trabajo en temas como la representación visual, los modelos físicos, las colisiones y las fuerzas de realimentación han ido incrementándose a la par del auge de estos sistemas [4]. El proceso de sutura, clave dentro de las funciones que debe ejercer un cirujano con suma destreza es quizás uno de los más complejos de simular, dadas las características que presenta el hilo de sutura y el entorno en general.

Enfrentarse a la simulación de un cuerpo con dimensiones volumétricas especiales y con un comportamiento altamente susceptible, dependiente del medio y sus leyes físicas, que además tenga una conducta creíble, lo más próxima posible a la realidad y que permita la creación de nudos de sutura no es una tarea sencilla. Este es un tema que atrae constantemente a estudiosos del área y que propone ya numerosas vías de solución, sujetas muchas de ellas a constantes cambios con el objetivo de optimizarse.

Puede parecer que el comportamiento de un hilo de sutura es bien fácil de definir. Lo cierto es que a la hora de simularlo no solo se debe tener en cuenta su representación gráfica sino que debe estar respaldado por todo un modelo físico que proponga como se moverá y como interactuará con el medio y consigo mismo. Una serie de fuerzas intervienen en su comportamiento, ejemplo la fuerza de gravedad, la fuerza de rozamiento o la fuerza elástica, porque si bien el hilo de sutura es prácticamente inextensible desde el punto de vista de la simulación es visto como un objeto deformable sujeto a restricciones de comportamiento.[3]

Lo primero que se debe tener en cuenta a la hora de simular el hilo es su representación gráfica, los enfoques propuestos en este punto básicamente giran sobre la idea de una cadena de puntos consecutivos unidos por segmentos. La topología de un cuerpo como este es relativamente sencilla y se mantiene constante en la mayoría de los modelos estudiados, sin embargo la forma en que se tratan las deformaciones adopta métodos diferentes.

Una vez se tenga la estructura del objeto comienza la definición de su comportamiento, esta es quizás la parte más complicada de la simulación, es donde se delimitan las principales características físicas del hilo, tales como la capacidad de flexión o torsión. Para lograr estos efectos uno de los enfoques más utilizados es el uso de restricciones que usa la denegación y aprobación de acciones determinadas tales como “un punto no puede moverse” o “este punto debe moverse en determinada trayectoria en el tiempo” [9]. Las restricciones forman una función y la dirección del movimiento del hilo deberá estar a lo largo del gradiente de esta [3].

En otros casos se calculan las fuerzas internas (Eje. Fuerza Elástica) y las externas (Eje. Fuerza de Gravedad) y a partir de ahí se integra la función de tiempo para obtener la velocidad y la posición del objeto, todo esto manteniendo un claro apego y fidelidad a las leyes de la dinámica, sobre todo a la Segunda ley de Newton.

Los principales métodos para la representación del hilo y su dinámica siguen dos criterios, los basados en transformaciones de energía y los basados en estabilidad de la energía, esto se debe a la utilización o no de la energía del sistema para derivar las fuerzas. También son diferenciados por ser modelos continuos o discretos. [5]

Uno de los puntos a tener en cuenta en la simulación es la detección y tratamiento de colisiones. Determinar cómo actuará el hilo ante un contacto con otro objeto o consigo mismo es imprescindible si se quiere que este no se mezcle al chocar o introducirse en otras superficies y más aún que se delimite bien su forma cuando auto-colisione, permitiendo hacer nudos, parte vital y crítica de la simulación.

## *1.2 Simulación del Hilo de Sutura*

### **1.2.1 Topología**

Existen dos enfoques principales para representar la topología del hilo de sutura. El primero lo considera como una cadena de objetos lineales y el otro como una curva en el espacio.

#### **Cadena de Objetos Lineales**

Muchos sistemas y trabajos representan al hilo de sutura u objetos similares, como pelos, cables, sogas entre otros, como un conjunto de puntos unidos mediante segmentos lineales. Varios artículos que tratan la simulación del hilo y en particular los nudos, modelan el hilo mediante un conjunto de segmentos lineales unidos por puntos que funcionan como coyunturas esféricas [12], otros modifican esta configuración y asumen los segmentos como resorte unidos por puntos de masa [7] [18].

Algunos trabajos proponen modelos completos para la simulación del hilo utilizando también la representación lineal del hilo [3], un número significativo de artículos que tratan la simulación del pelo humano utilizan segmentos unidos por resortes de inflexión [21].

#### **Curva en el espacio**

Otra forma común de representar geoméricamente el hilo de sutura es considerando el hilo como una curva continua en el espacio. Entre los enfoques más comunes están la modelación mediante splines formados a partir de puntos de control que funcionan como los grados de libertad de una curva continua [4] [8], así como otros consideran la curva final como un conjunto de segmentos splines para representar comportamiento de ropa formada por tejidos [9].

Otros enfoques con popularidad son los que utilizan la teoría Cosserat que propone un modelo alternativo basado en el fundamento de la teoría de los sólidos para la simulación del hilo de sutura [5], así como de objetos delgados elásticos con comportamiento similares al hilo [14].

## 1.2.2 Deformación de objetos. Introducción

La deformación de objetos ha constituido desde el principio del desarrollo de la RV un verdadero reto para los desarrolladores de sistemas gráficos. Debido a la variedad de objetos y las múltiples características que estos presentan se han desarrollado varios métodos para deformar, algunos teniendo en cuenta el volumen de los cuerpos, otros la superficie y algunas otras variantes reportando todos una mayor o menor eficiencia dada las especificidades de los sistemas.

Debido a que el objetivo de este trabajo se centra en el hilo de sutura se decide analizar solo la aplicación de los métodos de deformación en un conjunto de objetos con las características particulares del hilo, a los que usualmente se les conoce como objetos finos.

Son denominados objetos finos o delgados a aquellos cuerpos cuya forma es estrecha y alargada, y que por lo general son muy susceptibles a deformaciones ocasionadas por la interacción con otros objetos o con el medio al que pertenecen. En muchos ambientes simulados aparecen objetos con estas características, un ejemplo clásico es el pelo. Obtener un mayor nivel de realidad en el trabajo con cabellos se ha convertido en una meta ambiciosa y recurrente para los desarrolladores de RV. Otros ejemplos son los cables o cuerdas finas, las fibras de tela u otro material, el hilo en sus múltiples funciones o muchos otros que intervienen en diferentes entornos. La capacidad de deformación tanto plástica como elástica de estos objetos está en gran medida dictada por las características del material o materiales por los que esté compuesto.

En los últimos años los estudios sobre deformación de objetos han estado encaminados en dos sentidos. Por una parte los modelos que usan métodos de deformación geométrica y por la otra los que prefieren implementar métodos basados en física para cumplir con determinadas exigencias de la simulación [5].

**Métodos geométricos:** no modelan las propiedades físicas de los objetos, esto trae como consecuencia que cuando un objeto es deformado por un factor externo (pinzas, fuerza del viento, gravedad, etc.) no se empleen leyes físicas para el cálculo de la forma resultante si no que se emplean puntos de control o ajustes en la función de superficie para mostrar la deformación [2].

El método geométrico más usado en la simulación de objetos finos es el Splines. Una cadena de puntos de control unidos por curvas donde la masa se mantiene constante a lo largo de la cadena y no



solamente recae sobre los puntos de control. La continuación de pequeñas curvas entre estos puntos de control garantiza la representación de curvas en el objeto.

**Métodos basados en física:** modelan de forma más real las deformaciones. Estos brindan la posibilidad de dictar el comportamiento normal de un objeto mediante la definición de las leyes físicas que actúan sobre el mismo. Estos modelos son más usados en la actualidad y tienen un alto índice de aceptación en las comunidades de desarrollo gráfico [2].

En los últimos años se han desarrollado fundamentalmente tres métodos: sistema Masa-Resorte, Método de Elementos Finitos o FEM (*según sus siglas en Ingles*) y Método de Elementos de Frontera o BEM.

Para usar FEM en la simulación del hilo requeriría modelos geométricos extremadamente finos que permitieran capturar comportamientos muy explícitos como la torsión cuando el torque es aplicado [5] esto haría del trabajo con este método prácticamente imposible de implementar partiendo de la idea de que FEM se basa en describir los objetos como un conjunto de elementos geométricos primitivos. BEM por su parte no es un modelo adecuado para un objeto como el hilo que carece de una superficie definida dado que su tratamiento de colisiones está concentrado precisamente en la superficie [2].

El uso del sistema Masa-Resorte debe usar un gran número de puntos de masa y muelles para reproducir correctamente el hilo y controlar posibles colapsos en circunstancias especiales como es el caso de una torsión. Sin embargo uno de los enfoques más utilizados para simular el hilo es precisamente el masa-resorte, dado su comportamiento elasto-mecánico [2].

Desafortunadamente muchos de estos métodos tal como son planteados no son adecuados para el trabajo con objetos muy finos, por lo que muchos desarrolladores hacen variaciones de ellos para obtener un resultado consecuente y más exacto. [5]

Una variante de Masa-Resorte es por ejemplo el modelo basado en cuerpos rígidos conectados por muelles de torsión. Esta, aunque es considerada más robusta, puede sufrir inestabilidad o arbitrariedades en la discretización de cuerpos rígidos a la hora de reproducir grandes curvaturas, una de las soluciones a estos problemas es utilizar cadenas muy finas para representar el hilo, cable, pelo o cual sea el objeto modelado. [5]

### 1.2.3 Métodos de Deformación aplicados a objetos finos

Después de analizar los principales métodos de deformación existentes y de forma general sus principales características y utilización en objetos finos se decidió profundizar tres de ellos, Spline, Masa-Resorte y Sigue al Líder. Estos métodos han sido utilizados previamente en la simulación de hilos y proponen en principio soluciones al problema de esta investigación.

#### ➤ Splines

Dada su facilidad para representar curvas, los splines pueden ser un enfoque conveniente para representar gráficamente el hilo de sutura. Estos permiten manipular la curva mediante un conjunto de  $n$  puntos de control que tienen asociados  $n$  funciones básicas de representación de curvas que en su conjunto modelan la curva final.

En [4] y [8] se modela el hilo como un spline con pocos puntos de control donde se utiliza la ecuación básica para los splines:

$$P(s,t) = \sum_{k=0}^n q_k(t)b_k(s) \quad (1)$$

Donde  $n$  es el número de puntos de control, y  $b_k$  las funciones básicas especificados para el tipo de spline.

En [9] se hace referencia a la ecuación anterior, donde la curva final es animada y conformada por  $n$  segmentos de splines controlados por  $n+1$  puntos de control que pueden trasladarse mediante funciones en el tiempo  $q_k$ . Los segmentos splines son definidos como funciones de posición de una coordenada paramétrica  $s$  en el tiempo  $t$  que se relacionan con determinados puntos de control para su representación. Se utiliza también la primera derivada de las funciones  $P(s,t)$  y  $q_k$  para hallar la velocidad de los puntos de control y su desplazamiento en el tiempo.

Un número significativo de trabajos utilizan las splines para representar al hilo como una curva paramétrica a la cual se le aplican ecuaciones dinámicas y restricciones que vinculan fuerzas y energías presentes en el sistema para poder darle un comportamiento realista al hilo y poder simular fenómenos como la torsión, estiramiento y doblez, entre otros.

Otros trabajos más recientes proponen un modelo continuo que puede ser discretizados en diferentes resoluciones y grados de libertad variables. Dicho enfoque utiliza una curva B-Splines controlada por  $n$  puntos de control y que permite añadir y eliminar grados de libertad a la curva sin perder la continuidad del objeto final que modela al hilo [10].

### **Formalismo de Lagrange**

El Formalismo de Lagrange utilizando la continuidad del Splines permite lograr una distribución continua de las masas, además de vincular las energías presentes en el sistema y las fuerzas aplicadas a cualquier punto del Spline aún cuando este no sea un punto de control [4].

Esta teoría esta basada fundamentalmente en la ecuación, que trata con un número finito de grados de libertad del Splines:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i^\alpha} + \frac{\partial K}{\partial q_i^\alpha} = Q_i^\alpha + \frac{\partial E}{\partial q_i^\alpha} \quad (2)$$

Donde  $q_i^\alpha$  representa los grados de libertad del objeto,  $\dot{q}_i^\alpha$  la derivación parcial,  $K$  la energía cinética del objeto,  $E$  la energía potencial y  $Q_i^\alpha$  el trabajo de las fuerzas conservativas aplicadas a la curva [4].

Tomando la ecuación de velocidad para cada punto del Spline se establece la ecuación de la energía cinética de todos los puntos del objeto (más detalles en [4] y [9]).

Dado que se establece que las masas son constantes a lo largo de la curva y que no varían con el tiempo, la parte izquierda puede ser simplificada y se puede representar como una multiplicación de matrices, vinculando las masas y el vector aceleración [4]:

$$MA = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^x \\ A^y \\ A^z \end{pmatrix} \quad (3)$$

La parte derecha de la ecuación (2) involucra fuerzas externas, como la gravedad, la viscosidad, energías de deformación que pueden ser aplicadas a cualquier punto del Spline no necesariamente a los puntos de control. En [9] se exponen ecuaciones para manejar la energía gravitacional y las fuerzas de viscosidad. Después de considerar las fuerzas y las energías presentes en el sistema para dar mayor realismo al movimiento y comportamiento de la curva, se pueden considerar además la introducción de energías de deformación entre los puntos del Spline así como posibles restricciones.

Para una mejor estructuración del modelo del hilo se pueden considerar la introducción de energías de deformación en el sistema. Se pueden usar dos posibles métodos [4], uno que une los puntos, no necesariamente de control, del Spline mediante resortes introduciendo una energía potencial en el sistema y el otro introduce una energía de tensión mediante la utilización del tensor St Venant-Kirchhoff.

El manejo de las restricciones es tratado en el Formalismo de Lagrange mediante dos métodos fundamentales, uno basado en penalidades, que introduce resortes para el control del movimiento y otro basado en multiplicadores de Lagrange [9].

Se pueden utilizar para modelar el Spline, los Splines Catmull-Rom por sus propiedades de interpolación y los BSplines cúbicos uniformes para asegurar una mayor continuidad [4] [9].

### **Restricciones**

Las restricciones son muy útiles para lograr controlar el movimiento y garantizar el comportamiento del hilo bajo determinadas condiciones. Muchos modelos propuestos tienen en cuenta las restricciones en el movimiento del hilo, así como del proceso de sutura para dar mayor realismo a la simulación [8] [21].

Una restricción es una forma de representar condiciones de movimiento y dirección del hilo [9]. Para manejar las restricciones y tratarlas dentro de las ecuaciones que conforman el modelo del hilo, se utilizan los multiplicadores de Lagrange que permiten obtener un sistema lineal [8] [21]:

$$\begin{pmatrix} M & 0 & 0 & -L_x^T \\ 0 & M & 0 & -L_y^T \\ 0 & 0 & M & -L_z^T \\ L_x & L_y & L_z & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \\ E \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde  $L=(L_x L_y L_z)$  es la matriz de restricción, formada a partir de las restricciones aplicadas a todos los grados de libertad del spline y  $\lambda$  son los multiplicadores de Lagrange asociados a cada grado de libertad [21].  $E$  es un vector que registra las violaciones a las distintas restricciones. La matriz simétrica de masas  $M$  y la matriz de aceleración  $A$  es obtenida después de aplicar el formalismo de Lagrange (ver sección Formalismo de Lagrange) y forma la matriz generalizada de masas  $M_g$  [8]. El vector  $B$  representa la contribución de todas las fuerzas externas al sistema.

En [21] se propone una restricción de punto de deslizamiento la cual permite fijar a un determinado punto en una posición establecida. Se tienen en cuenta que dado la dinámica y el movimiento de la curva, el punto afectado por la restricción puede cambiar por lo que la restricción incluye el tiempo para su resolución.

Algunos trabajos exponen varias restricciones para la simulación de la sutura, incluyendo el comportamiento del hilo [8] [21]. Se propone una restricción de deslizamiento donde se establecen los puntos en el espacio o puntos perforados en una superficie por los que tiene que pasar el spline, donde internamente lo que se establece es una restricción de punto fijo para algunos puntos de la curva que deben estar en una posición determinada. También se expone una restricción para la dirección del deslizamiento, estableciendo un movimiento ortogonal a los puntos por donde se debe deslizar el spline. Otra restricción que se proponen es para introducir una fricción entre el hilo y la superficie durante el deslizamiento para lograr un mayor realismo.

### **BSplines. Modelos Adaptativos**

Los modelos adaptativos son útiles para manejar la deformación de objetos fibrosos que tienen una distribución de masas continua, como el hilo de sutura, donde permiten cambiar local y dinámicamente la resolución de la curva para lograr la simulación en tiempo real [10].

En [10], los autores proponen un modelo adaptativo utilizando las propiedades físicas y continuas de los BSplines. Se centra en la discretización de un objeto continuo adicionando o eliminando grados de libertad, garantizando la continuidad del objeto y su comportamiento así como mantener invariable la geometría del mismo.

Se propone también, las ecuaciones para la inserción y eliminación de grados de libertad, en una curva Bspline. Se expone además un algoritmo básico para la simulación de la curva, donde se detecta y trata inicialmente las colisiones presentes, así como se calcula en cada ciclo de la simulación la posición, energías y fuerzas aplicadas a cada punto del spline y se actualizan los datos de cada punto.

Este modelo adaptativo utilizando Bsplines puede ser aplicado para simular el corte en la curva así como el manejo de nudos.

### ➤ Masa-Resorte

La utilización de esta técnica para simular el comportamiento de hilo conlleva a que el mismo sea modelado como una secuencia de puntos de masa donde los puntos adyacentes están unidos por resortes o muelles sujetos a la ley de Hooke [20], los cuales poseen una constante elástica  $K$  cuyo valor está directamente relacionado con la extensibilidad y flexibilidad del hilo real. Esto permite que en la simulación el modelo pueda deformarse en circunstancias concebidas pero también puede ocasionar efectos no deseados como oscilaciones e inestabilidad si no son tratados correctamente. [3]

La cantidad de puntos de masa es igual a la cantidad de resortes más uno. Los resortes son asumidos con masa igual cero y con longitud inicial mayor o igual que uno [3]. Cada punto de masa tiene una posición  $x$ , representada para cada punto de masa  $i$  como  $x_i = (x_i ; y_i ; z_i)$ , tal que  $i$  pertenezca al intervalo  $\{1,2,\dots,N\}$ . [18]

La dinámica de cada nodo  $i$  con una masa  $m$  en un instante  $t$  estará dada por la segunda ley de Newton, donde la sumatoria de las fuerzas que actúan en  $i$  es igual a la masa por la segunda derivada de la posición.

La sumatoria de las fuerzas externas que actúan sobre un punto generalmente son: la fuerza de elongación y compresión de los resortes que conectan al punto  $i$ , la fuerza de doblado, la fuerza de torsión, la fuerza de fricción considerada como fuerza disipativa, la fuerza de contacto generada ante una colisión y finalmente la fuerza de gravedad. [18]

### **Dinámica Basada en Posición**

Por lo general en los métodos para la simulación del hilo de sutura se calculan las fuerzas mediante la segunda ley de Newton y con esquemas de integración se obtiene la velocidad y luego la posición del objeto. La dinámica basada en posición propone trabajar solamente con la posición, desechando así las variaciones de velocidad. Este método garantiza un mayor control sobre el sistema, permite un fácil manejo de colisiones además de resolver las penetraciones con la proyección de puntos que validan la posición del objeto. [6]

Dinámica Basada en posición (DBP) ha sido utilizada para simular el comportamiento de hilos, en estos casos se modela la física como un conjunto de restricciones a partir de las cuales se define el comportamiento siguiendo tres pasos, primeramente se mueven los puntos de masa de acuerdo a su velocidad y a las acciones externas sobre cualquier parte del hilo (cuando este es agarrado por un dispositivo de entrada), después se mueven los puntos de masa de forma tal que las restricciones propuestas sean cumplidas y por último se integra para obtener la posición. Si la dirección del movimiento está dentro del gradiente de la función de restricción entonces será preservada la cantidad de movimiento lineal y angular. [3]

Las principales características que debe cumplir el hilo proporcionan las restricciones a tener en cuenta en la simulación. Estas son:

- Restricción de Rigidez y Doblado.
- Restricción de Torsión.
- Restricción de Fricción.
- Restricción de Contacto.

Dinámica Basada en Posición se ha venido usando fundamentalmente para objetos con las características del hilo de sutura ya que garantiza un modelo estable y perfectamente manejable que considera la gravedad y otras características de su comportamiento real. [3]

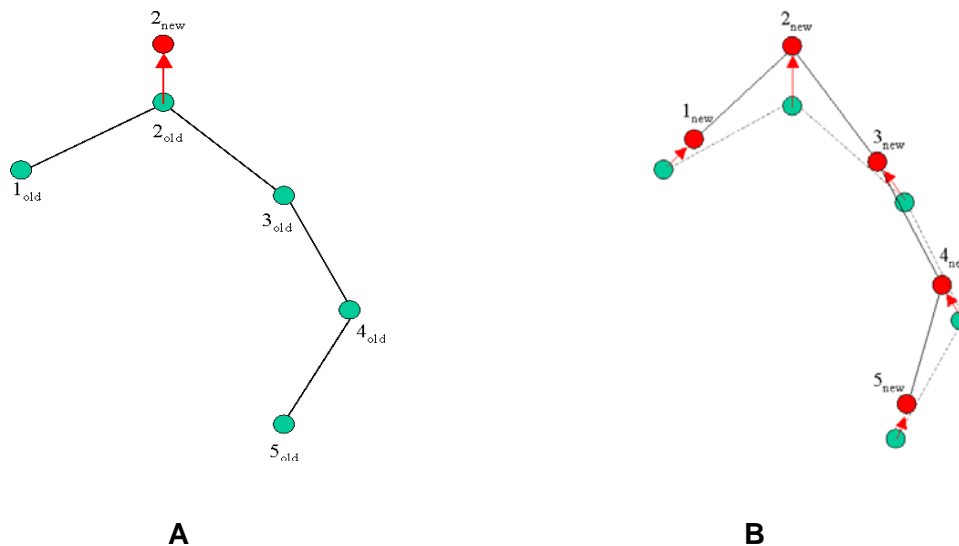
## ➤ Sigue al líder (FTL)

Una de las formas más comunes de representar un hilo es uniendo varios segmentos rígidos mediante puntos o nodos simulando en su conjunto el movimiento de una curva. Este enfoque es utilizado para representar el hilo como un objeto formado por varias aristas rígidas unidas mediante nodos que funcionan como coyunturas esféricas. [11], [12].

Cada coyuntura tiene dos grados de libertad rotacional y cada arista debe tener una longitud lo suficientemente pequeña para hacer parecer el hilo fino y liso. Cada arista se coloca dentro de un cilindro de radio  $r$  y longitud  $L$  para su representación gráfica.

Este enfoque se aplica fundamentalmente para objetos que se doblan suavemente y que tienen un estiramiento mínimo, cuestión por la que no se consideran elásticos y donde la aplicación de masa-resorte no se considera aplicable, tales como una cuerda [12], entre otros.

Para manejar la deformación en sistemas que modelan el hilo, de la forma mencionada anteriormente, se puede utilizar el conocido método de “Sigue al líder” (FTL por sus siglas en inglés). Este es un método basado en estabilidad de la energía, propone que cuando un nodo  $i$  es desplazado por la acción de fuerzas externas como las de pinzas o agujas, sus vecinos se mueven en la nueva dirección de ese nodo, manteniendo la distancia original que los separaba. Este desplazamiento se propaga hacia los demás nodos de la cadena, creando un movimiento global [11] [12].



**FIGURA 2:** A: Nodo desplazado por una fuerza externa B: Desplazamiento propagado. [12]



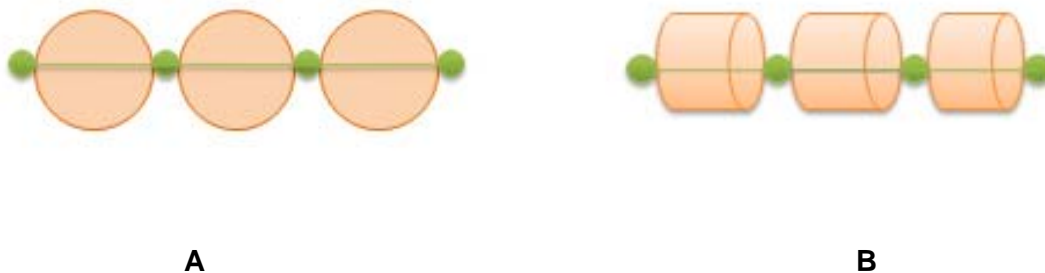
Otro aspecto a tener en cuenta dentro del método, es cuando dos nodos son afectados por la acción externa y en diferentes direcciones. En esta situación, suponiendo que los nodos afectados son  $n_i$  y  $n_k$ , se propaga de igual manera que la descrita anteriormente desde el nodo  $n_i$  hacia  $n_k$  y de  $n_k$  hacia  $n_i$  donde el desplazamiento final de los nodos que se encuentran entre  $n_i$  y  $n_k$  será el promedio del movimiento provocado por ambas propagaciones [11], para los demás nodos de la cadena se calcula su posición mediante la propagación del desplazamiento desde uno de los nodos afectados hasta el extremo correspondiente [12].

El método FTL, aunque es notable la falta de simulación física, permite modelar el hilo y hacer complejos nudos a velocidades interactivas factibles para la simulación en tiempo real [3].

## 1.3 Detección y tratamiento de Colisiones

Una de las prioridades de todas las simulaciones de hilo está en como reconocerá y actuará frente a una colisión con otro objeto o superficie, también como manejaran las auto-colisiones. Una tendencia muy generalizada para el trabajo con colisiones es el uso de jerarquías de envolturas geométricas. Se trata de asumir el cuerpo modelado como una figura geométrica o como un conjunto de ellas obviando las irregularidades de su superficie, de esta forma es más fácil detectar cualquier contacto con la primitiva que con la superficie irregular del objeto en cuestión.

En muchos casos a la hora de tratar la detección de colisiones de una simulación de hilo es usada la esfera (Figura 3.A), aún cuando se considera la peor primitiva geométrica envolvente para el trabajo con segmentos. Esto ocurre sobre todo para simplificar la estructura del hilo cuando este no es muy largo y son usados pocos puntos, en estos casos la solución puede ser efectiva, no siendo así cuando el número de puntos aumenta. [3]



**FIGURA 3:** Uso de primitivas geométricas **A:** Esféricas **B:** Cilíndrica.

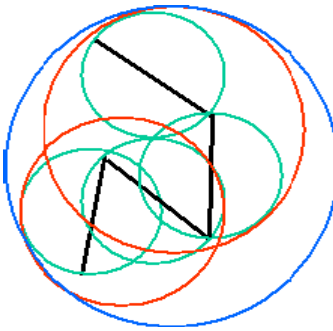
Otros métodos de detección de colisiones usan el cilindro como primitiva geométrica (Figura 3.B), esta solución suele ser más efectiva que el trabajo con esfera. Una vez detectadas las colisiones generalmente se asumen fuerzas de impulso generadas por el impacto, que intentaran restaurar el estado de no contacto inicial y modelan la fricción resultante de los continuos contactos como una fuerza disipativa. [3]

A partir de esta idea se han generado diferentes métodos para detectar y tratar colisiones, aunque existen otros que no utilizan el trabajo con primitivas y pueden ser en dependencia de las necesidades más o menos eficiente.

## 1.3.1 Métodos de detección y tratamiento de Colisiones y Auto-Colisiones en hilos

### ➤ Jerarquías Volumen-Frontera (BVH)

BVH (del inglés Bounding-Volume Hierarchy) consiste en la construcción de una jerarquía de representación de fronteras basada en esferas (u otra figura Eje: cubos) como primitiva geométrica. BVH construye un árbol binario que determina la jerarquía de esferas envolventes, con una esfera raíz que contendrá el hilo entero o sea todas las esferas. [12] [18]



**FIGURA 4:** Jerarquía de esferas BVH. [12]

Cuando se trabaja con objetos deformables –como es el caso del hilo de sutura – la geometría no es constante, se encuentra sujeta a cambios circunstanciales, esto puede llevar a una reestructuración constante de la jerarquía de esferas lo que puede significar una operación bastante costosa. Sin embargo como la secuencia del hilo es fija se construye BVH con una topología invariable con el objetivo de que al sufrir el hilo alguna deformación solo deberá actualizarse la posición y el volumen de la esfera, no reconstruir todo el árbol jerárquico. [18]

### Colisiones

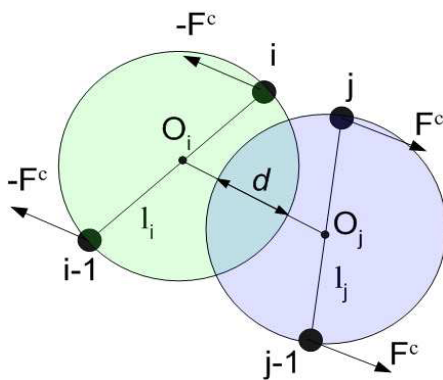
Para detectar si hay colisión con otro objeto BVH propone un método recursivo que tendrá como parámetros la esfera raíz del hilo y la raíz del árbol del otro objeto.

Una de las principales ventajas que presenta este método es que posee rutinas de búsqueda considerablemente sencillas, usando la representación de fronteras para ignorar todo lo que quede dentro de las esferas, una táctica que garantiza mejor la representación geométrica aproximada del interior de objetos con varios niveles de detalles. [18]

## Auto-colisiones

Para la detección de las auto-colisiones se mantiene la estructura de datos utilizada, o sea un árbol binario cuya raíz es una esfera que engloba todas las esferas que cubren el hilo. El método para detectar la auto-colisión guarda mucha relación con el de colisión, solo varía el segundo de los dos parámetros, en el lugar de la raíz de otro objeto es pasada la raíz del hilo, lo que indica que no va a buscarse una colisión con otro objeto si no con el mismo hilo, ejemplo: Asumiendo R como raíz entonces el método sería `Buscar_Colision(R;R)`. Una vez que se detecta un par de esferas que colisionan se guardan en una lista que luego será usada para modificar la fuerza de reacción (Figura 5) [18].

Un enfoque usual para el tratamiento de las colisiones es el uso de una fuerza de contacto  $F^c$  que se crea al colisionar dos esferas y que es utilizada para volver el hilo a la posición de no contacto.



**FIGURA 5:** Fuerza de contacto en un caso de auto-colisiones. [18]

Una vez calculada la fuerza con que colisionaron las esferas es posible restituirlas a su anterior estado usando ese mismo valor en ambos sentidos como muestra en la Figura 5. [18]

En cada movimiento del hilo se actualizará el centro y el radio de la esfera lo que evita tener que construirla cada vez que hay un desplazamiento. Esta operación tiene una complejidad de  $O(n)$ , el método completo para realizar una búsqueda de auto-colisión asumiendo que tenga que ejecutarse tantas veces como sea el peor de los casos toma  $O(n^{4/3})$  lo que le concede un índice de eficiencia bastante alto comparado con otros métodos. [18]

Existen otros casos donde es usado BVH con algunas variaciones. En [12] se utiliza la estructura de este método en un modelo basado en estabilidad de energía, donde no se calculan fuerzas u otro

parámetro físico. En este caso el tratamiento de colisiones se realiza mediante un sistema de cilindros rígidos que se encargan de repeler las partes del hilo en contacto. Cada segmento del hilo poseerá una envoltura cilíndrica con un radio  $R$  y una longitud  $L$  [12].

Cuando es aplicada esta variante de BVH se le adiciona una prueba de colisión teniendo en cuenta los cilindros. Una vez que se detecta que dos esferas hojas están en contacto se procede a realizar esta prueba de los cilindros para garantizar un menor margen de error debido a que las esferas abarcan un área mucho más extensa a la que ocupa la naturaleza geométrica del hilo. [12]

Para realizar esta prueba primero se calcula la distancia mínima entre los segmentos de las esferas en contacto, si es menor que el diámetro de los cilindros envolventes entonces existe auto-colisión. Se considera que un segmento siempre está en contacto con él mismo y con los dos adyacentes a él. [12]

### ➤ Basado en Ángulos

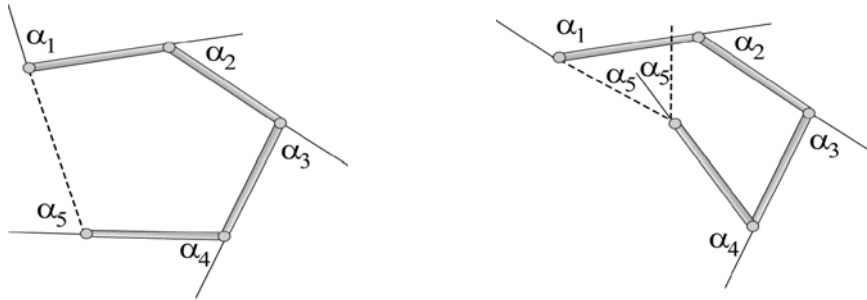
Está basado en el método de Fragmentación Espacial que trata colisiones entre objetos deformables, pero que en su estado primitivo no responde a las necesidades naturales de objetos tan finos como es el caso del hilo ya que utiliza directamente el volumen del cuerpo para crear un sistema de tetraedros y a partir de ahí detectar las colisiones [19].

### Auto-colisiones

El método basado en ángulos es una variante consecuente con la distribución volumétrica del hilo, partiendo de que los segmentos de este que tienen igual tamaño son considerados como particiones regulares del espacio.

Su naturaleza casi unidimensional [12] es utilizada para hacer pruebas rápidas de detección de auto-colisiones, para esto se unen los nodos inicial y final del hilo formando un polígono para así obtener los ángulos formados entre la prolongación de un segmento  $x$  y el segmento consecutivo a este, siempre a favor de las manecillas del reloj, como se muestra en la Figura 6. Si la siguiente ecuación se cumple entonces no hay auto-colisión. [3]

$$\sum_{i=0}^{i < n} \|\alpha_i\| \leq 2\pi \quad (5)$$



**FIGURA 6:** Prueba angular para detectar auto-colisiones. [3]

Cuando los ángulos están a favor de las manecillas del reloj son positivos, en contra son tomados con signo negativo. Si el polígono es convexo (todos los ángulos menores que  $180^\circ$ ) entonces:

$$\left\| \sum_{i=0}^{i<n} \alpha_i \right\| = \sum_{i=0}^{i<n} \|\alpha_i\| \quad (6)$$

Si es cóncavo (algún ángulo mayor que  $180^\circ$ ):

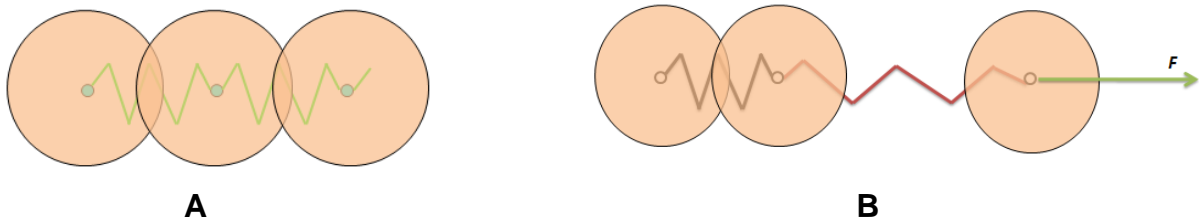
$$\left\| \sum_{i=0}^{i<n} \alpha_i \right\| < \sum_{i=0}^{i<n} \|\alpha_i\|. \quad [3] \quad (7)$$

Como el hilo está modelado en un entorno tridimensional una opción sería definir un plano bidimensional que represente fielmente cada segmento del hilo más el segmento de cierre de forma poligonal, sin perder el signo de los ángulos, pero esto sería bastante costoso para una simple prueba de rechazo por lo que la idea es calcular los ángulos tridimensionales y comprobar si la sumatoria del valor modular de los ángulos es menor o igual que  $360^\circ$  o  $2\pi$ , o sea si no hay auto-colisión. [3]

### ➤ Número de Puntos Adaptativos

Este método surge con el objetivo de tratar colisiones de una forma más sencilla que los métodos tradicionales como el BVH. Sostiene la idea de que las fuerzas y las restricciones no son imprescindibles para el trabajo con colisiones. [20]

Consiste en una secuencia de puntos de control unidos por muelles donde cada punto o nodo posee una envoltura esférica formando una cadena de esferas rígidas sin espacios libres entre esferas consecutivas puesto que su radio es la mitad de la distancia natural del resorte. Figura 7. [20]



**FIGURA 7:** Cadena de esferas rígidas. **A:** Resorte con distancia  $d_0$  **B:** Resorte afectado por una fuerza  $F$ .

Cuando un muelle es extendido como resultado de la acción de una fuerza como se muestra en la Fig. :B, la distancia entre sus dos puntos adyacentes aumenta. Es liberado espacio entre las esferas que circunscriben estos puntos y el modelo queda vulnerable a penetraciones de otros objetos o partes del hilo, puesto que no hay ningún límite rígido que impida atravesarlo. [20] En estos casos se inserta una esfera en el espacio libre y se modifica la estructura de datos que almacena las relaciones entre ellas.

Ejemplo Fig.8 A: Cuando se inserta la esfera 2 se convierte en la nueva izquierda de 3 que antes era 1, la derecha de 1 ahora será 2 y así se reestructurará para cada inserción o extracción como es el caso B, donde el espacio se redujo y la esfera 2 es retirada de la cadena. El número de puntos será adaptativo en función de la extensión o contracción de los resortes. [20]



**FIGURA 8:** Adaptación de puntos de control en una cadena que representa el hilo.

Estas esferas son parte de la topología del hilo, a diferencia de otros métodos donde las primitivas envolventes solo se tienen en cuenta para delimitar el espacio aproximado que ocupa la geometría del objeto a la hora de detectar sus posibles colisiones. [12] [18]

### Auto-colisiones

Usualmente cuando dos esferas colisionan se afecta la trayectoria de cada una, la cantidad de movimiento del sistema y sus fronteras son deformadas, sin embargo este método asume la colisión como un choque elástico, lo que significa sin transformaciones de energía, donde no es considerada la fuerza de fricción u otra fuerza disipativa. La energía cinética se conserva, se redirecciona el sentido del movimiento para crear la repulsión entre las esferas [20].

Este método propone evitar el costo y la complejidad de obtener la dinámica en tiempo real. Durante la simulación del hilo se analiza la trayectoria de cada punto de control y si hay posibilidad de una colisión se crea un intervalo de interpolación donde se ejecuta un simulador de eventos discretos. [20]

### 1.3.2 Nudos

Simular el hilo puede en mayor o menor medida resultar un proceso complicado, sin embargo hacer un nudo y mantenerlo es según opinión de estudiosos del área un proceso bien difícil. [3] [12] [18] [20]. Primeramente debe garantizarse un excelente manejo de auto-colisiones y colisiones para los casos en que el nudo es hecho alrededor de otro objeto, ejemplo sobre el fórceps o incluso sobre un órgano. Mantener el nudo, sin que este se desate y responda a la fuerza con que fue hecho es la parte más engorrosa. La fuerza de rozamiento cumple un papel protagónico en este sentido, es la encargada de establecer una fricción entre las partes del hilo que no permitirá que este se deshaga por si solo.

Muchos modelos responden a la implementación de la física implícita en el comportamiento natural del hilo para simular los nudos en tiempo real. Los métodos basados en transformaciones de energía permiten que la detección y tratamiento de colisiones y auto-colisiones entre cuerpos deformables sea mucho más eficiente. En el caso de BVH descrito en [18], se define previamente las fuerzas en cada segmento del hilo lo que permitirá que a la hora de un contacto existan variaciones de energía que modifiquen el valor de las fuerzas en función del choque y de la cantidad de movimiento del sistema. [18]. En estos casos existirá una fuerza de rozamiento encargada de mantener la posición de nudo que puede adoptar el hilo tras una secuencia determinada de auto-colisiones [18].

Otros métodos en búsqueda de simplificar este proceso descartan las transformaciones de energía, las fuerzas actuantes sobre el hilo, y lo representan como una secuencia de cuerpos rígidos, sean esferas o cilindros que no permitirán penetración entre si o de otros objetos. Estos sistemas asumen las colisiones como choques perfectamente elásticos por lo que no interviene una fuerza de rozamiento para mantener los nudos [12]. Estos modelos no realizan los nudos en tiempo real por lo costosos que pueden resultar [20], esto provoca cambios topológicos bruscos cuando se hacen nudos, causando discontinuidades en la simulación y restando credibilidad a esta. [4]



## 1.4 Recapitulación

A lo largo de la Fundamentación Teórica se hizo un estudio del arte de la simulación de cuerpos finos con el objetivo de determinar la lógica de este proceso y los principales métodos que han sido desarrollados. Una vez conocida la secuencia de pasos necesaria para simular el hilo de sutura se definieron dos posibles topologías para su representación.

Un primer enfoque es representar al hilo como una curva en el espacio. Basados en esta topología se han propuesto modelos que utilizan Splines para conformar una curva continua mediante puntos de control. Algunos de estos modelos utilizan el mecanismo de Lagrange para manejar las fuerzas que actúan sobre puntos de la curva así como de las energías presentes en el sistema [4] [8] [9]. Proponen además restricciones para dar mayor realismo al comportamiento del hilo [8] [9], logrando tiempos de simulación interactivos, así como el manejo de complejas colisiones, aunque no permiten representar la torsión. Otros modelos utilizan BSplines y la aplicación de un modelo adaptativo que modifique solo determinados lugares de la curva [10] permitiendo en tiempo real la simulación de operaciones importantes como el corte y el atado de nudos.

La segunda variante consiste en el uso de cadena de objetos lineales, que pueden ser definidas como un conjunto de puntos unidos por segmentos rectos, entre los principales métodos de deformación que usan esta topología se encuentra el Sigue al Líder (FTL) y el Masa-Resorte.

FTL es aplicado en objetos que se consideran no elásticos y que tienen una deformación ligera y sin estiramiento, donde el movimiento del hilo se realiza a partir del desplazamiento de un punto y su propagación hacia los demás puntos de la cadena manteniendo la distancia original y constante que los separa. Tiene la desventaja de no incluir la simulación física, teniendo menor realismo que otros métodos como Masa-Resorte, pero permite modelar al hilo y atar nudos a velocidades rápidas e interactivas en tiempo real.

Masa-Resorte propone una solución para la deformación de objetos finos bastante recurrente en trabajos previos. [3] Brinda la posibilidad de manejar la física de los cuerpos y de modelar el comportamiento elasto-mecánico del hilo de sutura [2]. Existen además especificaciones para la simulación del hilo como por ejemplo la Dinámica Basada en Posición que propone un sistema de restricciones que delimita su comportamiento [3]. Masa-Resorte permite operaciones de doblado, torsión, extensión y contracción [6].

Para la detección y tratamiento de colisiones se estudiaron fundamentalmente tres métodos que han sido aplicados a hilos. El primero de ellos es el BVH, este método permite asumir transformaciones de energía en las colisiones entre esferas lo que garantiza el trabajo con las fuerzas, incluida la Fuerza de Rozamiento y la obtención de la fuerza de impulso que garantiza el tratamiento de la colisión [18]. Por otra parte presenta la desventaja de que al usar la esfera como envolvente no se garantiza un margen de error pequeño dado que la esfera no es la primitiva geométrica más óptima para un segmento y podrían obtenerse falsas respuestas de colisión [3]. Una variante de BVH que usa cilindros para realizar una segunda prueba de auto-colisión elimina esta vulnerabilidad del método [12]. Se considera a BVH un método generalmente eficiente y con una complejidad temporal aceptable [12] [18].

El segundo de los métodos es el Basado en Ángulos, este se utiliza sobre todo para pruebas de auto-colisión. Es un método sencillo que consume pocos recursos y tiempo pero que puede presentar complicaciones para determinar los ángulos en un entorno tridimensional o resulta costoso llevarlo a un solo plano sin perder la exactitud de los ángulos. Este método además no garantiza el tratamiento de las auto-colisiones una vez detectadas [3].

Por último se analizó el método Puntos Adaptativos el que propone una forma de detectar las colisiones sin tener en cuenta la física del hilo. Garantiza una menor complejidad puesto que elimina algunos costosos cálculos de dinámica a la hora de hacer nudos en tiempo real, aunque la simulación pierde credibilidad.

## CAPITULO II. SOLUCIÓN TÉCNICA

### *2.1 Método de simulación*

Después de un estudio sobre las principales tendencias de la simulación de objetos muy finos se pudo llegar a la propuesta de solución de este trabajo.

Como se explica en el epígrafe 1.1 para la simulación de hilos se debe tener en cuenta primeramente la topología a usar. Dada las dos variantes propuestas por los modelos estudiados se propone usar Cadenas de Objetos Lineales puesto que es la topología que responde a los requerimientos del sistema Masa-Resorte, método de deformación seleccionado para simular el hilo.

Aunque otros métodos como Splines o FTL fueron analizados se llegó a la conclusión de que no se adecúan del todo a las necesidades, exigencias y objetivos de esta investigación. Los Splines son muy utilizados para la representación de objetos finos propensos al doblado como es el caso, sin embargo no permiten representar otros movimientos como la torsión, presenta problemas para detectar y tratar las colisiones y es considerado como un método de deformación geométrica no basado en física [2]. Aunque en algunos casos se proponen especificaciones de Spline que manejan la física implícita en los objetos simulados estos pueden resultar procesos complejos y que requieren de un largo tiempo de estudio y análisis.

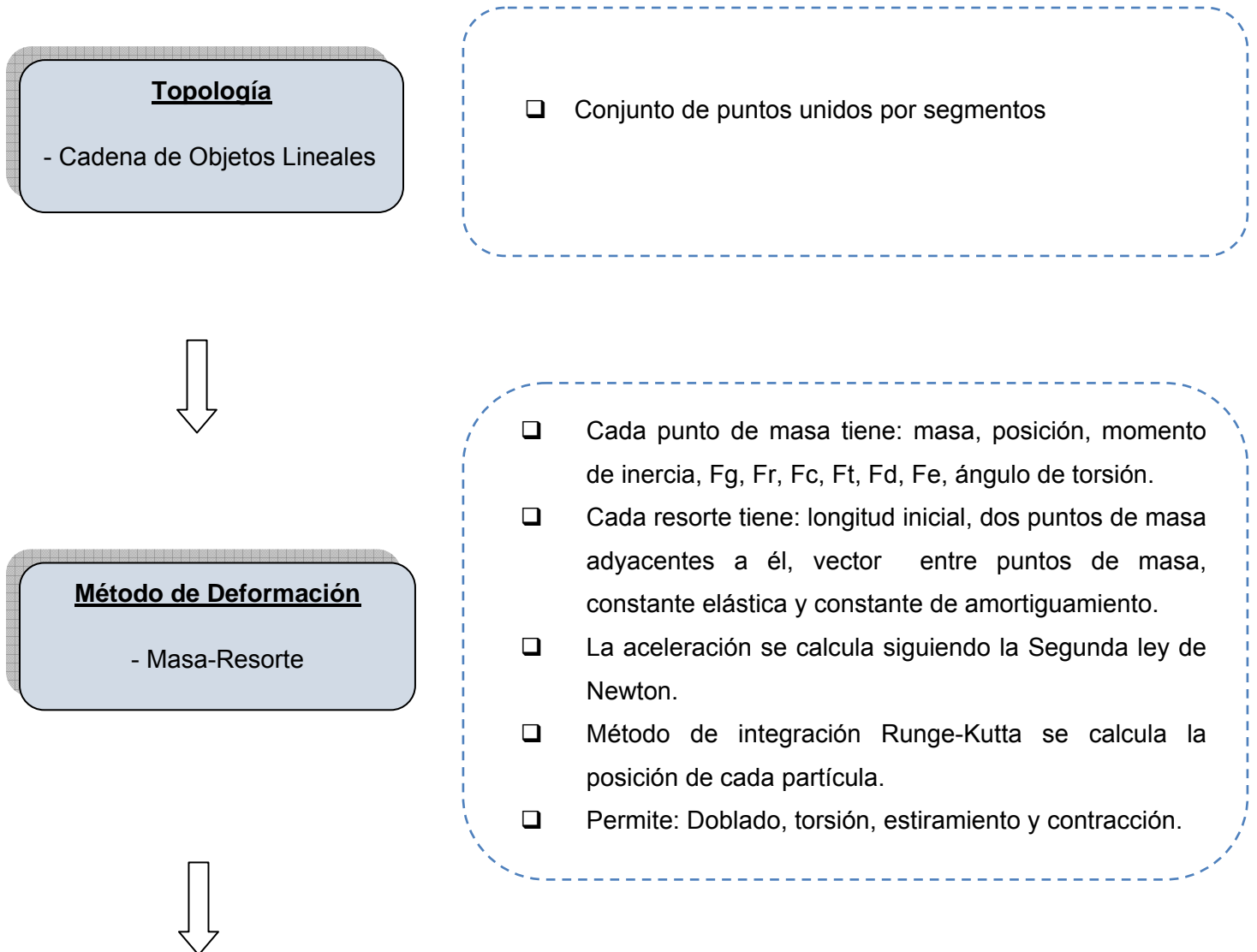
Por su parte FTL es un método que no tiene en cuenta la física de los objetos, en este caso el hilo. Esto resta realismo a la simulación, no permite representar movimientos naturales del hilo como la torsión o estiramiento y aunque es rápido y fácil de implementar no permite grandes deformaciones.

Se decide usar el método de deformación Masa-Resorte dada la necesidad de modelar las fuerzas y energías actuantes en el hilo con vistas a obtener un resultado más coherente con la realidad. Este es uno de los métodos más utilizados en la simulación de objetos con topologías similares a la del hilo, y aunque no es considerado del todo correcto desde el punto de vista físico, resulta una propuesta viable debido a su relativa sencillez y a que brinda resultados confiables en tiempo real.

Para la detección y tratamiento de colisiones se decidió utilizar el método BVH con esferas como primitiva geométrica. Este método permite un manejo de colisiones poco costoso y guarda cierta compatibilidad con el sistema Masa-resorte ya que su forma de manejar las colisiones depende de la fuerza de contacto que genera el sistema Masa-Resorte. Debido a que las esferas no son la mejor

primitiva envolvente como se refleja en el Capítulo I se decidió utilizar una segunda prueba para los casos de auto-colisiones que consiste en una envolvente cilíndrica dentro de cada esfera que acotará el margen de error de las respuestas afirmativas de auto-colisiones.

Como forma general de la solución presentamos un esquema que resume las características a considerar en el proceso de simulación:



**Colisiones**

-BVH  
-Cilindros

- Crea una esfera sobre cada segmento.
- Cada esfera tiene: radio, centro.
- Cada dos esferas construye una nueva hasta lograr una esfera que circunscriba todo el hilo.
- Crea un Árbol Binario Balanceado.
- Cuando hay contacto existe: vector penetración, Fuerza de Contacto.
- La Fuerza de Contacto se utiliza para repeler las esferas.
- Cilindros envolventes para refinar respuesta de auto-colisión.

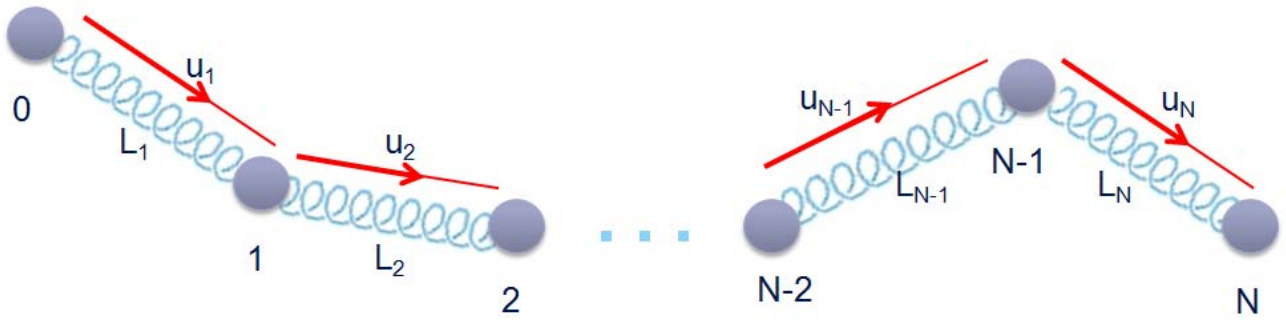
**FIGURA 9:** Esquema del método de simulación seleccionado.

## 2.2 Características Generales

### ➤ Masa-Resorte

Masa-Resorte utiliza una estructura topológica formada por una secuencia de puntos conectados por segmentos a quienes llamará puntos de masa y resortes, respectivamente. En el caso particular del hilo serán utilizados un número  $N$  de puntos de masa donde cada punto  $i$  con valores entre  $0$  y  $N$  tendrá una masa  $m_i$ , una posición  $x_i$  dada por valores en cada uno de los tres ejes coordenados, un momento de Inercia  $I_i$  y un ángulo de torsión  $q_i$ .

Cada resorte  $i$  con valores entre  $1$  y  $N$  conectará dos puntos de masa. La masa de los resortes es considerada nula, su longitud se denota como  $L_i$  y tendrá un vector  $u_i$  que indica la dirección desde el punto de masa  $i-1$  hasta  $i$ .



**FIGURA 10:** Estructura Masa-Resorte aplicada al hilo.

Considerando que cada una de las conexiones es un resorte desde el punto de vista del análisis y la implementación (gráficamente es representado como un segmento) está sujeto a la ley de Hooke, por lo tanto tendrá una constante elástica  $K^e$  y una constante de amortiguamiento  $K^a$  utilizada para restaurar la estabilidad del sistema mediante la disipación de energía.

La utilización de este sistema le da al hilo varios grados de libertad rotacional, este puede estirarse, contraerse, doblarse y torcerse. Para calcular la posición de cada nodo en un tiempo  $t$  determinado se usa la segunda ley de Newton: [18]

$$F_i = m_i \cdot \ddot{x}_i(t) \quad (8)$$

$$\tau_i = I_i \cdot \ddot{q}_i(t) \quad (9)$$

Donde  $F_i$  es la sumatoria de las fuerzas externas actuantes en el punto de masa  $i$ ,  $\tau_i$  es la torsión aplicada a lo largo del hilo.

$$F_i = F_i^e + F_i^d + F_i^t + F_i^r + F_i^c + m_i \cdot g \quad (10)$$

Siendo  $F_i^e$  la fuerza elástica de los resortes que conectan al nodo  $i$ .  $F_i^d$  es la fuerza de doblado,  $F_i^t$  fuerza de torsión,  $F_i^r$  es la fuerza de fricción considerada como fuerza disipativa o fuerza de

amortiguamiento,  $F_i^c$  es la fuerza de contacto generada por una colisión y  $m_i g$  es la fuerza de gravedad [18].

La masa de las partículas será igual a la masa de la cuerda dividida entre la cantidad de partículas [25]. La masa total de la cuerda se obtiene a partir de la relación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Siendo  $\rho$  la densidad del material que conforma el hilo y  $v$  el volumen que se obtiene de la siguiente forma:

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (12)$$

Algunos de los materiales que son usados para la confección de Hilos de Sutura son [25]:

- Polietileno (de alta densidad) 0.95 g/cm<sup>3</sup>
- Nylon 1.15 g/cm<sup>3</sup>
- Poliéster (Politereftalato de etileno, PET) 1.37 g/cm<sup>3</sup>
- Cobre 8.9 g/cm<sup>3</sup>.

### Fuerza Elástica. $F^e$

El estiramiento o compresión de un resorte del sistema afecta a los nodos adyacentes a él. Durante este proceso se genera una fuerza  $F^e$  que actúa directamente sobre los puntos de masa de la forma. [18]

$$F_{i-1}^e = K_i^e \cdot \Delta i \cdot u_i - K_{i-1}^e \cdot \Delta i - 1 \cdot u_{i-1} \quad (13)$$

Donde  $\Delta i$  es la deformación del resorte.

### Fuerza de Doblado. $F^d$

La fuerza de doblado entre dos resortes (Ejemplo: entre  $i-2$  y  $i$  en la fig. 10) se calcula de la forma siguiente:

$$F_{i-1}^d = F_{\beta_{i-2}} + F_{\beta_i} \quad (14)$$

$$F_{\beta_{i-2}} = K_{i-2}^b \cdot (\pi - \beta_{i-2}) \cdot u_{i-1} \times (u_{i-2} \times u_{i-1}) \quad (15)$$

$$F_{\beta_i} = K_i^b \cdot (\pi - \beta_i) \cdot u_i \times (u_i \times u_{i+1}) \quad (16)$$

Donde  $(\pi - \beta_{i-2})$  es el ángulo de doblado. La orientación de la fuerza de doblado es especificada por:

$$u_{i-1} \times (u_{i-2} \times u_{i-1}) \quad (17)$$

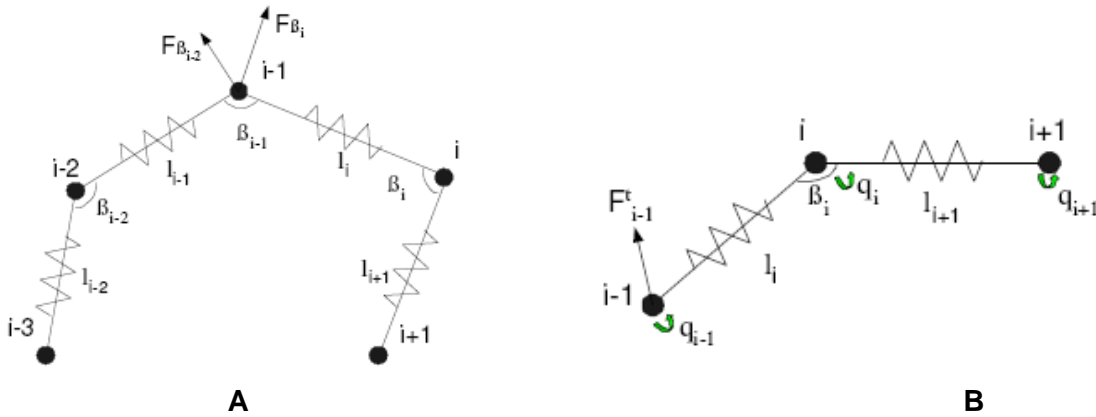


FIGURA 11: A: Ejemplo de doblado. B: Ejemplo de Torcido. [18]

### Fuerza de Torsión. $F^t$

El torque en el punto  $i-1$  es calculado de la siguiente manera:

$$\tau_{i-1}^s = K_{i-1}^{T_1} \cdot (q_i - q_{i-1}) \quad (18)$$

El cálculo de la  $F_{i-1}^t$  en el punto de masa  $m_{i-1}$  está dado por:

$$F_{i-1}^t = K_{i+1}^t \cdot (q_{i+1} - q_i) \cdot \text{sen}(\pi - \beta_i) \cdot (u_{i+1} \times u_i) \quad (19)$$



Donde  $K_{i+1}^t$  es la constante de rigidez del resorte angular,  $(q_{i+1} - q_i)$  es el ángulo de torsión del resorte,  $(u_{i+1} \times u_i)$  es el vector orientación de la fuerza de torsión que actúa en el punto de masa  $m_{i-1}$ .

### **Fuerza de Rozamiento o Fuerza de Amortiguamiento. $F^r$**

En este modelo se consideran las fuerzas disipativas con el objetivo de lograr que los resortes vuelvan a una posición de reposo una vez que han sido afectados por una fuerza y por lo tanto que la reacción no se mantenga de forma indefinida.

En este caso es asumida la fuerza de rozamiento como fuerza de amortiguamiento y calculada de la siguiente forma:

$$F_{i-1}^r = -K^{a^{ex}} \cdot \dot{x}_{i-1}(t) - K^{a^{in}} (\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-2}(t)) \quad (20)$$

Siendo  $K^{a^{ex}}$  la constante de amortiguamiento externo y  $K^{a^{in}}$  es el amortiguamiento dinámico interno.

### **➤ Método de Integración**

Para obtener la posición de cada punto de masa se decidió usar el método de integración Runge-Kutta de orden cuatro. Aunque existen otros métodos de integración como por ejemplo Euler el método Runge-Kutta alcanza niveles de precisión mucho más altos, ya que para cada paso evalúa la función en varios puntos lo que reporta un error no mayor que  $O(h^N)$  para el método con orden  $N$ . [22]

Existen métodos de Runge-Kutta de distintos órdenes, los cuales se deducen a partir del desarrollo de la serie de Taylor. Runge-Kutta de orden uno se comporta igual al método básico de Euler puesto que evalúa la función solamente una vez [23].

El orden cuatro de este método resulta más estable y a la vez mucho más preciso [22], además es uno de los procedimientos más difundidos y a la vez más exactos para obtener soluciones aproximadas al problema de valor inicial  $y' = f(x, y)$ ,  $y(x_0) = y_0$  [23].

Este método consiste en determinar las constantes adecuadas para que la fórmula siguiente coincida con un polinomio de Taylor de cuarto grado. Adaptando las ecuaciones generales de este método para

calcular la velocidad y la posición de una partícula en un tiempo  $t+1$  se utilizan las siguientes ecuaciones. [24]

$$x^{t+1} = x^t + \frac{\Delta t}{6}(a_1 + 2b_1 + 2c_1 + d_1) \quad (21)$$

$$v^{t+1} = v^t + \frac{\Delta t}{6}(a_2 + 2b_2 + 2c_2 + d_2) \quad (22)$$

Donde:

$$a_1 = v^t \quad a_2 = f(x^t, v^t)/m \quad (23)$$

$$b_1 = v^t + \frac{\Delta t}{2}a_2 \quad b_2 = f\left(x^t + \frac{\Delta t}{2}a_1, v^t + \frac{\Delta t}{2}a_2\right)/m \quad (24)$$

$$c_1 = v^t + \frac{\Delta t}{2}b_2 \quad c_2 = f\left(x^t + \frac{\Delta t}{2}b_1, v^t + \frac{\Delta t}{2}b_2\right)/m \quad (25)$$

$$d_1 = v^t + \Delta t c_2 \quad d_2 = f(x^t + \Delta t c_1, v^t + \Delta t c_2)/m \quad (26)$$

Este método es usado con el objetivo de obtener resultados más reales aunque para sistemas sencillos se recomienda usar Euler debido a que ejecuta muchos menos cálculos. Aunque Runge-Kutta de orden cuatro posee una mayor complejidad se prefiere utilizar en sistemas con grandes posibilidades de inestabilidad como puede ser el caso del hilo utilizando masa-resorte. No es necesario, ni recomendable utilizar órdenes mayores en este método debido a que el costo computacional supera las posibles ventajas de una mayor exactitud. [22] [23]

### ➤ Jerarquías Volumen-Frontera (BVH)

El método BVH crea una esfera envolvente para cada segmento del hilo. Su diámetro es igual a la longitud natural del resorte por lo que ante una extensión o contracción este puede variar en función de la nueva longitud. En caso de que el hilo sea movido el centro de cada esfera se reposicionará. BVH

genera un árbol binario que recogerá todas las esferas del hilo como se muestra en la fig. 4 y que permitirá un trabajo más eficiente y rápido con la estructura. Para la detección de colisiones se propone un algoritmo con dos parámetros iniciales, la esfera raíz del hilo y la raíz del árbol de otro objeto.

En un principio este método detecta si la esfera raíz está en contacto, si no lo está termina, sino reduce el área de búsqueda a sus dos hijos y continua ejecutando el método recursivamente hasta que la raíces sean una hojas, entonces se habrá detectado la esfera específica que ha sido afectada en cada árbol, o sea en cada objeto. Una vez se tenga esta información se guardan las dos esferas en contacto para luego aplicarle la fuerza de repulsión. [18]

La fuerza del contacto que se utiliza para devolver el hilo al estado inicial o de no contacto se obtiene de la siguiente forma:

$$F_i^c = k^c e^{k^o d} \cdot o_{ij} \quad (27)$$

Donde  $K^c$  es la constante elástica en la colisión,  $d$  es la profundidad del contacto y  $O_{ij}$  es el vector unitario de dirección entre  $O_i$  y  $O_j$  como se muestra en la fig. 4.

### ➤ Cilindros Envoltentes

Aunque BVH es considerado un método eficiente en el caso de objetos finos, puede presentar incongruencia en las respuestas de colisiones debido a que el área de las esferas es mucho más grande que la de los segmentos del hilo. Para refinar la respuesta de auto-colisiones y disminuir el margen de error se decidió implementar además un sistema de cilindros envoltentes que por su distribución volumétrica se adecúan mucho más a la topología de los segmentos y por lo tanto pueden garantizar con un mínimo de error que existe o no existe una auto-colisión.

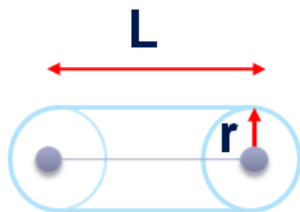


FIGURA 12: Envoltura cilíndrica.

Cada cilindro tendrá una longitud  $L$  que se corresponde con la longitud del muelle y un radio  $r$  constante para todo el hilo.

Los cilindros son utilizados una vez se detecta que dos esferas del mismo hilo están colisionando para realizar una segunda prueba de auto-colisión y definir si la respuesta afirmativa de colisión de BVH es verdadera o no.



**FIGURA 13:** **A:** Falsa respuesta de colisión dada por BVH. **B:** Respuesta de colisión generada por cilindros.

Como muestra la fig. 11 los cilindros permiten que dos segmentos se aproximen entre ellos hasta estar casi unidos antes de generar una fuerza de repulsión, esto garantiza un mayor grado de credibilidad y realismo. Para definir si existe auto-colisión mediante las envolturas cilíndricas se asume que si la distancia mínima entre los dos segmentos es menor que el diámetro de los cilindros entonces están en contacto. Esta prueba tampoco es del todo efectiva como se muestra en la figura 13: B pero arroja resultados mucho más fidedignos que las esferas.

Este método se usa como complemento de BVH ya que por si solo no garantiza el tratamiento de colisiones y al no responder a una estructura jerárquica las búsquedas de pares colisionantes con cilindros serían exhaustivas y muy costosas. Por esta razón una vez que se realiza la prueba de los cilindros si se corrobora que los segmentos están en contacto se adiciona el par de esferas en cuestión a la lista de los pares colisionantes para posteriormente generar la fuerza de repulsión. En caso de que la respuesta de colisión sea negativa las esferas no son adicionadas a la dicha lista.

### ➤ Colisión con los planos

En determinadas circunstancias el hilo deberá interactuar con distintos planos que representan superficies sólidas, si no existe una fuerza de repulsión entre el hilo y el plano se interceptan dando la sensación de

que el hilo atravesara el plano. Para impedir que esto suceda se decidió implementar una fuerza de contacto con los planos que actuará de forma perpendicular a este, acompañada de una fuerza disipativa que se encargará de ir reduciendo el efecto de la fuerza con el plano.

## *2.3 Consideraciones Técnicas*

Para la implementación de la solución propuesta se decidió utilizar:

- Proceso unificado de desarrollo de Software (RUP) mediante la herramienta Rational Rose Enterprise para llevar a cabo la ingeniería de software y guiar el proceso de desarrollo.
- Paradigma de programación orientada a objeto (OOP).
- Leguaje de programación C++ debido a que es el lenguaje por excelencia utilizado para los gráficos por computadora.
- OpenGL como API gráfica debido a que el modelo a implementar posee una topología relativamente sencilla de representar, lo que hace que por el momento no sea preciso utilizar otros motores gráficos de muy alto nivel como OGRE 3D.
- Herramienta Microsoft Visual Studio C++.NET como ambiente de desarrollo, aunque se estandariza el código al usar lenguaje C++.
- Biblioteca SDL para la captura de eventos asociados a la aplicación.

## *2.4 Algoritmo básico para la simulación*

- 1- Conocer los nodos afectados por fuerzas externas (pinzas, mouse, etc.)
- 2- Detectar auto-colisiones o colisiones con otros objetos .
- 3- Calcular fuerza de contacto entre segmentos colisionantes.
- 4- Calcular la fuerza total aplicada a cada nodo (fuerza elástica, fuerza de doblado, fuerza de torsión, fuerza de contacto, fuerza de fricción interna y externa).
- 5- A partir de la fuerza total obtener la aceleración siguiendo la segunda ley de Newton y con el  $dt$  (tiempo entre loops) integrar para obtener la posición y ángulos de torsión de cada nodo.
- 6- Dibuja el hilo con la nueva posición de cada punto.

## CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

### 3.1 Modelo del Dominio

#### 3.1.1. Reglas del Negocio

1. La cantidad de segmentos del hilo debe ser un número par que sea potencia de dos para que el árbol binario del método de detección y tratamiento de colisiones sea balanceado.
2. El número de puntos de masa igual al número de segmentos más uno.
3. Las fuerzas que se tendrán en cuenta para cada punto de masa son: Fuerza de gravedad, Fuerza elástica, Fuerza de torsión, Fuerza de doblado, Fuerza de contacto y Fuerza de rozamiento o fuerza disipativa.
4. El hilo deberá interactuar con objetos que tengan implementado BVH con esferas para poder detectar eficientemente las colisiones.
5. Los valores de las magnitudes y constantes deben estar en los rangos especificados a continuación.

Ke: {10, 2000}

Ka Ext: {0, 1}

Kc: {10, 50}

Kd: {0.0001, 0.01}

Ka Int: {0, 1}

r del hilo: {0, 1}

#### 3.1.2. Modelo del dominio

Como el objetivo general de este trabajo es obtener un hilo que será integrado posteriormente a un módulo y por lo tanto no conduce a un producto final no es posible definir un negocio. Por esta razón se decide realizar un modelo del dominio que garantice el manejo de los principales conceptos con los que se trabajará a lo largo del proceso de desarrollo y que además permitirá a otros desarrolladores entender el proceso desde la base.

Este modelo del dominio permitirá la comprensión de los principales requisitos del modelo y garantizará un primer acercamiento a las clases que serán definidas en etapas posteriores de desarrollo.

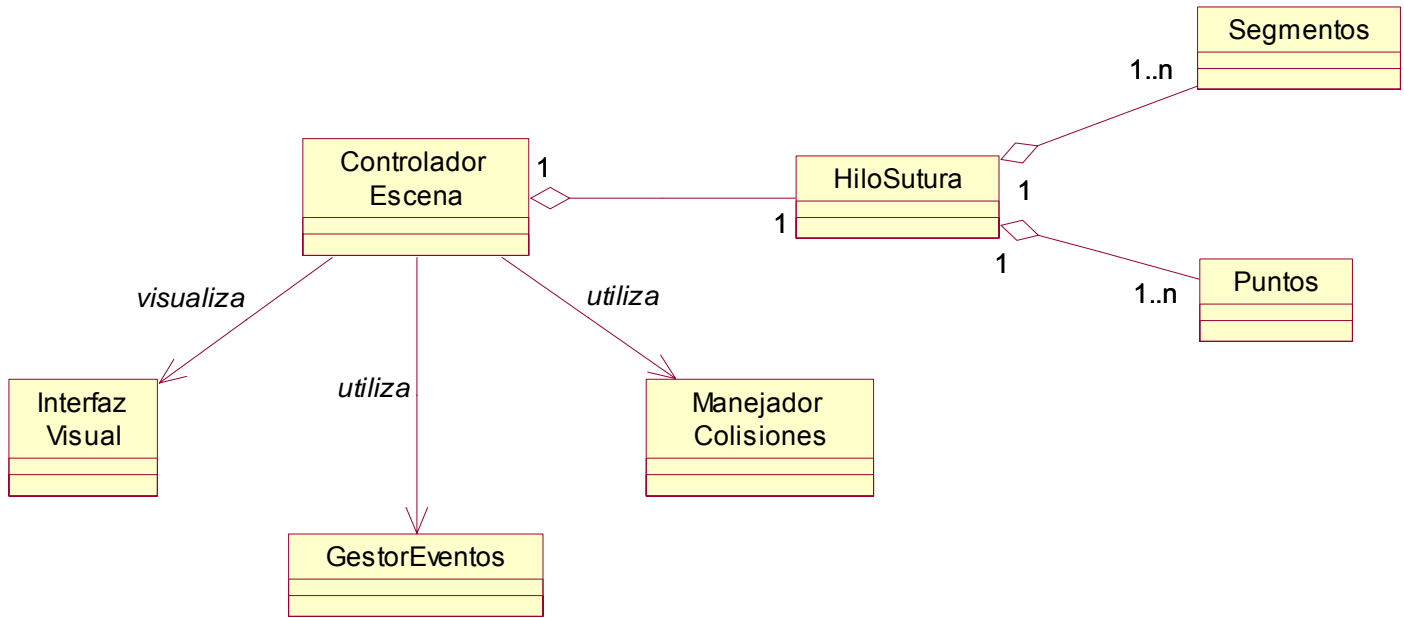


FIGURA 14: Modelo del Dominio.

## 3.2 Requerimiento

### 3.2.1. Requisitos Funcionales

#### 1. Configurar hilo.

- Seleccionar textura.
- Seleccionar material.

#### 2. Representar visualmente el hilo.

#### 3. Mover Hilo

- Seleccionar hilo.
- Arrastrar hilo.
- Soltar hilo.

#### 4. Actualizar posición de los puntos.

- Calcular las fuerzas que actúan en cada punto.
- Integrar para obtener posición de cada partícula.

#### 5. Manejar colisiones.

- Detectar auto-colisiones y colisiones con objetos externos.
- Calcular fuerza de repulsión entre segmentos en contacto.

### 3.2.2. Requisitos no Funcionales

1. **Usabilidad:** Los usuarios que interactúen con el sistema deberán poseer conocimientos de programación, de matemática y física aplicada a modelos de realidad virtual así como estar familiarizados con la terminología estándar utilizada. Para usar este modelo en función de otro módulo deberá realizarse con un alto nivel de flexibilidad y adaptabilidad tanto desde el punto de vista del diseño como de la implementación para garantizar que sea viable y cómodo trabajar con este sistema.
2. **Rendimiento:** Debido a que el modelo es implementado para ejecutarse en tiempo real este deberá ganar en la velocidad de procesamiento, para ello es preciso la optimización a la hora de implementar el cálculo de las fuerzas y las posiciones del sistema para disminuir el tiempo de respuesta y recuperación, garantizar la disponibilidad y ganar realismo en la simulación.
3. **Soporte:** Deberá ser compatible con Windows aunque en próximas versiones del producto deberá poder adaptarse a una plataforma de Software libre como por ejemplo Linux.
4. **Portabilidad:** Se utilizará el paradigma de la programación orientada a objetos y el lenguaje C++ para garantizar que el modelo sea compatible con otros sistemas operativos así como otras herramientas de desarrollo gráfico
5. **Legales:** Para la confección del documento presente se tendrán en cuenta las estipulaciones requeridas en estos casos como forma, estructura, derechos de autor, estándares según las exigencias de la norma ISO 690.
6. **Software:** Para el desarrollo se utilizará: Sistema Operativo: Microsoft Windows, herramienta Microsoft Visual Studio 5.0 C++.NET 2005, OpenGL y Rational Rose.



### 3.2.3. Diagrama de Casos de Uso del Sistema

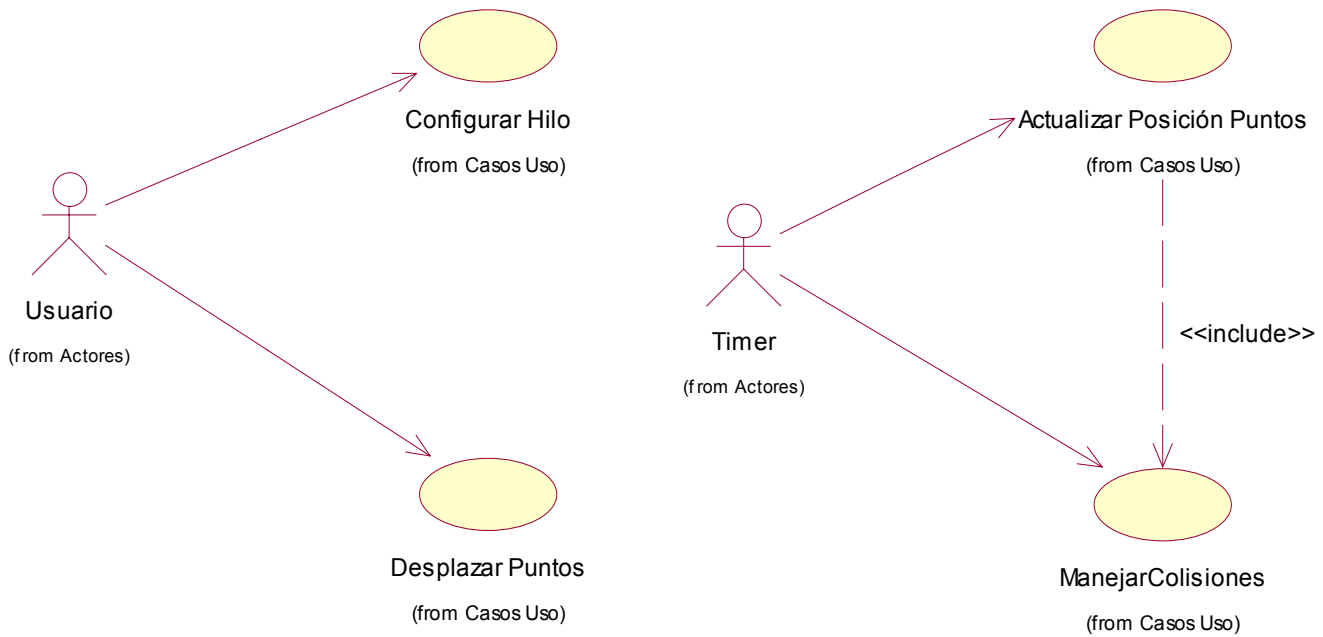


FIGURA 15: Diagrama de casos de Usos del Sistema

### 3.2.4. Modelo de Casos de Uso del Sistema

Actor	Justificación
Usuario	Configurará y moverá el hilo
Timer	Dada una acción (informar que ha transcurrido una unidad de tiempo) se actualizará la posición de los puntos.

TABLA 1: Actores del sistema

## Expansión de Casos de Usos del Sistema

Caso de Uso 1	
<b>Nombre</b>	<b>Configurar Hilo</b>
<b>Actor</b>	Usuario
<b>Propósito</b>	Configurar y visualizar el hilo.
<b>Resumen</b>	El caso de uso comienza cuando el usuario selecciona los datos para configurar el hilo y posteriormente visualizarlo.
<b>Pre-Condiciones</b>	Interfaz abierta.
<b>Post-Condiciones</b>	Representación visual del hilo según la configuración hecha.
Curso Normal de los eventos	
Acción del Actor	Respuesta del Sistema
1- El Usuario llama al formulario Configurar Hilo.	
	2- Muestra formulario de Configuración.
3- El usuario selecciona las opciones brindadas para el tamaño del hilo.  1- Grande 2- Mediano 3- Pequeño	
4- Selecciona el material del que estará hecho el hilo.  1- Polietileno 2- Nylon 3- Poliéster	

4- Algodón	
5- Cobre	
5- Selecciona la opción visualizar hilo o salir.	
	6- Se modifican las variables del hilo en función de la selección del tamaño y el material.
	7- Representa visualmente el hilo según los datos recibidos.
<b>Curso Alternativo</b>	
<b>Acción del Actor</b>	<b>Respuesta del Sistema</b>
<b>Prioridad</b>	Crítico

**TABLA 2:** *Expansión del CU 1*

<b>Caso de Uso 2</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Desplazar Puntos</b>
<b>Actores</b>	Usuario
<b>Propósito</b>	Mover el hilo
<b>Resumen</b>	El caso de uso comienza cuando el usuario selecciona un(os) punto(s) del hilo y lo arrastra provocando una traslación del hilo.
<b>Pre-Condiciones</b>	El hilo debe estar creado. Debe existir un cursor u otro dispositivo de entrada. Debe visualizarse la pinza.
<b>Post-Condiciones</b>	Cambio de posición de los puntos del hilo.
<b>Curso Normal de los eventos</b>	
<b>Acción del Actor</b>	<b>Respuesta del Sistema</b>

1- El usuario selecciona uno o varios puntos del hilo con la pinza.	
	2- Verifica si la pinza está presionando alguna parte del hilo.
	3- Muestra la fragmento del hilo seleccionado.
4- Mueve el hilo.	
	5- Se obtiene fuerza con que la pinza actúa sobre el hilo.
<b>Curso Alternativo</b>	
<b>Acción del Actor</b>	<b>Respuesta del Sistema</b>
	3- No muestra ninguna selección.
<b>Prioridad</b>	Secundario

**TABLA 3:** *Expansión del CU 2*

<b>Caso de Uso 3</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Actualizar posición de puntos</b>
<b>Actores</b>	Timer
<b>Propósito</b>	Actualizar la posición de cada punto del hilo en cada ciclo.
<b>Resumen</b>	Una vez que el timer de la máquina señala el transcurso de n unidades de tiempo se actualizará la posición de los puntos del hilo.
<b>Pre-Condiciones</b>	Presencia de Timer. Que ya se haya creado el hilo.
<b>Post-Condiciones</b>	Reposicionamiento de los puntos del hilo.
<b>Curso Normal de los eventos</b>	

<b>Acción del Actor</b>		<b>Respuesta del Sistema</b>
1- El timer de la máquina dicta el paso de n unidades de tiempo.		
		2- Calcula dt.
		3- Se calcula la fuerza de gravedad.
		4- Se calcula la fuerza de elástica.
		5- Se calcula la fuerza de amortiguamiento o de rozamiento.
		6- Se calcula la fuerza de torsión.
		7- Se calcula la fuerza de doblado.
		8- Se aplica Segunda ley de Newton.
		9- Se aplica método de Integración para obtener velocidad.
		10- Se aplica método de Integración para obtener posición.
		11- Con la nueva posición de cada punto representa la nueva posición del hilo.
<b>Curso Alternativo</b>		
<b>Acción del Actor</b>		<b>Respuesta del Sistema</b>
<b>Prioridad</b>	Crítico	

**TABLA 4:** *Expansión del CU 3*

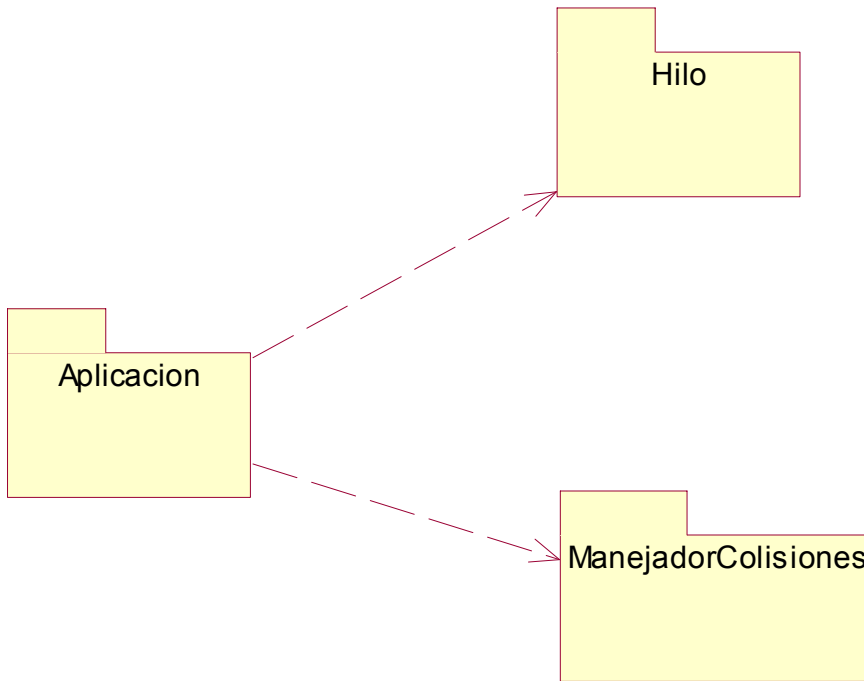
<b>Caso de Uso 4</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Manejar Colisiones</b>
<b>Actores</b>	Timer
<b>Propósito</b>	Detectar y tratar las colisiones.
<b>Resumen</b>	El caso de uso comienza cuando se quiere actualizar la posición de los puntos y se necesita la Fuerza de Contacto. Se busca si existen segmentos colisionando y si existen se calcula la FC para posteriormente separar los segmentos.
<b>Pre-Condiciones</b>	Orden de actualización de los puntos de masa.
<b>Post-Condiciones</b>	Devolución de la Fuerza de contacto en los casos de segmentos en contacto.
<b>Curso Normal de los eventos</b>	
<b>Acción del Actor</b>	<b>Respuesta del Sistema</b>
1- Para calcular la nueva posición de los segmentos del hilo se pide la Fuerza de Contacto.	
	2- Se realiza una búsqueda para detectar pares de esferas colisionantes entre dos objetos (hilo-hilo o hilo-pinza)
	3- Si existen pares de esferas envolventes en contacto de le realiza una segunda prueba de colisión.
	4- Se aplica la prueba de los cilindros para asegurarse de que la respuesta de colisión es verdadera.
	5- Los pares de esferas que se confirme que

	están en contacto serán adicionados en una lista.
	6- Se calcula la penetración entre los pares de esferas en contacto.
	7- Se calcula la Fuerza de Contacto del impacto entre las dos esferas de cada par.
	8- Se devuelve el valor de la Fuerza de contacto de cada nodo.
<b>Curso Alternativo</b>	
<b>Acción del Actor</b>	<b>Respuesta del Sistema</b>
	3- Si no existe ninguna colisión de devuelve una fuerza de contacto en cada punto de masa igual cero.
	5- Si se detecta que la respuesta de colisión dada por las esferas es falsa para algún par, este inmediatamente será desechado y no se adicionará en la lista de pares en contacto.
<b>Prioridad</b>	Crítico

**TABLA 5:** *Expansión del CU 4*

### 3.3 Diseño

#### 3.3.1. Paquetes del Diseño



**FIGURA 16:** Diagrama de Paquetes del Diseño



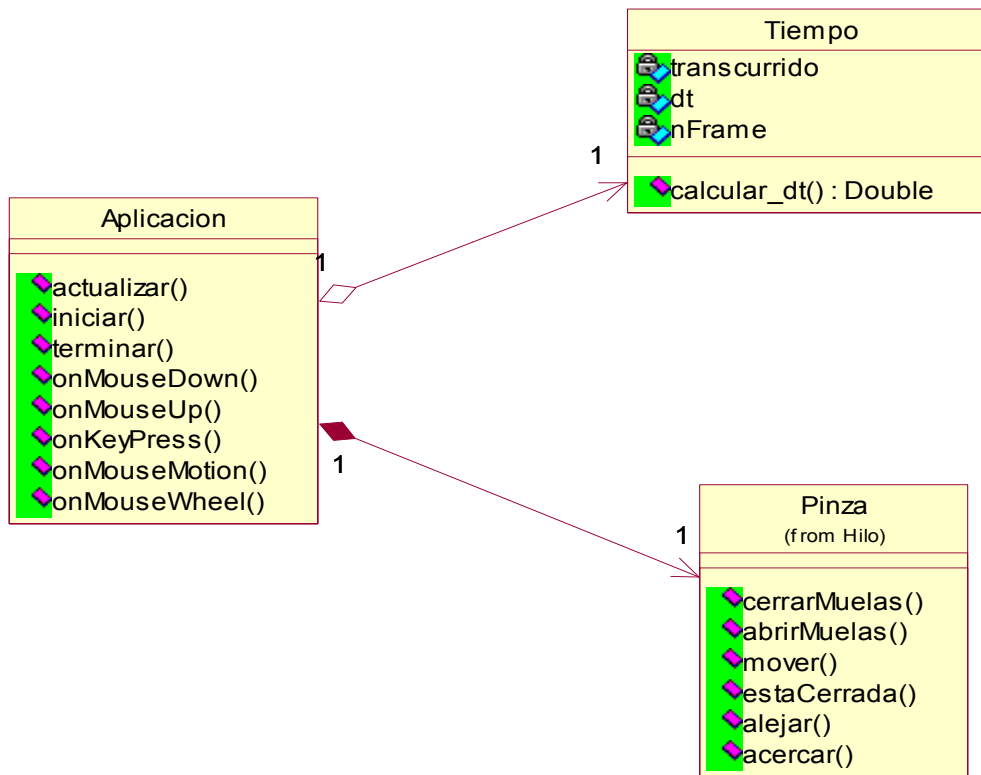


FIGURA 17: Paquete "Aplicación"

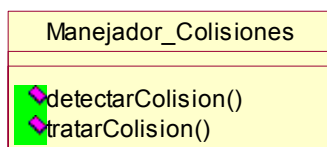


FIGURA 18: Paquete "ManejadorColisiones"

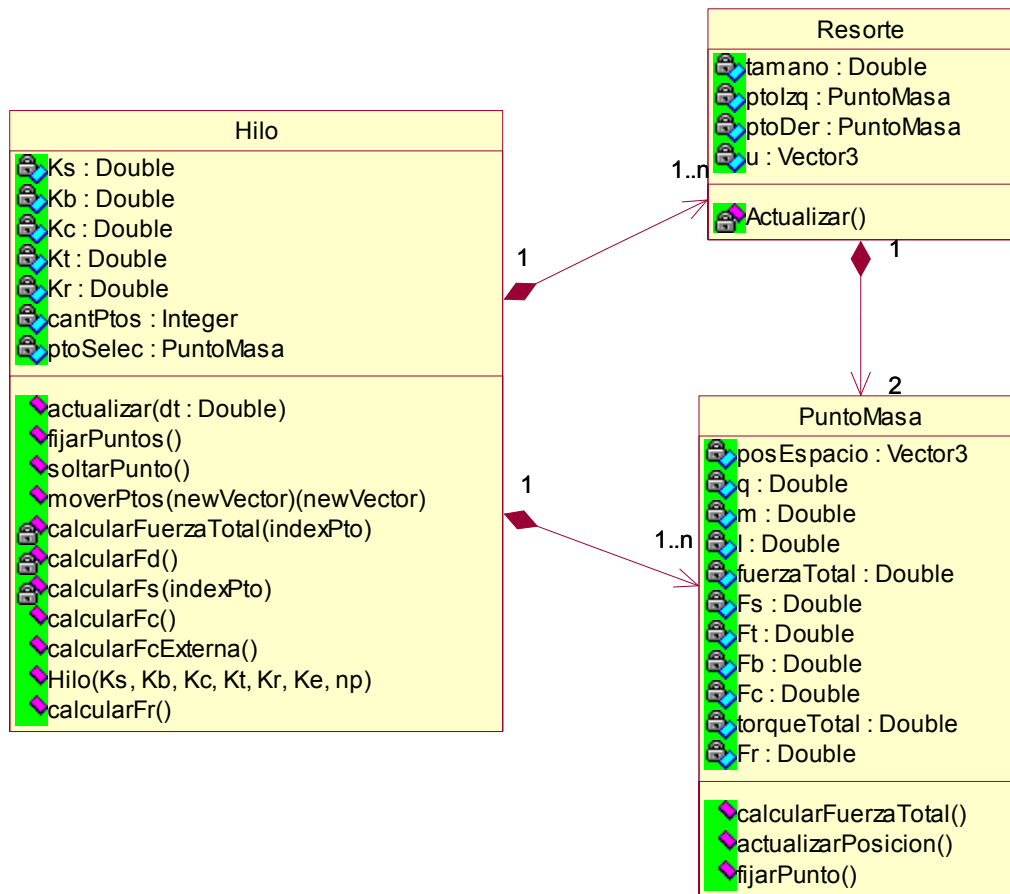


FIGURA 19: Paquete "ObjetosEscena"

### 3.3.2. Diagrama de Clases del Diseño

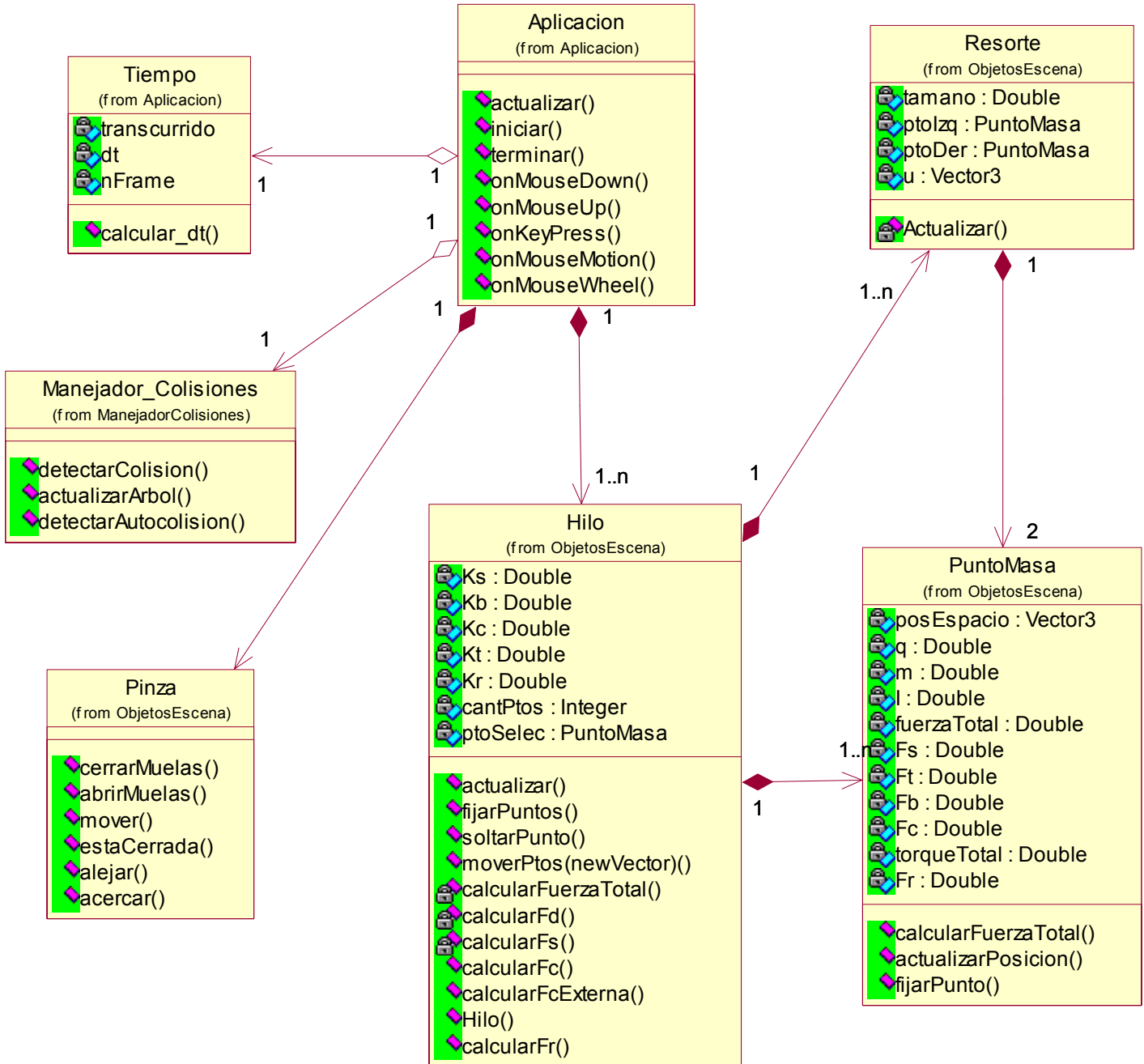


FIGURA 20: Diagrama de clases del diseño.

### 3.3.1. Descripción de las clases del diseño

<b>Nombre de la Clase</b>	Aplicación
<b>Tipo de Clase:</b>	Controladora
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
Actualizar()	Actualiza el árbol BVH del hilo. Indica al manejador de colisiones realizar la detección de auto-colisiones en el hilo y colisiones de este con objetos externos. Calcula el dt entre frames y actualiza los atributos de la clase Tiempo. Actualizar el estado del hilo.
Iniciar()	Crea e inicializa la ventana de visualización, llama al método iniciar del hilo y crea el árbol BVH del hilo.
Terminar()	Termina la Simulación.
OnKeyPress()	Captura evento: tecla presionada.
OnMouseDown()	Captura evento: clic del mouse presionado.
OnMouseUp()	Captura evento: soltar clic del mouse.
OnMouseMove()	Captura evento: movimiento del mouse.
OnMouseWheel()	Captura evento: estado de la rueda del mouse.

**TABLA 6:** Descripción de la Clase del Diseño “Aplicación”

<b>Nombre de la Clase</b>	Tiempo
<b>Tipo de Clase:</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
transcurrido	<b>double</b>
Dt	<b>double</b>
Nframe	<b>double</b>
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
CalcularDt()	Calcula el dt y lo devuelve.

**TABLA 7:** Descripción de la Clase del Diseño “Tiempo”

<b>Nombre de la Clase</b>	ManejadorColisiones
<b>Tipo de Clase:</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
DetectarColision(objE1, objE2)	Busca las esferas en contacto entre dos árboles distintos.
DetectarAutocolision(obj1, bj2)	Hace una búsqueda de las esferas en contacto del árbol BVH del hilo.
ActualizarAbol(arbolHilo)	Actualiza la posición de las esferas según la posición de los puntos.

**TABLA 8:** Descripción de la Clase del Diseño “ManejadorColisiones”

<b>Nombre de la Clase</b>	Pinza
<b>Tipo de Clase:</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
cerrarMuelas()	Método que se encarga de cerrar las dos muelas de la pinza.
abrirMuelas()	Abre las muelas de la pinza.
mover()	Mueve la pinza en dependencia del movimiento del cursor.
estaCerrada()	Responde verdadero si las dos muelas están cerradas, falso si no lo están.
acercar()	Acerca la pinza al hilo siguiendo los eventos del mouse.

**TABLA 9:** Descripción de la Clase del Diseño “Pinza”

<b>Nombre de la Clase</b>	Hilo
<b>Tipo de Clase:</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
Ks	<b>double</b>
Kb	<b>double</b>
Kc	<b>double</b>
Kt	<b>double</b>
Kr	<b>double</b>
cantPtos	<b>integer</b>

PtoSelec	PuntoMasa
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
actualizar(dt : <b>double</b> )	Llama al método calcularFuerzaTotal para todas las partículas del hilo. Actualiza la posición de cada partícula.
fijarPuntos()	Fija puntos seleccionados.
soltarPuntos()	Cambia la selección a falso. Suelta los puntos seleccionados.
moverPtos(newVector)	Este método mueve los puntos a una nueva posición que se pasa por parámetros.
calcularFuerzaTotal(indexP)	Llama al método calcularFuerzaTotal en el punto pasado por parámetro.
calcularFd()	Calcula la fuerza de doblado en un punto de masa.
calcularFs(indexPto)	Calcula la fuerza elástica que actúa sobre un punto de masa.
calcularFr()	Calcula la fuerza de amortiguamiento interno y externo que actúa en un punto de masa.
calcularFc()	Método para determinar la fuerza de contacto que actúa en los puntos adyacentes a un segmento en colisión con otro segmento del hilo. Calcula la penetración y atribuye el valor de Fc calculado a los puntos involucrados.
calcularFcExterna()	Método que calcula la fuerza de contacto en un segmento que colisiona con otro objeto de escena.
Hilo(Ks, Kb, Kc, Kt, Kr, Ke, np)	Constructor del Hilo, crea un objeto de la clase con datos que se pasan por parámetros.

**TABLA 10:** Descripción de la Clase del Diseño “Hilo”

<b>Nombre de la Clase</b>	PuntoMasa
<b>Tipo de Clase:</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
posEspacio	Vector3
q	<b>double</b>
M	<b>double</b>
l	<b>double</b>
fuerzaTotal	<b>double</b>
Fs	<b>double</b>
Ft	<b>double</b>
Fb	<b>double</b>
Fc	<b>double</b>
torqueTotal	<b>double</b>
Fr	<b>double</b>
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
calcularFuerzaTotal()	Calcula todas las fuerzas que actúan en el punto de masa.
actualizarPosicion(double dt)	Aplica el método de integración utilizando el dt que se pasa por parámetro y a partir de la fuerza total en la partícula se obtienen la nueva posición.
fijarPunto()	Fija el punto para que no sea modificada su posición por el método de integración.

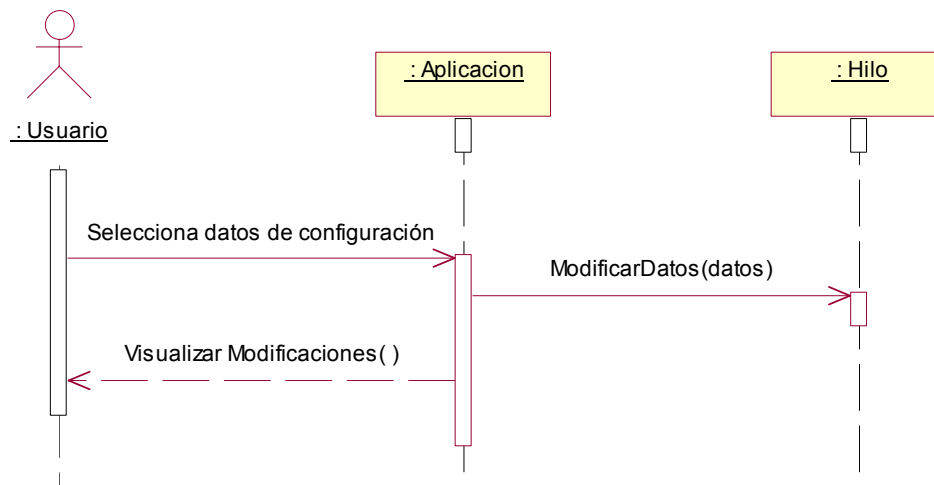
**TABLA 10:** Descripción de la Clase del Diseño “PuntoMasa”



<b>Nombre de la Clase</b>	Resorte
<b>Tipo de Clase</b>	Entidad
<b>Atributos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>
tamano	<b>double</b>
ptolzq	PuntoMasa
ptoDer	PuntoMasa
u	Vector3
<b>Métodos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Responsabilidad</b>
Actualizar()	Calcula la deformación del resorte y actualiza su tamaño a partir de los dos puntos atributos de la clase.

**TABLA 11:** Descripción de la Clase del Diseño “Resorte”

### 3.3.2. Diagramas de Secuencia



**FIGURA 21:** Diagrama de Secuencia “CU Configurar Hilo”

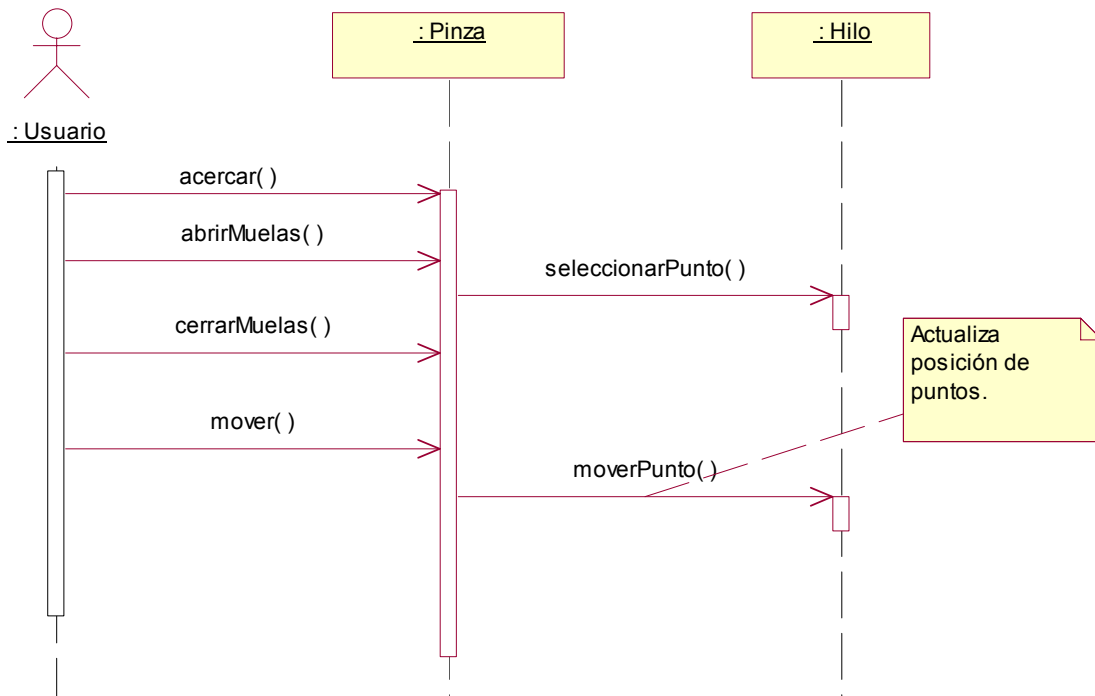


FIGURA 22: Diagrama de Secuencia "CU Desplazar Puntos"

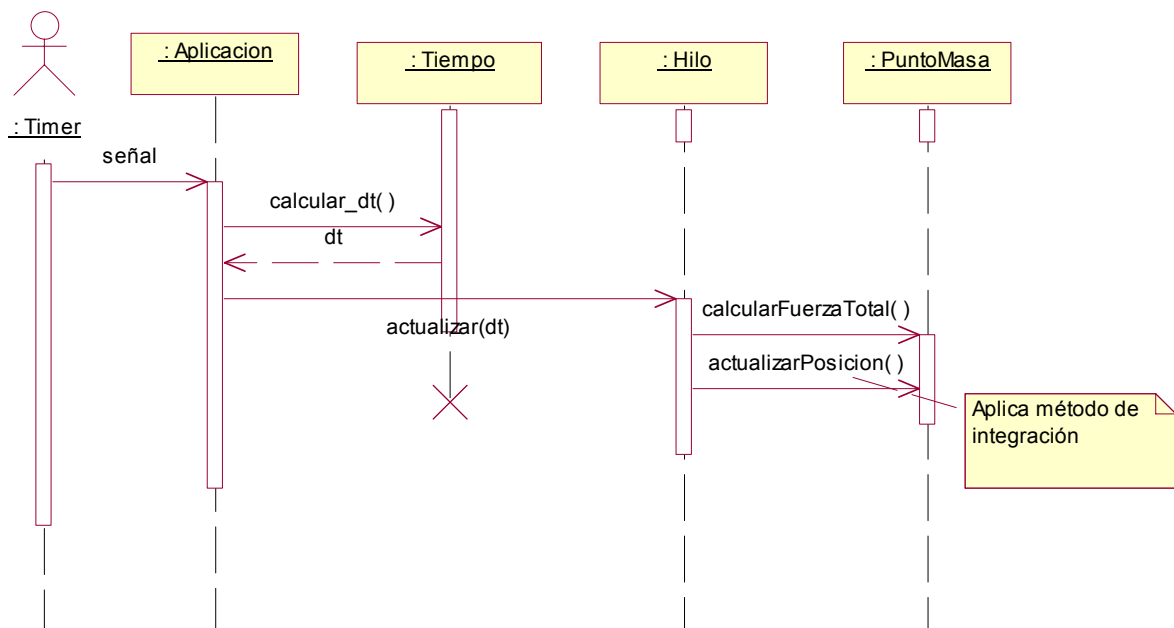


FIGURA 23: Diagrama de Secuencia "CU Actualizar Posición de Puntos"

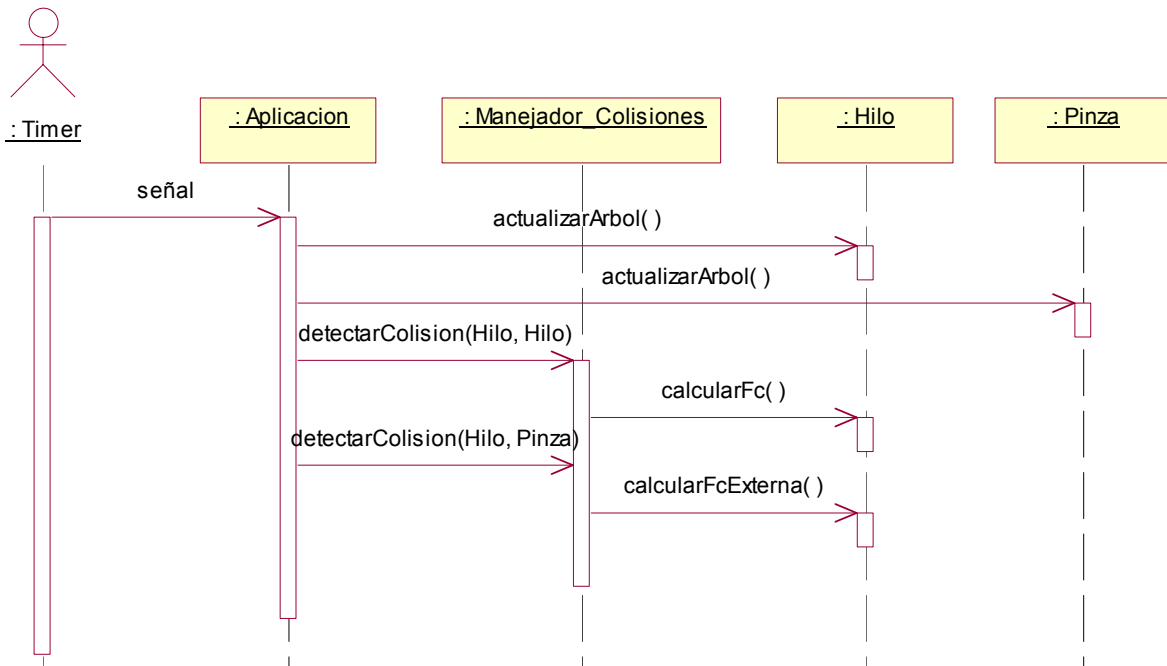
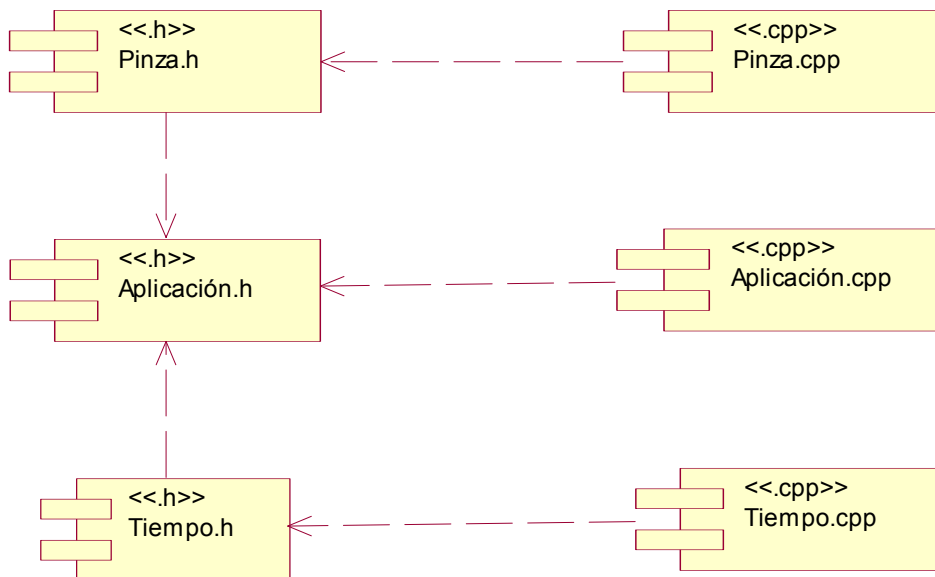


FIGURA 24: Diagrama de Secuencia “CU Manejar Colisiones”

### 3.4 Implementación

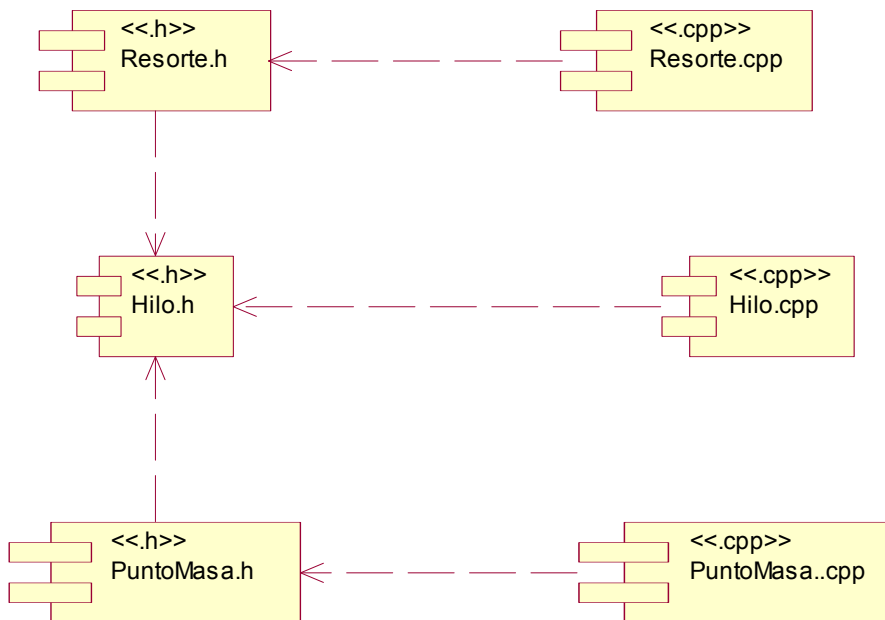
#### 3.4.1. Diagramas de Componentes



**FIGURA 26:** Diagrama de Componentes del Paquete Aplicación



**FIGURA 27:** Diagrama de Componentes del Paquete ManejadorColisiones



**FIGURA 28:** Diagrama de Componentes del Paquete ObjetoEscena

## RESULTADOS

Para desarrollar este trabajo se seleccionó un método de simulación que ha sido implementado previamente, con el objetivo de perfeccionarlo se le adicionaron algunas variantes utilizadas en otros trabajos o en otros tipos de simulación. El primer aporte al método original (Masa-Resorte utilizando BVH) fue la utilización de cilindros envolventes para refinar las respuestas de auto-colisiones. El segundo aporte fue adicionar al modelo una fuerza con los planos para evitar que el hilo penetrara algunas superficies sólidas.

Como resultado final se obtuvo un modelo que responde a la solución propuesta inicialmente en el capítulo dos. Se implementaron todas las fuerzas actuantes en el hilo, exceptuando la fuerza de torsión. Se obtuvo una aplicación que simula el hilo de sutura así como sus interacciones con algunos objetos y que posee una complejidad temporal igual a  $O(n^{4/3})$ .

La aplicación presenta un comportamiento estable y una calidad visual aceptable. Para una computadora con un procesador Intel Pentium 4 con 2.4 GHz de velocidad de procesamiento, una tarjeta de video de 64 Mb y 265 Mb de Memoria RAM se obtuvo un resultado de 47 frame/segundos con una velocidad promedio entre frame de 21 milisegundos.

## CONCLUSIONES

Para dar solución al problema científico que dio origen a este trabajo se llevó a cabo un estudio de los principales métodos utilizados para simular objetos finos, específicamente el hilo de sutura. Después de conocer las posibles variantes a desarrollar se seleccionó el método Masa-Resorte para simular el hilo y BVH para el tratamiento de colisiones. Se implementó el modelo seleccionado y se obtuvo una aplicación que posteriormente será integrada al proyecto Simulador Quirúrgico.

## RECOMENDACIONES

Para futuras versiones de este trabajo se propone estudiar otros métodos que han sido utilizados para la simulación de objetos finos tales como Teoría Cosserat, también se recomienda profundizar en la Dinámica Basada en Posición usando sistemas Masa-Resorte, que además de manejar la física de los objetos propone restricciones de comportamiento con el objetivo de obtener un modelo más coherente.

Se recomienda también hacer un estudio profundo de las magnitudes físicas y constantes utilizadas en el contexto de la realidad virtual para simular el comportamiento real de objetos finos sobre todo contantes elásticas y de amortiguamiento, así como también ahondar en el tema de los nudos, parte imprescindible de la sutura.

Por último se recomienda implementar al menos otro de los métodos más utilizados para la simulación de hilos para establecer comparaciones en función del nivel de realismo y el tiempo de respuesta del sistema en aras de seleccionar con plena seguridad el método más eficiente de cuantos se han utilizado hasta el momento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. CORRADO, J. DELGADO, S. CASTAÑEDA “*Aplicaciones de Realidad Virtual*”. Tecnologías de Realidad Virtual. <http://telematica.cicese.mx/computo/super/cicese2000/realvirtual/Part4.html#IV5>. 2002.
- [2] O. BRETAU, R. RAMIREZ “*Deformación de Objetos para Sistemas de Realidad Virtual*”. UCI 2007.
- [3] KUBIAK, PIETRONI, GANOVELLI, FRATARCANGELI “*A Robust Method for Real-Time Thread Simulation*”. Eurographics, 2008.
- [4] J. LENOIR, P. MESEURE, L. GRISONI, C. CHAILLOU. “*Surgical Thread Simulation*.” Modelling and Simulation for Computer-aided Medicine and Surgery (MS4CMS), vol. 12, 102–107. 2002.
- [5] K. DINESH, PAI. “*Interactive simulation of thin solids using cosserat models*”. Eurographics, 2002.
- [6] MÜLLER, HEIDELBERGER, HENNIX, RATCLIFF. “*Position Based Dynamics*.” J. Vis. Comun. Image Represent. 18, 2, 109–118. 2007.
- [7] F. WANG, E. BURDET, A. DHANIK, T. POSTON y C.TEO. “*Dynamic thread for real-time knot-tying*”. Proc. First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems pp. 507–508. 2005.
- [8] J. LENOIR, P. MESEURE, L. GRISONI, C. CHAILLOU. “*A suture model for surgical simulation*”. In 2nd International Symposium on Medical Simulation (ISMS'04), pages 105{113, Cambridge, Massachusetts (USA), June 17-18 2004.
- [9] Y. REMION, J.M. NOURRIT, D. GILLARD. “*Dynamic animation of spline like objects*”. In WSCG'1999 Conference, pages 426{432, Plzen, February 1999.
- [10] J. LENOIR, L. GRISONI, F. MESEURE “*Adaptive resolution of 1D mechanical B-spline*”. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia (Graphite), Dunedin. France. 2005.
- [11] J. BROWN, K. MONTGOMERY, J-C. LATOMBE, M. STEPHANIDES. “*A microsurgery simulation system*”. MICCAI01, Utrecht, October 2001.
- [12] J. BROWN, K. MONTGOMERY, J-C. LATOMBE. “*Real-time knot-tying simulation*”. The Visual Computer 20, 2-3, 165–179. 2004.



- [13] M. LEDUC, S. PAYANDEH, J. DILL. “*Toward modeling of a suturing task*”. Graphics Interface'03 Conference, pages 273{279, Halifax, June 2003.
- [14] J. SPILLMANN, M. TESCHNER. “*Cosserat Rod Elements for the Dynamic Simulation of One-Dimensional Elastic Objects*”. Eurographics. ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. 2007.
- [15] D. PAI. “*Interactive simulation of thin solids using cosserat models*”. Computer Graphics Forum (Eurographics) 21, 3, 347–352. 2002.
- [16] CAO, LIU, WANG. “*Three dimensional nonlinear dynamics of slender structures: Cosserat rod element approach*”. International Journal of Solids and Structures 43, 3–4, 760–783. 2006.
- [17] S. S. ANTMAN “*Nonlinear Problems of Elasticity*”. Springer Verlag, 1995.
- [18] F. WANG, E. BURDET, R. VUILLEMIN, H. BLEULER “*Knot-tying with Visual and Force Feedback for VR Laparoscopic*”. IEEE Computer Society, 5778–5781. 2006.
- [19] M. TESCHNER, B. HEIDELBERGER, M. MÜLLER, D. POMERANETS, M. GROSS. “*Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects*”. Proceedings of the Conference on Vision, Modeling and Visualization. 2003.
- [20] J. PHILLIPS, A. M. LADD, L. KAVRAKI. “*Simulated knot tying*”. ICRA, IEEE, 841–846. 2002.
- [21] J. T. CHANG, J. JIN, Y. YU. “*A practical model for hair mutual interactions*”. Proc. ACM SIGGRAPH. Eurographics symposium on Computer animation pp. 73–80. 2002.
- [22] L. PUPO, L. REYES “*Módulo para la simulación de la dinámica de los cuerpos-rígidos en entornos virtuales*” Universidad de las Ciencias Informáticas 2007.
- [23] D. G. ZILL. “*Ecuaciones Diferenciales. Aplicaciones de Modelado*”. Loyola Marymount University. International Thomson Editorial. 609 pág. 2006.
- [24] M. MULLER, J. STAM, D. JAMES, N. THUEREY “*Real Time Physics*”. NVIDIA, Cornell University, ETH Zurich. 88 pág. 2004.
- [25] Simulación de una cuerda mediante un Sistema Partículas-Muelles. Métodos Numéricos para SEDOS 2008–2009.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b> Imágenes del hilo de sutura pertenecientes a los simuladores <b>A:</b> Xitact <b>B:</b> Symbionix <b>C:</b> Lapsim	8
<b>FIGURA 2:</b> <b>A:</b> Nodo desplazado por una fuerza externa <b>B:</b> Desplazamiento propagado. [12]	21
<b>FIGURA 3:</b> Uso de primitivas geométricas <b>A:</b> Esféricas <b>B:</b> Cilíndrica.	23
<b>FIGURA 4:</b> Jerarquía de esferas BVH. [12]	24
<b>FIGURA 5:</b> Fuerza de contacto en un caso de auto-colisiones. [18]	25
<b>FIGURA 6:</b> Prueba angular para detectar auto-colisiones. [3]	27
<b>FIGURA 7:</b> Cadena de esferas rígidas. <b>A:</b> Resorte con distancia $d_0$ <b>B:</b> Resorte afectado por una fuerza $F$ .	28
<b>FIGURA 8:</b> Adaptación de puntos de control en una cadena que representa el hilo.	28
<b>FIGURA 9:</b> Esquema del método de simulación seleccionado.	34
<b>FIGURA 10:</b> Estructura Masa-Resorte aplicada al hilo.	35
<b>FIGURA 11:</b> <b>A:</b> Ejemplo de doblado. <b>B:</b> Ejemplo de Torcido. [18]	37
<b>FIGURA 12:</b> Envoltura cilíndrica.	40
<b>FIGURA 13:</b> <b>A:</b> Falsa respuesta de colisión dada por BVH. <b>B:</b> Respuesta de colisión generada por cilindros.	41
<b>FIGURA 14:</b> Modelo del Dominio.	44
<b>FIGURA 16:</b> Diagrama de Paquetes del Diseño	53
<b>FIGURA 17:</b> Paquete "Aplicación"	54
<b>FIGURA 18:</b> Paquete "ManejadorColisiones"	54
<b>FIGURA 19:</b> Paquete "ObjetosEscena"	55
<b>FIGURA 20:</b> Diagrama de clases del diseño.	56
<b>FIGURA 21:</b> Diagrama de Secuencia "CU Configurar Hilo"	62
<b>FIGURA 22:</b> Diagrama de Secuencia "CU Desplazar Puntos"	63
<b>FIGURA 23:</b> Diagrama de Secuencia "CU Actualizar Posición de Puntos"	63
<b>FIGURA 24:</b> Diagrama de Secuencia "CU Manejar Colisiones"	64
<b>FIGURA 26:</b> Diagrama de Componentes del Paquete Aplicación	65
<b>FIGURA 27:</b> Diagrama de Componentes del Paquete ManejadorColisiones	65
<b>FIGURA 28:</b> Diagrama de Componentes del Paquete ObjetoEscena	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1:</b> Actores del sistema	46
<b>TABLA 2:</b> Expansión del CU 1	48
<b>TABLA 3:</b> Expansión del CU 2	49
<b>TABLA 4:</b> Expansión del CU 3	50
<b>TABLA 5:</b> Expansión del CU 4	52
<b>TABLA 6:</b> Descripción de la Clase del Diseño “Aplicación”	57
<b>TABLA 7:</b> Descripción de la Clase del Diseño “Tiempo”	58
<b>TABLA 8:</b> Descripción de la Clase del Diseño “ManejadorColisiones”	58
<b>TABLA 9:</b> Descripción de la Clase del Diseño “Pinza”	59
<b>TABLA 10:</b> Descripción de la Clase del Diseño “Hilo”	60
<b>TABLA 10:</b> Descripción de la Clase del Diseño “PuntoMasa”	61
<b>TABLA 10:</b> Descripción de la Clase del Diseño “Resorte”	62

## ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS

### A

---

- **Amortiguamiento:** Se define como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía. También se define como la fuerza que se opone al movimiento de los cuerpos, en contacto con sólidos o fluidos, en función de su velocidad.

### C

---

- **Cirugías de Mínimo Acceso (CMA):** La cirugía laparoscópica, sin ingreso o mínimamente invasiva es una técnica quirúrgica practicada a través de pequeñas incisiones, asistida de una cámara de video que permite al cirujano accionar sobre el campo quirúrgico, evitando los grandes cortes de bisturí requeridos por la cirugía abierta o convencional y posibilita un periodo post-operatorio mucho más rápido y confortable.
- **Coordenada paramétrica:** Líneas que sirven para determinar la posición de un punto dada por parámetros, ejem. El punto P tiene las siguientes coordenadas paramétricas (x,y,z).
- **Constante:** Es un valor de tipo permanente, que no puede modificarse, al menos no dentro del contexto o situación para el cual está previsto. Suele relacionarse y usarse en combinación con las variables.

### D

---

- **Dinámica:** Pertenece o relativo a la fuerza cuando produce movimiento.

- **Deformación Plástica:** Capacidad de un cuerpo de cambiar su forma de manera irreversible ante una fuerza externa o cualquier otro proceso.
- **Deformación Elástica:** Capacidad de un cuerpo de cambiar su forma y volver al estado inicial.

### *E*

---

- **Elasto-mecánico:** Combinación de los comportamientos elástico y mecánico de un cuerpo.
- **Energía de un sistema:** La energía es una magnitud física abstracta, ligada al estado dinámico de un sistema cerrado y que permanece invariable con el tiempo. También se puede definir la energía de sistemas abiertos, es decir, partes no aisladas entre sí de un sistema cerrado mayor. Un enunciado clásico de la física newtoniana afirmaba que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. A partir de ahí, se asume como energías de un sistema a todas las energías presentes en el conjunto de partículas o cuerpos que conforman un sistema.
- 

### *F*

---

- **Flexión:** Acción y efecto de doblar un cuerpo o parte de él. Encorvamiento transitorio que experimenta un sólido elástico por la acción de una fuerza que lo deforma.
- **Formalismo de Lagrange:** Función matemática a partir del cual se pueden derivar la evolución temporal, las leyes de conservación y otras propiedades importantes de un sistema físico.

### *G*

---

- **Gráficos por computadora:** Campo de la informática visual, donde se utilizan computadoras tanto para generar imágenes visuales sintéticamente como integrar o cambiar la información visual y espacial probada del mundo real.

- **Gradiente:** Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa.
  
- **Grados de libertad:** Capacidad de desplazarse libremente en un movimiento que se puede descomponer en 3 rotaciones y 3 traslaciones geométricas independientes (traslaciones y rotaciones respecto de ejes fijos en las 3 direcciones de una base referida a nuestro espacio de tres dimensiones).

## *H*

---

- **Hardware:** Componentes físicos de una computadora o de una red.
  
- **Háptico:** Todo aquello referido al contacto, especialmente cuando éste se usa de manera activa. Alusión a todo el conjunto de sensaciones no visuales y no auditivas que experimenta un individuo mediante el tacto.

## *I*

---

- **Ingeniería de Software:** Es la disciplina o área de la informática que ofrece métodos y técnicas para desarrollar y mantener software de calidad.

## *J*

---

- **Jerarquía:** Es el orden en niveles de los elementos de una serie según su valor. De igual modo, es la disposición de personas, animales o cosas, en orden ascendente o descendente, según criterios de clase, poder, oficio, categoría, autoridad o cualquier otro asunto que conduzca a un sistema de clasificación.

## L

---

- **Longitud Natural:** Longitud original de algo, ejemplo la longitud inicial de un resorte antes de ser estirado.

## M

---

- **Modelo Continuo:** Una función, variable o sistema es continuo, si entre dos puntos cualesquiera existe una infinidad de puntos y si, además, tiene la propiedad de completitud; es decir, si la distancia entre los dos puntos tomados mide  $d$ , para cada número entre 0 y  $d$  podemos encontrar un punto cuya distancia del primero mida exactamente a ese número. Es el caso, por ejemplo, de los números reales, así como el espacio-tiempo, según la relatividad.
- **Modelo Discreto:** Una función, variable, modelo o sistema se considerarán discretos, en contraposición a continuos, si son divisible un número finito de veces. Así, el conjunto de los números naturales es un conjunto discreto, así como también lo es la energía de los estados cuánticos.
- **Motor Gráfico:** Biblioteca de clase que contiene las funcionalidades básicas para la representación de escenarios virtuales.
- **Magnitud Física:** Propiedades que pueden cuantificarse por comparación con un patrón o con partes de un patrón. Constituyen ejemplos de magnitudes físicas, la masa, la longitud, el tiempo, la densidad, la temperatura, la velocidad y la aceleración.

## O

---

- **Oscilación:** En física, química e ingeniería, movimiento repetido de un lado a otro en torno a una posición central, o posición de equilibrio. El recorrido que consiste en ir desde una posición extrema a la otra y volver a la primera, pasando dos veces por la posición central, se denomina ciclo. El número de ciclos por segundo, o hercios (Hz), se conoce como frecuencia de la oscilación.

**P**

---

- **Primitiva Geométrica:** Formas geométricas consideradas primitivas por su básica constitución en las partes que la conforman se conocen también con el nombre de primitivas geométricas cuyas formas son el Círculo, el Triángulo y el Cuadrado.
- **Programación Orientada a Objeto (POO):** Paradigma de programación que usa objetos y sus interacciones para diseñar aplicaciones y programas de computadora. Está basado en varias técnicas, incluyendo herencia, modularidad, polimorfismo y encapsulamiento. Actualmente son muchos los lenguajes de programación que soportan la orientación a objetos.

**R**

---

- **Realidad Virtual:** Sistema o interfaz informático que genera entornos sintéticos en tiempo real, representación de las cosas a través de medios electrónicos o representaciones de la realidad, una realidad ilusoria, pues se trata de una realidad perceptiva sin soporte objetivo, sin red extensa, ya que existe sólo dentro de una computadora. Puede afirmarse que la realidad virtual es una pseudorrealidad alternativa.
- **Resolución de la curva:** En este contexto es la cantidad de puntos por los que está formado una parte del hilo que forma una curva. Una mayor resolución implicaría un mayor número de puntos por lo que la curva gana en realismo, si se disminuye la cantidad de puntos la resolución sería menor igual que la calidad visual del modelo.

**S**

---

- **Software:** Es el conjunto de los programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema de computación.
- **Sutura:** Intervención médica en la cual se junta las heridas de la piel, órganos internos, tejidos vasculares o cualquier otro tejido después de haber sido severamente dañados o separados.



- **Simulación:** Experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo.
- **Spline:** Curva definida a trozos mediante polinomios.

### T

---

- **Tridimensional:** Un objeto o ente es tridimensional si tiene tres dimensiones. Es decir cada uno de sus puntos puede ser localizado especificando tres números dentro de un cierto rango.
- **Topología:** Propiedades de los cuerpos geométricos que permanecen inalteradas por transformaciones continuas.
- **Torsión:** Acción y efecto de torcer o torcerse algo en forma helicoidal.

### V

---

- **Variable:** es un símbolo que representa un elemento no especificado de un conjunto dado. Dicho conjunto es llamado conjunto universal de la variable, universo o dominio de la variable, y cada elemento del conjunto es un valor de la variable.

## ANEXO 2: ESTÁNDARES DE CODIFICACIÓN

Debido a que el lenguaje seleccionado para implementar la solución propuesta fue C++ se decidió utilizar estándares de codificación utilizados en la comunidad de desarrollo de este lenguaje de programación, prácticas que comúnmente se utilizan para homogeneizar el código y que este pueda ser interpretado por otros programadores e incluso pueda ser integrado a otro módulo o sistema sin que existan grandes problemas para enlazar el código. Se utilizó además Inglés como idioma para la codificación ya que la mayoría de las palabras técnicas en este contexto son manejadas en inglés.

**Ficheros:** Los ficheros serán nombrados según el nombre de la clase que contengan seguido de la extensión .h o .cpp, en el caso del primero contendrá la declaración de la clase con todos sus atributos y métodos y el segundo contendrá la implementación de los métodos declarados en la clase.

**Constantes:** Las constantes serán nombradas con todos los caracteres en mayúsculas y guión bajo para separar las palabras.

**Enumerados:** Se utilizan solamente mayúsculas y en caso de tener más de una palabra será separada por guiones bajos. Ejemplo: `enum NAME_ENUM {VALUE, SISE};`

**Clases:** Los identificadores de las clases tendrán una C al principio continuando con el nombre identificativo de la clase. Ejemplo: `class CName` o `class CApplication`.

**Variables:** Las variables comenzarán con letras minúsculas, en caso de que el identificador tenga más de una palabra el resto de ellas comenzarán con mayúsculas. Al final de cada variable se pondrá un guión bajo. Ejemplo: `varName_` o `otherVarName_`.

**Métodos:** El identificador de los métodos comenzará con letra minúscula, si tiene más de una palabra se pondrá a continuación y comenzará con letra mayúscula. Ejemplo: `updatePoint()`. Los métodos de acceso al valor de los atributos serán nombrados con la palabra `get` seguido de las palabras que identifican a que atributo pertenece, ejemplo `getName()`.

En el caso de los métodos que se utilizan para cambiar el valor de los atributos por un nuevo valor se le antepone la palabra `set`, seguida del nombre del atributo al que se pretende modificar, ejemplo: `setName(newName)`.

La implementación de los métodos se realizará en el componente `.cpp` de la clase, el tipo de dato que devuelve el método estará especificado en la línea anterior. Ejemplo:

**void**

`Application::drawAxis(float length)`