

# Trabajo Práctico Final

Simulación de Sistemas - ITBA

Prof: Parisi, Daniel // Patterson, Germán

Alumnos: Cortés, Guido, Kuyumciyan

# 1 ÍNDICE

---

2	Tema seleccionado .....	2
3	Introducción .....	2
3.1	Complejidades del modelado de una tela en 3D: .....	2
4	Métodos.....	2
4.1	Técnica Geométrica - La técnica de Weil.....	3
4.2	Técnica Física – C. Feynman.....	4
4.3	Provot.....	4
4.4	Fuerza.....	5
4.5	Particle Model .....	7
4.5.1	Energía .....	8
5	Implementación .....	9
5.1	Clases .....	9
5.2	Limitaciones de la implementación del modelo .....	10
5.3	Método de Integración. Justificación de Beeman .....	10
5.5	Simulación y Animación.....	11
5.6	Fuerza de Fluido .....	12
6	Análisis de datos .....	13
7	Animaciones.....	19
8	Conclusiones .....	20
9	Material Bibliográfico.....	21

# Simulación de Sistemas

Ingeniería Informática – ITBA – 1er. Cuatrimestre 2016

Cortés Rodríguez, Kevin

Guido, Sebastián

Kuyumciyan, Nicolás

## 2 TEMA SELECCIONADO

---

Modelado de una tela sencilla. (*Cloth Modelling*)

## 3 INTRODUCCIÓN

---

La ropa, el movimiento de una bandera izada o una tela colgando son elementos que podemos ver a diario en la vida real. Esto implica que, en el caso de querer hacer una animación por computadora, el movimiento de una bandera, por ejemplo, debe ser lo más realista posible y lo más cercano al comportamiento real. Su complejidad se debe a que dichos elementos no son como la mayoría, ya que no tiene una forma estática simple en la que pueda ser modelado utilizando formas geométricas simples. Además, la complejidad aumenta ya que la textura de una tela puede variar.

Esto nos hace cuestionar qué tipo de algoritmos debemos utilizar para simular una tela y su movimiento frente a distintas acciones. Este reporte, centrará su foco en una serie de técnicas con detalle teórico para entender el funcionamiento incluyendo además pseudocódigo.

### 3.1 COMPLEJIDADES DEL MODELADO DE UNA TELA EN 3D:

- 1- Al tratarse de un objeto flexible, el modelo se puede representar mediante pequeñas partículas vinculadas con sus vecinos, por lo que cada iteración y por cada partícula, debe hacerse un cálculo en función de sus pares.
- 2- Baja tolerancia en la colisión al tratarse de una capa delgada (es una tela de gran área, pero muy fina). Además, puede colisionarse por sí misma también.

## 4 MÉTODOS

---

Existen distintas formas de modelar una tela. Dentro de éstos métodos, cada una tiene su función; es decir, que si se quiere que la tela luzca más a una tela y no tanto a sus movimientos o también el caso contrario. Por razones obvias a la materia, nosotros implementamos un tipo método (técnica basada en la física) ya que los otros no conciernen tanto al foco de la materia. [3]

- 1- **Técnica basada en la geometría:** Estos tipos de modelos están pensados para parecer a una tela, pero no tanto en cuestión a sus propiedades. Éste método es empleado por personas que intentar

crear imágenes de ropa lo suficientemente realistas como para que luzca igual, pero no tiene exactamente las mismas características

- 2- **Técnica basada en la física:** Esta técnica son usadas por aquellos que desean crear una ropa más realista tanto en la visualización como en las características propias de la ropa. Dicha técnica es usada para crear distintos modelos certeros de los aspectos de la ropa. A diferencia con el método de la geometría, la técnica de la física puede crear distintos aspectos como lana o seda. Dichos materiales harán que la simulación sea distinta.
- 3- **Técnica híbrida:** Es una técnica que emplea tanto la geometría como la física, pero nunca un modelo completo o certero de ambos.

## 4.1 TÉCNICA GEOMÉTRICA - LA TÉCNICA DE WEIL

Esta técnica es la base para casi todas las otras técnicas desarrolladas. Fue pensada para representar ropa colgada como una serie de puntos o grilla. Este método además cuenta de dos procesos, donde en el primero se aproxima a la solución de la forma de la ropa, y en la segunda se le aplican “filtros” para hacerla parecer más realista [3 – Sección B]

La idea principal de la técnica es tomar cuatro puntos (no arbitrarios, sino tomados bajo una ecuación) y trazar líneas y bisectrices Ver Figura 1.

Paso 1: Identificar los 4 puntos.

Paso 2: Trazar una línea continua entre ellas, de forma tal que quede un cuadrilátero. Trazar una línea interna que cruce del vértice inferior izquierdo al superior derecho.

Paso 3: Trazar la mediatriz de la línea construida en el Paso 2, con el vértice inferior derecho

Paso 4: Trazar una mediatriz del vértice inferior izquierdo con la línea construida en el Paso 3

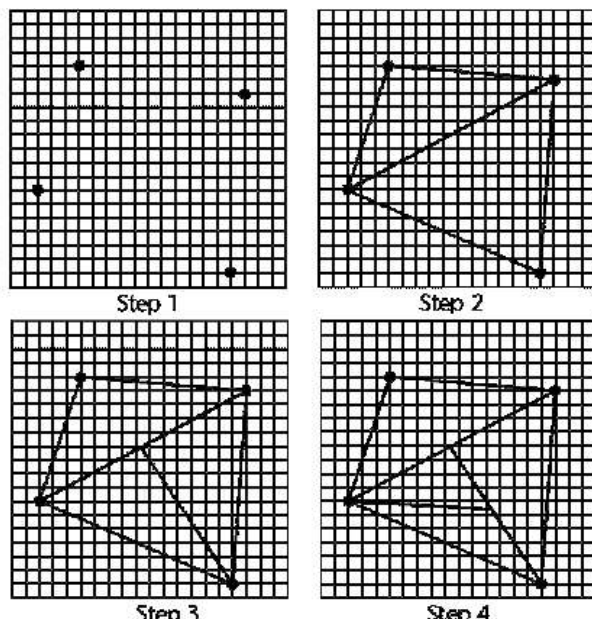


Figura 1

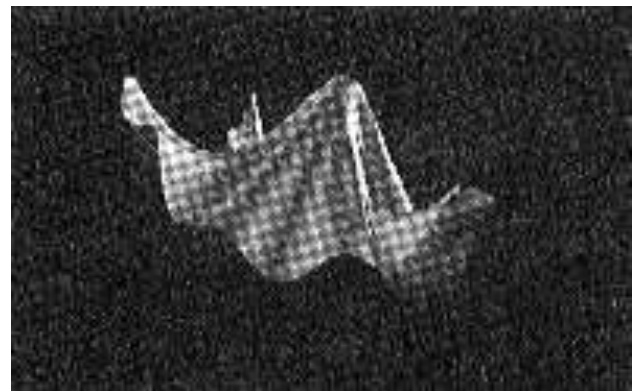


figura 2

Al concluir con el método obtendremos una imagen de una tela simulada por computadora

## 4.2 TÉCNICA FÍSICA – C. FEYNMAN

Feynman desarrolló un método que permite desarrollar el modelado de ropa representando una grilla 3D con una grilla 2D.

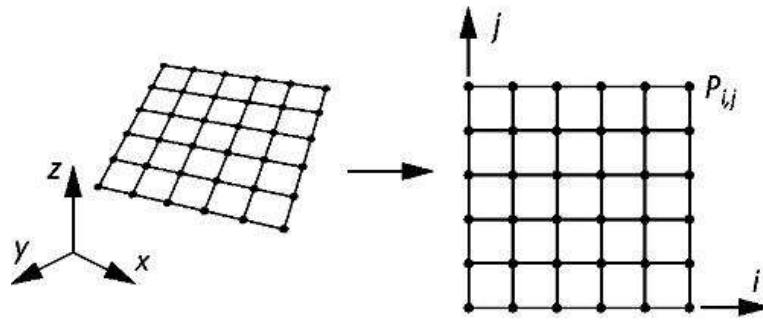


figura 3

Su método utiliza la ecuación de la energía:

$$E(P_{i,j}) = k_s E_{elasti,j} + k_b E_{bendi,j} + k_g E_{gravi,j}$$

$k_s$  - elasticity

$k_b$  - bending

$k_g$  - density

La razón por la cual Feynman utilizó dicha función fue porque observó que la “forma final” que adquiere la tela alcanza el mínimo de energía. La energía por cada punto  $P_{i,j}$  es calculada en relación a sus 8 vecinos.

## 4.3 PROVOT

Este método fue publicado en el año 1995 y modela la ropa con “resortes bajo estreñimiento”. Debido a sus limitaciones, este modelo no permite simular la caída de la tela sobre un objeto sólido. En este modelo cada partícula de la grilla posee 8 vecinos, aunque algunos diseños más avanzados llegan a tomar un total de 12 vecinos. A mayor cantidad de vecinos, mayor será la precisión y semejanza con la realidad, pero incrementando paralelamente los tiempos requeridos para llevar la simulación a cabo [1] [3].

Para lograr simular distintos tipos de telas en este modelo es necesario modificar las propiedades de los resortes.

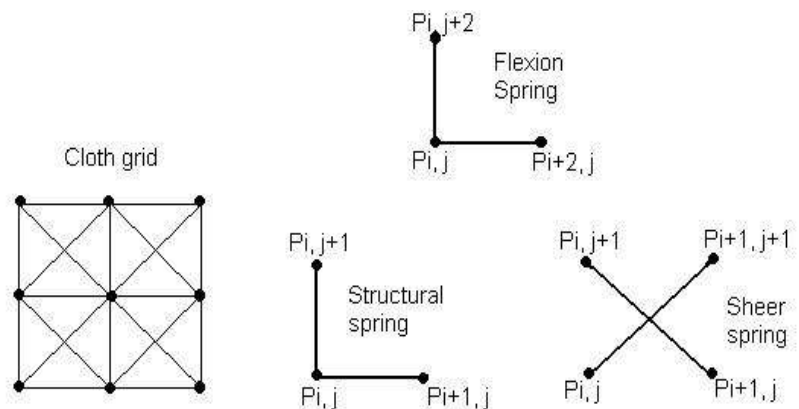


Figura 4

#### 4.4 FUERZA

Este modelo utiliza las leyes de la dinámica Newtonianas.

$$F_{ext}(i, j) + F_{int}(i, j) = ma(i, j)$$

M - mass of the point P(i,j)

a(i,j) - acceleration

F<sub>int</sub>(i,j) - internal forces at P(i,j)

En este caso la sumatoria de todas las fuerzas consideradas activas sobre cada partícula de la tela se reducen al conjunto de fuerzas externas y el conjunto de fuerzas internas:

Tomando el conjunto externo, se identifican 3 fuerzas activas:

- La fuerza gravitatoria, que simplemente agrega un peso a cada molécula.
- La fuerza de *damping*, aquella encargada de simular la fricción y desgaste con el medio en el que se encuentra la tela.
- La fuerza viscosa, la cual se encarga de simular movimientos en el medio.

$$F_{grav}(P_{i,j}) = mg$$

g - gravitational acceleration constant

$$F_{damp}(P_{i,j}) = -cv_{i,j}$$

c - damping constant

v<sub>i,j</sub> - velocity of P<sub>i,j</sub>

$$F_{visc}(P_{i,j}) = k[N_{i,j} \cdot (u_{fluid} - v_{i,j})]n_{i,j}$$

k - viscosity constant

n<sub>i,j</sub> - unit normal

u<sub>fluid</sub> - fluid velocity

La fuerza interna, en cambio, se calcula a partir del desplazamiento de las partículas vecinas con respecto a la distancia original de la partícula en cuestión:

$$F_{\text{int}}(i, j) = - \sum_{(k, l) \in R} K \left( \overline{P_{i,j} P_{k,l}} - \left\| \overline{P_{i,j} P_{k,l}} \right\|_0 \frac{\overline{P_{i,j} P_{k,l}}}{\left\| \overline{P_{i,j} P_{k,l}} \right\|} \right)$$

**K** - stiffness of the springs

**R** - set of neighboring points

$\left\| \overline{P_{i,j} P_{k,l}} \right\|_0$  - original length between  $P_{i,j}$  and  $P_{k,l}$

En base a la técnica de Provot, se han desarrollado otros modelos matemáticos. Por ejemplo, para calcular la fuerza interna, en un artículo de investigación del 2012 se empleó el siguiente modelo matemático [1]:

$$F_{\text{spring}} = -k_s(L_c - L_r) \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|},$$

$$F_{\text{damper}} = -k_d(\dot{p}_2 - \dot{p}_1) \cdot \left( \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|} \right) \left( \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|} \right).$$

Dividiéndolo en la fuerza del resorte y otra llamada “damper” (o también de regulador o de amortización interna).

$F_{\text{spring}}, F_{\text{damper}}$ : son las fuerzas ejercidas por el resorte y su medio respectivamente.

$P_2, P_1$ : son las posiciones de las partículas conectadas a cada extremo del resorte.

$L_c$ : es la longitud actual del resorte, la distancia entre  $P_2$  y  $P_1$ .

$L_r$ : es la longitud adicional del resorte.

El resorte puede ser modificado mediante la variación de sus dos constantes,  $k_s$  y  $k_d$ .

Si hacemos una comparación con la ecuación original, prácticamente son similares.

## 4.5 PARTICLE MODEL

La idea de utilizar el "Particle model" es para crear simulaciones dependiendo de la naturaleza de la tela, es decir, que queremos distintos resultados si estamos modelando seda, lana u otro material. Existen otros métodos utilizados para recrear estas características, aunque muchos de estos no consideran la naturaleza de la partícula, ya que miran el lado macroscópico el comportamiento de la tela.

En la tela real, lo que define el comportamiento macroscópico son millones de interacciones entre partículas (lado microscópico)- Diferencia en animación de una tela de distinto material. a la izquierda, la tela es de algodón. A la derecha, la tela es de lana.

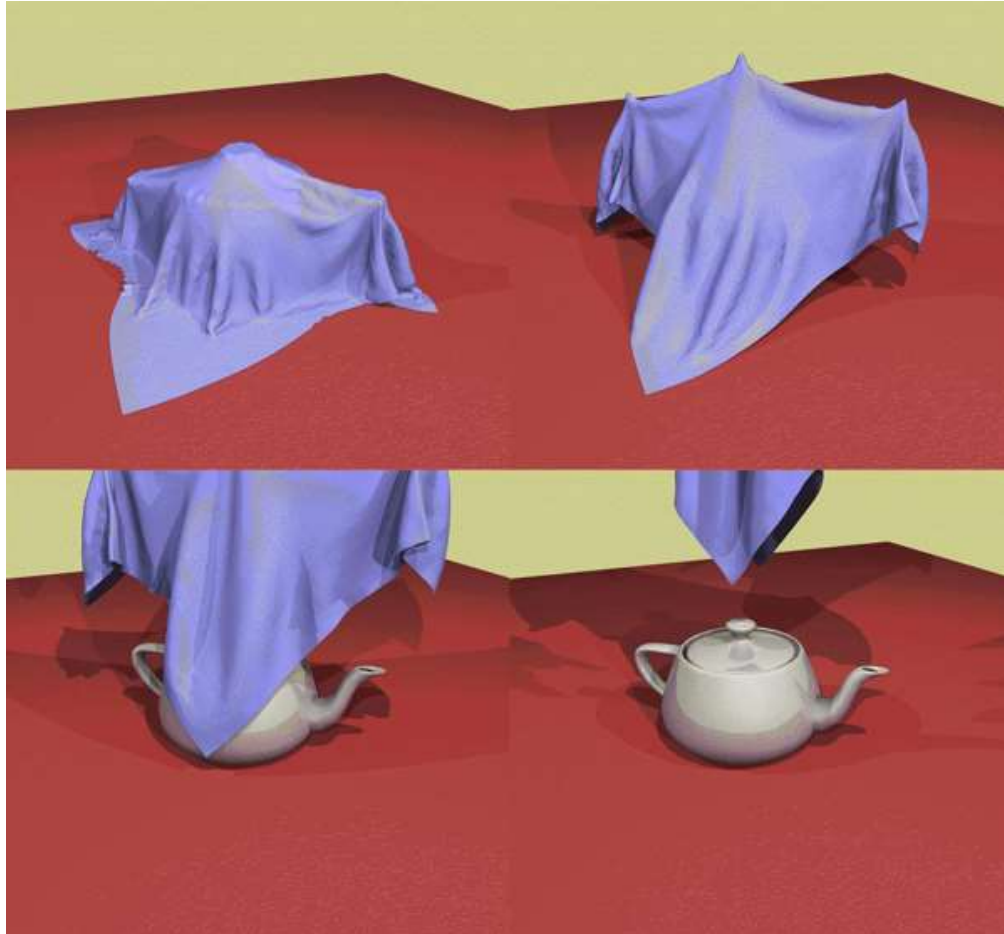


Figura 5



#### 4.5.1 Energía

Si bien, el método que hemos empleado está orientado a la *fuerza*, también existen otras formas de realizarlo mediante la energía, aunque “prácticamente” se puede pensar de manera análoga, ya que podemos establecer la siguiente relación:

$$F(x) = -\frac{dU}{dx}$$

El primer paso es capturar las propiedades de la microestructura de la ropa. Estas básicas interacciones que queremos capturar son:

- 1- Contacto
- 2- Estiramiento
- 3- Flexibilidad
- 4- Grilla

Las energías potenciales totales en nuestro modelo están definidas por la suma de las energías potenciales de éstos 4 ítems, incluyendo a otros también.

$$U_{total} = U_{repel} + U_{stretch} + U_{bend} + U_{trellis} + U_{gravity}$$

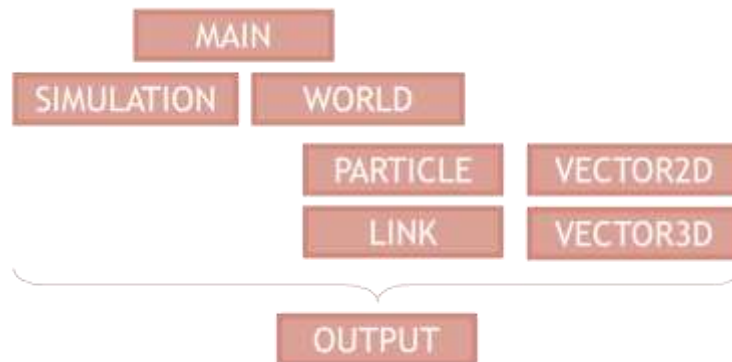
U repel	U stretch	U bend	U trellis	U gravity
Energía de repulsión para mantener una distancia mínima entre partículas	Energía que representa la energía de tensión entre los vínculos de las partículas con sus vecinas	Energía que representa el “doblez” de la tela	Energía causada por la rotura de la tela.	Energía potencial gravitatoria, causada por la masa de la partícula

## 5 IMPLEMENTACIÓN

La implementación la llevamos a cabo en Java, y generamos un output en formato xyz para luego levantarlo desde Ovito.

### 5.1 CLASES

El programa cuenta con 8 clases, delegando distintas responsabilidades.



- MAIN: Crea el entorno pasándole la cantidad de partículas en horizontal y vertical, y el peso de cada una. A su vez, también llama a correr la simulación pasándole el dt y el número de iteraciones.
- SIMULATION (métodos de mayor relevancia):
  - **public void beeman(Particle p)**
    - Calcula la siguiente posición de la partícula en X,Y,Z
    - Predice la velocidad en el siguiente paso (Es necesario porque el cálculo de las fuerzas utiliza la velocidad)
    - Calcula la aceleración en el siguiente paso usando la posición y la predicción de la velocidad
    - Corregimos la velocidad
  - **public void run()**
    - Para todas las partículas:
      - Calculamos la fuerza
      - Con Euler obtenemos la velocidad y la posición previa
      - Luego aplicamos Beeman como método de integración
  - **private Vector3D eulerPos(Particle part, double dt)**
  - **private Vector3D eulerVel(Particle part, double dt)**
    - Son usados para encontrar los valores de la posición y la velocidad en el instante -dt, ya que el método de integración utilizado precisa de los valores en el paso temporal anterior.

- WORLD (métodos de mayor relevancia):
  - **public Vector3D Force(Particle p)**
    - Devuelve un Vector3D, donde se hacen operaciones matemáticas con las Fuerzas Internas y las Fuerzas externas
  - **private Vector3D getInternalForces(Particle p)**
  - **private Vector3D getExternalForces(Particle p)**
    - Son los métodos responsables de obtener dichas fuerzas que ya fueron mencionadas anteriormente.

## 5.2 LIMITACIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Aunque el modelo sea más flexible, algunas decisiones de implementación llevaron a limitaciones, por ejemplo:

- 1- El estado inicial del sistema, tiene a todas a todas las partículas en su estado de reposo, es decir, están a la distancia original del resorte (resorte sin estar estirado)
- 2- El modelo no verifica que partículas no adyacentes colisionen entre sí por lo que se pueden llegar a sobreponer.
- 3- La fuerza del fluido afecta por igual a todas las partículas del sistema.
- 4- Los resortes son ideales por lo que no se pueden deformar.

## 5.3 MÉTODO DE INTEGRACIÓN. JUSTIFICACIÓN DE BEEMAN

Elegimos el método de Beeman por evidenciar empíricamente en trabajos anteriores que era el más efectivo.

En sistemas donde las fuerzas están escritas en función de la velocidad, además de la posición, las ecuaciones necesitan ser corregidas por lo que llamamos “predictor-corrector”, donde las velocidades en el tiempo  $t + \Delta t$  son predichas y las fuerzas calculadas, antes de efectuar la corrección de las velocidades.

Luego, las velocidades son calculadas en el tiempo  $t + \Delta t$  en base a la posición

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t + \frac{2}{3}a(t)\Delta t^2 - \frac{1}{6}a(t - \Delta t)\Delta t^2 + O(\Delta t^4).$$

Calculamos la aceleración en base a la posición y la velocidad en ese instante. Corregimos el valor de la posición.

$$v(t + \Delta t)(\text{predicted}) = v(t) + \frac{3}{2}a(t)\Delta t - \frac{1}{2}a(t - \Delta t)\Delta t + O(\Delta t^3)$$

$$v(t + \Delta t)(\text{corrected}) = v(t) + \frac{5}{12}a(t + \Delta t)\Delta t + \frac{2}{3}a(t)\Delta t - \frac{1}{12}a(t - \Delta t)\Delta t + O(\Delta t^3)$$

## 5.4 SIMULACIÓN Y ANIMACIÓN

Como se han realizado en trabajos anteriores, la simulación consta de dos pasos.

La primera parte es la que se realiza en Java, y generando un archivo xyz se levanta desde Ovito y se realiza la animación.

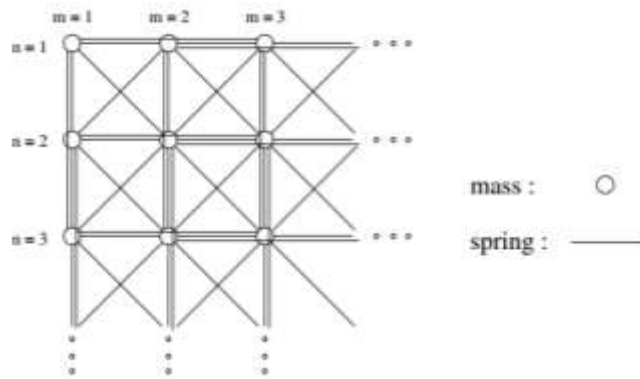


Figura 6

En la mayoría de las animaciones se ven como partículas aisladas. La realidad es que están unidas mediante enlaces, pero por un tema de visualización, no han sido agregadas a la animación generada en Ovito.

Los colores representan la energía potencial elástica que tiene cada una de las uniones con sus partículas vecinas.

## 5.5 FUERZA DE FLUIDO

La fuerza de fluido fue implementada tal como la describe Provot en su modelo. Sin embargo, si esta fuerza permanece constante, eventualmente el sistema alcanza un estado de equilibrio. Luego, si se quiere simular un fluido real, como por ejemplo el viento o el caudal de un río, la fuerza debe ser variable.

Las simulaciones hechas en éste trabajo con fluido variable anhelan simular una bandera flameante en el viento con gravedad como en la Figura 7 (Ver Animaciones 1, 2 y 3).

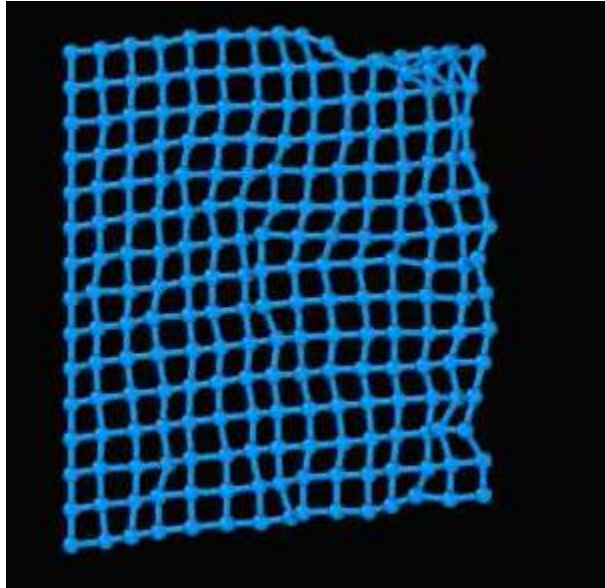


Figura 7

La aleatoriedad de dicha fuerza de flujo se implementó con un proceso estocástico llamado *Random Walk* (Fig. 8), el cual aumenta o disminuye a pasos constantes el valor con igual probabilidad. El valor de cada fuerza fue limitado porque con éste proceso hay chances de que se alcance un valor de módulo muy grande.

Figura 8

```
if(cycles%rate==0){
    xFluid = uFluid.x + xModifier*(random()<0.5?1:-1);
    if(xFluid>maxX)
        xFluid=maxX;
    if(xFluid<-maxX)
        xFluid=-maxX;
    yFluid = uFluid.y + yModifier*(random()<0.5?1:-1);
    if(yFluid>maxY)
        yFluid = maxY;
    if(yFluid<-maxY)
        yFluid = -maxY;
    zFluid = uFluid.z + zModifier*(random()<0.5?1:-1);
    if(zFluid>maxZ)
        zFluid=maxZ;
    if(zFluid<maxZ)
        zFluid=maxZ;
    uFluid = new Vector3D(xFluid,yFluid,zFluid);
}
```

## 6 ANÁLISIS DE DATOS

En primer lugar, se analizará cómo afecta la constante de resorte  $K$  a la separación de las partículas en el transcurso de la simulación.

Para ello, se realizarán 5 simulaciones por cada  $K$  variable y con las siguientes características:

- 225 partículas dispuestas en un cuadrado (Fig. 10)
- Los 2 extremos de un lado fijos y gravedad constante de  $9.8\text{m/s}$  (Fig. 11 y 12)
- Constante de *damping*  $C_d=0.99$
- Masa de cada partícula  $1\text{kg}$
- No hay fuerza de fluido
- Paso temporal  $dt=10^{-5}\text{ s}$

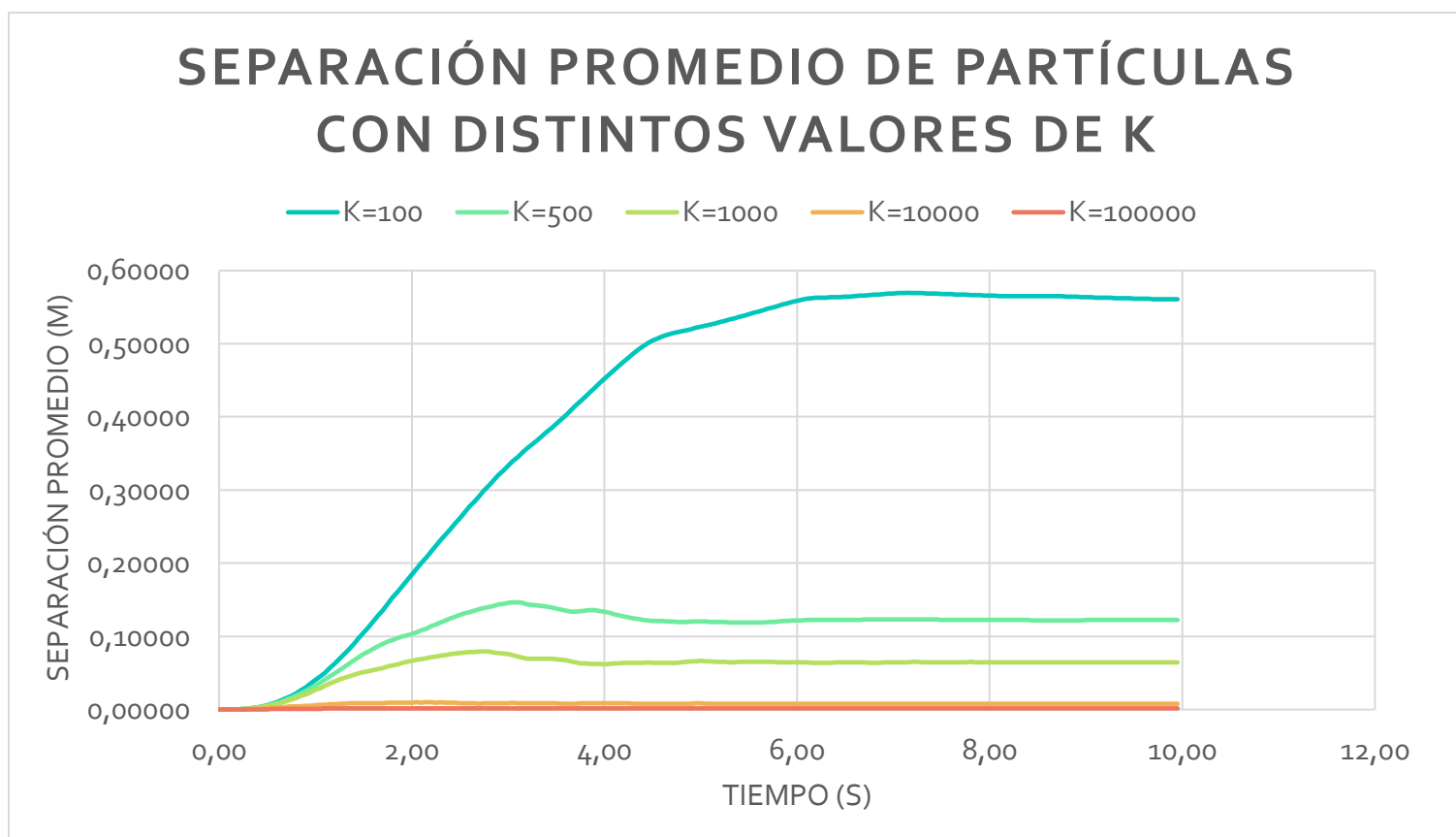


Figura 9

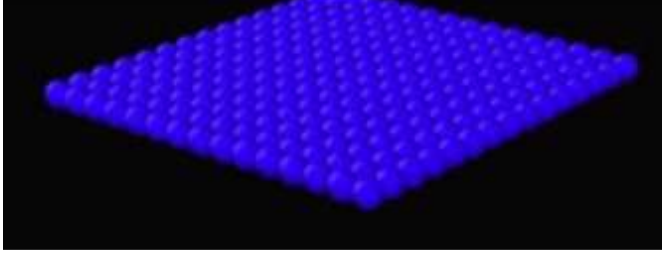


Figura 10

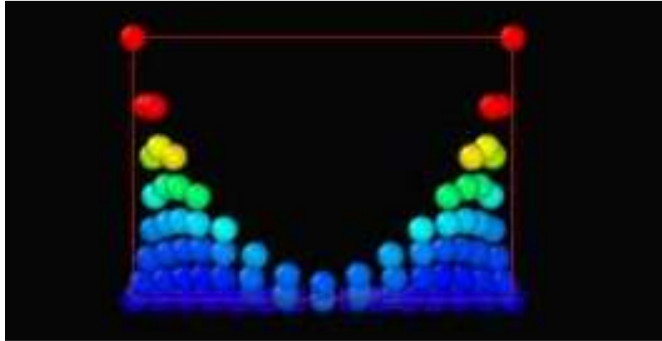


Figura 11

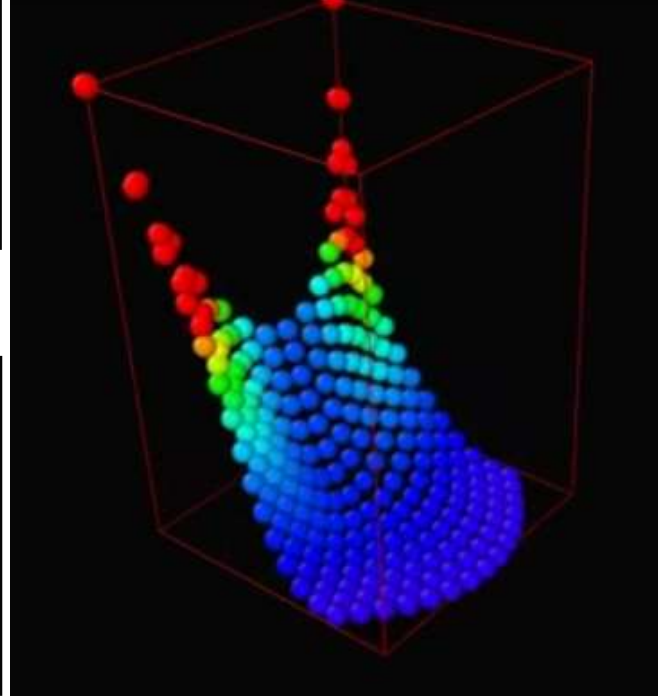


Figura 12

Como se ve en la Fig. 9, cuanto más pequeño el valor de  $K$  mayor la separación promedio entre partículas, lo cual permite simular distintos tipos de telas dependiendo de su maleabilidad. Se nota la diferencia a simple vista como muestran las Figuras 13, 14 y 15 con  $K$  100, 10000 y 100000 respectivamente. También se puede apreciar que el tiempo de reposo (en este caso cuando la separación promedio entre partículas queda fija) es más grande con  $K$  más pequeño.

La elección del  $K$  por lo tanto será subjetiva dependiendo de lo que se quiera simular (siempre y cuando esté dentro de parámetros razonables, no usar  $K=0$ ), ya sea una tela rígida o una muy elástica.

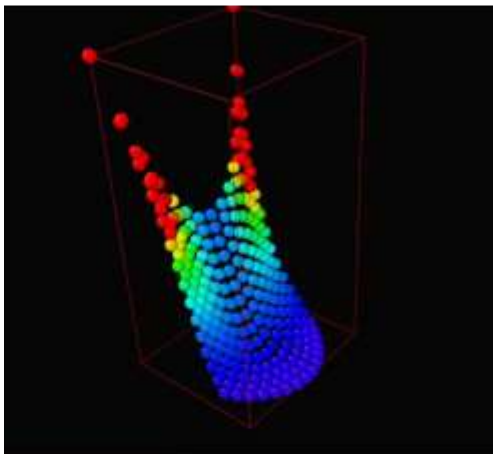


Figura 13

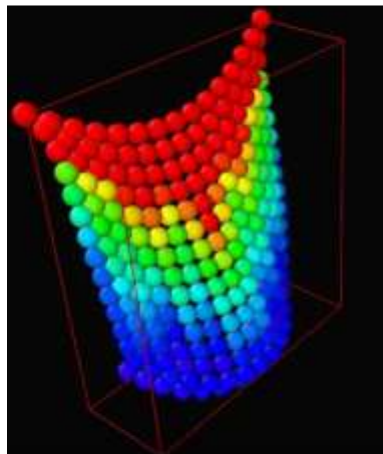


Figura 14

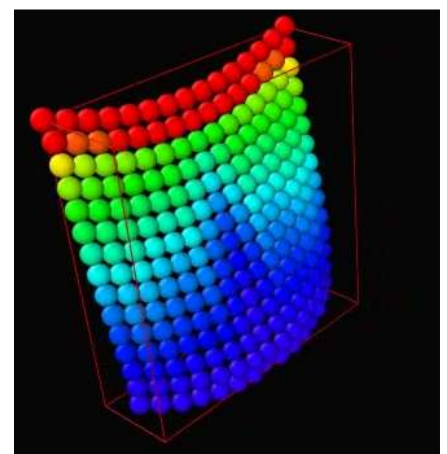


Figura 15

Luego se analizó otra de las constantes del sistema, la constante de *dampening* ( $C_d$ ). Dado que es una fuerza disipativa que se opone al movimiento, se decidió compararla con la energía cinética de todo el sistema la cual brinda una manera de ver la rapidez de todas las partículas.

Para ello, se realizarán 5 simulaciones por cada  $K$  variable y con las siguientes características:

- 225 partículas dispuestas en un cuadrado (Fig. 11)
- Las 15 partículas de un lado fijas y gravedad constante de  $9.8\text{m/s}$  (Fig. 17)
- Constante de resorte  $K=10000$
- Masa de cada partícula  $1\text{kg}$
- No hay fuerza de fluido
- Paso temporal  $dt=10^{-5}\text{ s}$

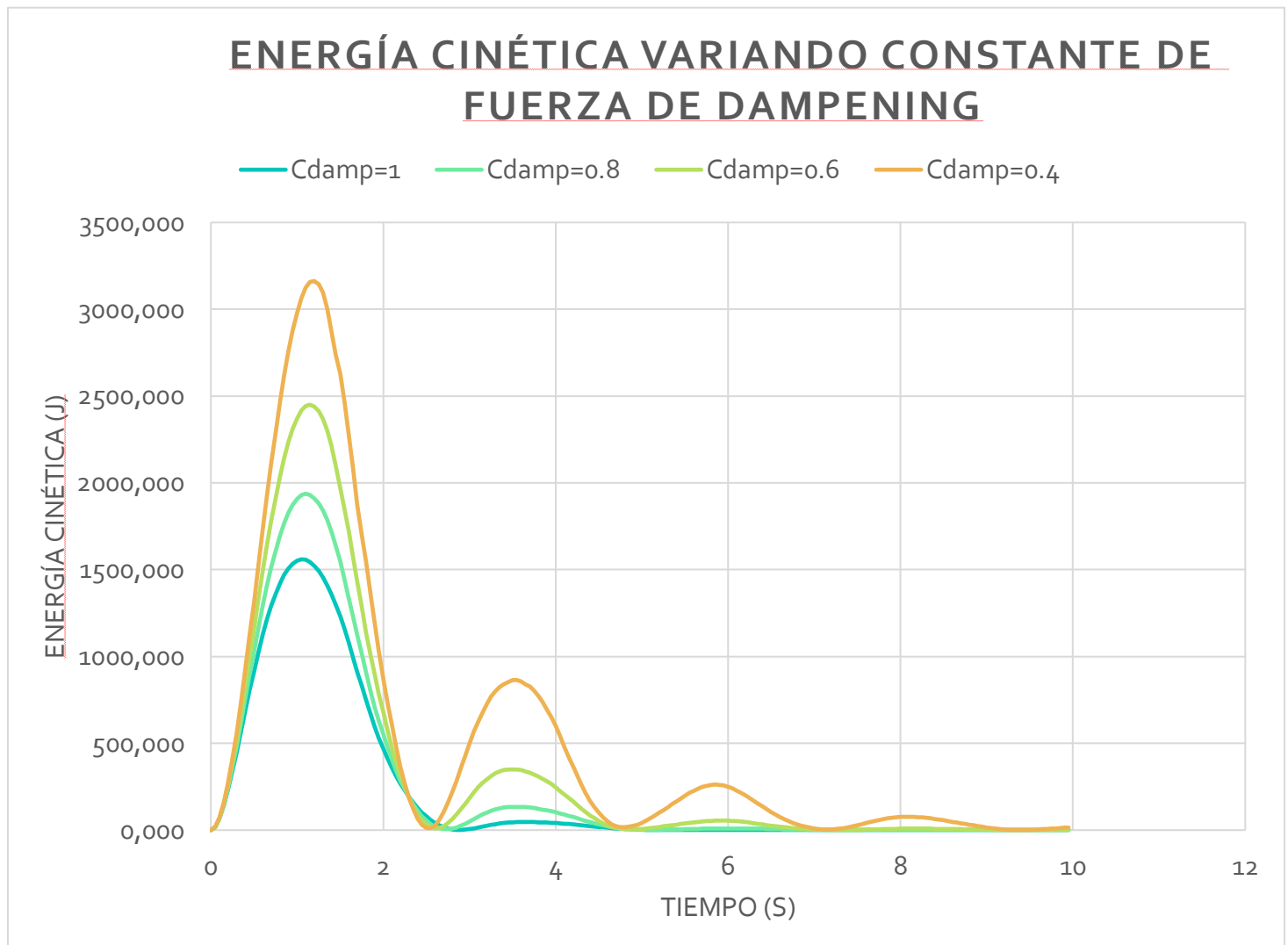


Figura 16



Dado que la fuerza  $C_d$  actúa como la fricción que experimentan las partículas con el medio en el que se encuentran, es razonable que al ser más grande dicha constante el valor de la energía cinética disminuya tal como se aprecia en la Fig. 16. Nuevamente el valor seleccionado para dicha constante dependerá de los efectos que se quieran conseguir, con valores muy bajos simulando un medio vacío donde no hay pérdida de energía y valores más altos para gases densos y líquidos.

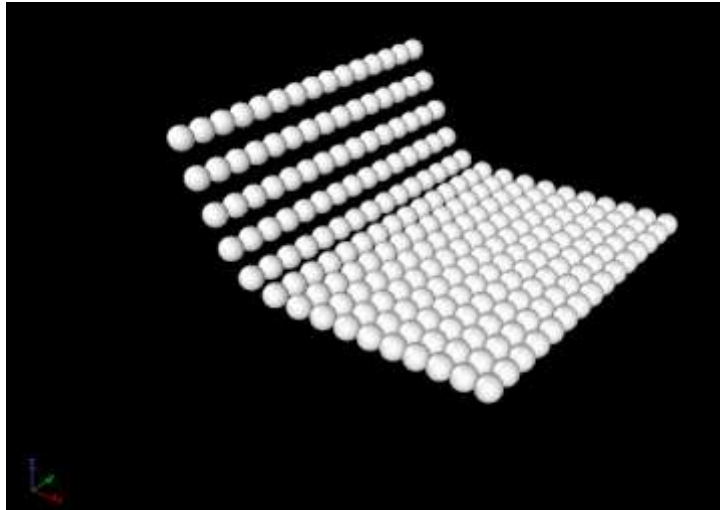


Figura 17

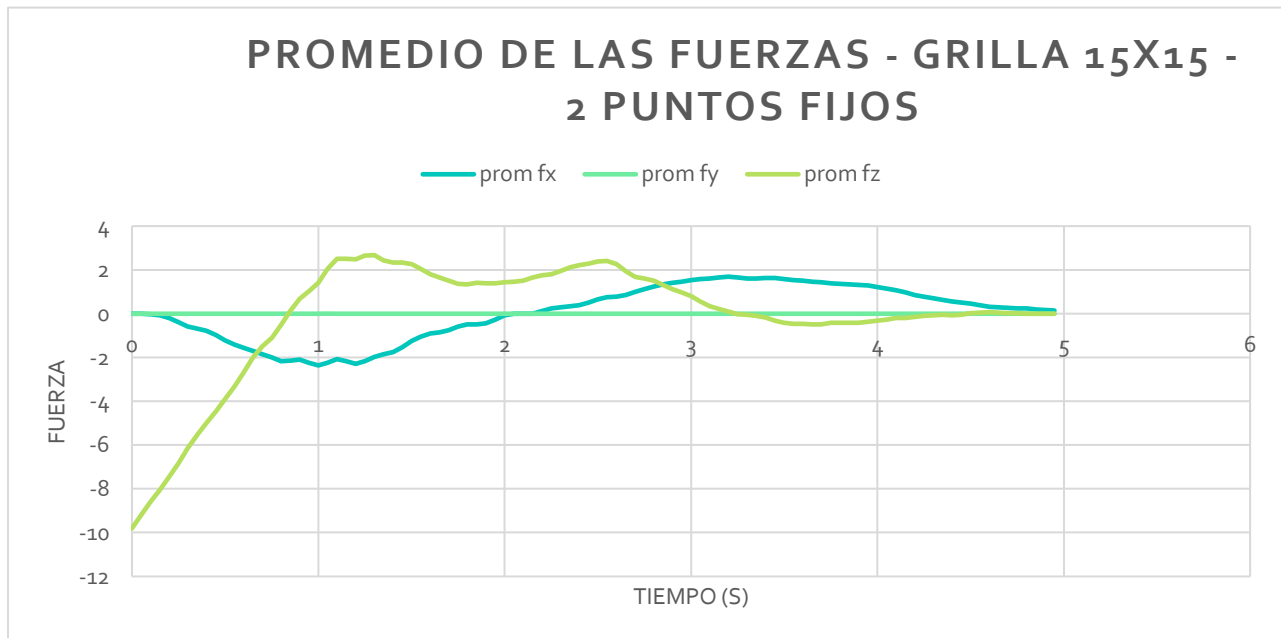


Figura 18

La figura 19 muestra como es la Fuerza en sus 3 ejes (x,y,z) de una tela cayendo en estado de reposo, sujetado por dos puntos fijos donde se contaba con las siguientes características:

- 225 partículas dispuestas en un cuadrado (Fig. 10)
- Las 15 partículas de un lado fijas y gravedad constante de  $9.8\text{m/s}$  (Fig. 14)
- Constante de resorte  $K=10000$
- Constante de *dampening*  $C_{\text{damp}}=1$
- Masa de cada partícula  $1\text{kg}$
- No hay fuerza de fluido
- Paso temporal  $dt=10^{-5}\text{ s}$

De este gráfico podemos detallar dos aspectos interesantes para analizar y observar:

1. Inicialmente la única fuerza que actúa es la de la gravedad
2. No hay fuerzas perpendiculares al vector normal de la tela que afecten a su comportamiento
3. Cuando la tela cae, pasa dos veces por el lugar en el punto de equilibrio. Una cuando está cayendo y la pasa; y otra cuando está cayendo en sentido contrario. Dicho efecto lo podemos notar en la *animación 10*. De la Fig. 16 se puede deducir que con menor  $C_{\text{damp}}$  oscilaría mayor cantidad de veces.

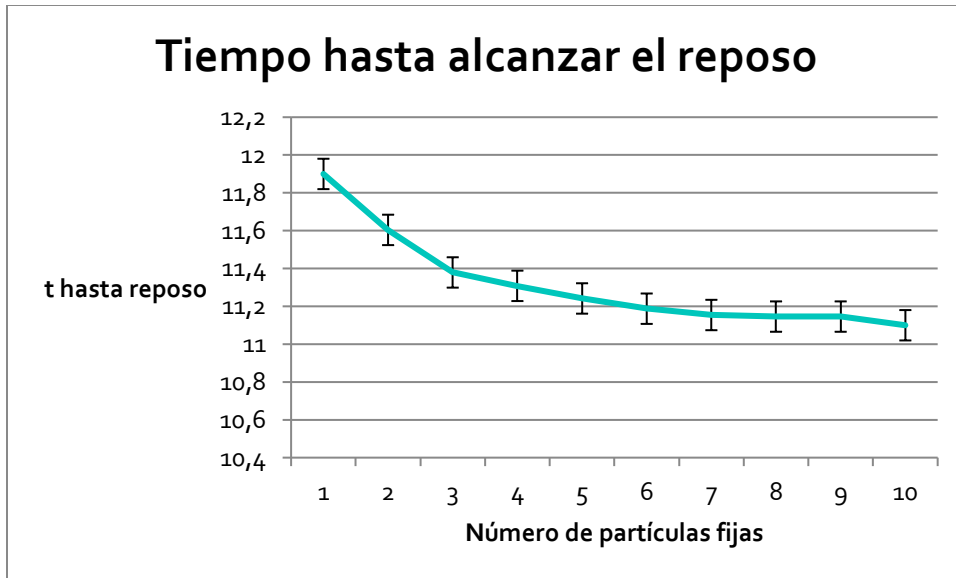


Figura 19.

Por último, se decidió estudiar el tiempo que demora el sistema en alcanzar el estado de reposo frente a una variante en la cantidad de partículas que sostuvieran a toda la estructura de la tela.

Para llevar a cabo esta prueba, se trabajó con una estructura de 100 partículas, 10 a lo ancho y 10 a lo alto y, aleatoriamente, se modificó cuales eran las partículas que sostenían al resto, logrando así diversos resultados de los que se pudo obtener un promedio. En total se tuvieron en cuenta 15 simulaciones por cantidad de partículas fijas. Las simulaciones se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones:

- 100 partículas dispuestas en un cuadrado (Fig. 8)
- Constante de resorte  $K=10000$
- Masa de cada partícula 1kg
- No hay fuerza de fluido
- Paso temporal  $dt=10^{-5}$  s
- Constante de damping 0,5

La condición de reposo se consideró alcanzada una vez que la fuerza cinética y la potencial gravitatoria se hubieran equilibrado y no sufrieran mayores modificaciones.

A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que:

1. A medida que aumenta el soporte de la tela, se acelera el alcance del estado de reposo.
2. Resulta más abrupto el cambio cuando inicialmente se comienzan a agregar puntos de soporte, pues una vez ocupada más de medio eje para que se sostenga la tela, los resultados temporales resultan prácticamente idénticos al tiempo correspondiente a que todas las partículas del eje sostuvieran.

## 7 ANIMACIONES

---

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=PWOHQDP7A9M> (Bandera lado fijo - 8 vecinos)
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=QDXAKxHXlgo> (Bandera 2 vértices fijos - 8 vecinos)
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=bOnCbF2JHN4> (Bandera lado fijo - 4 vecinos)
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=y2mH-lkK7qg> (K=100000 frente)
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=YgBPEzD9vxc> (K=100 frente)
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=OZ72J2kVS4Y> (K=10000 arriba)
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=1fL3LlfToTQ> (K=10000 perspectiva)
- [8] [https://www.youtube.com/watch?v=1tn1GZ3\\_vkY](https://www.youtube.com/watch?v=1tn1GZ3_vkY) (K=100000 perspectiva)
- [9] [https://www.youtube.com/watch?v=J7GfJ\\_g8EgE](https://www.youtube.com/watch?v=J7GfJ_g8EgE) (K=100 perspectiva)
- [10] [https://www.youtube.com/watch?v=ei\\_8MdeSc3k](https://www.youtube.com/watch?v=ei_8MdeSc3k) (SS - 15x15 - 2 puntos fijos - Fuerzas)

En las animaciones 3-9 los colores de las partículas representan la energía potencial elástica de todos sus enlaces con otras partículas. Los colores más cálidos representan mayor energía mientras los colores fríos menor (máximo rojo – mínimo azul).

## 8 CONCLUSIONES

---

Este proyecto resultó ser interesante ya que fue distinto a los otros proyectos que fueron realizando durante la cursada de la materia.

Además, al ver distintos tipos de formas de realizar la simulación y evaluar cual nos parecía conveniente elegir, pudimos ver las distintas perspectivas del modelo matemático y físico.

Decidimos utilizar el modelo de Xavier Provot, propuesto en el año 1995, ya que fue uno de los modelos más utilizados y nos permitía realizar propuestas creativas como una bandera flameante.

Se pudo deducir sobre las constantes del sistema, a partir de los resultados, que a medida que aumenta la constante del resorte  $K$  se reduce la separación entre partículas en todo momento y tarda más en llegar a un estado de reposo en comparación a valores de  $K$  más pequeños. También la constante de *dampening* influye en el tiempo de reposo, reduciéndolo a mayores valores.

Dado que el modelo incluye fuerzas disipativas no se pudo determinar la elección del paso temporal por medios de conservación de la energía. Es por esto que se tuvo que determinar empíricamente asegurándose que sea lo suficientemente pequeño como para que no presente anomalías.

## 9 MATERIAL BIBLIOGRÁFICO

---

### 9.1 [1] SIMULATION OF TEARABLE CLOTH - PIETERJAN BARTELS

[https://nccastaff.bournemouth.ac.uk/jmacey/CGITech/reports2015/PBartels\\_PieterjanBartels\\_CGITECH\\_final.pdf](https://nccastaff.bournemouth.ac.uk/jmacey/CGITech/reports2015/PBartels_PieterjanBartels_CGITECH_final.pdf)

### 9.2 [2] LARGE STEPS IN CLOTH SIMULATION - DAVID BARAFF ANDREW WITKIN

<http://www.cs.cmu.edu/~baraff/papers/sig98.pdf>

### 9.3 [3] CLOTH MODELING - KRISTOPHER BABIC

<http://davis.wpi.edu/~matt/courses/cloth/>

### 9.4 [4] DEFORMATION CONSTRAINTS IN A MASS-SPRING MODEL TO DESCRIBE RIGID CLOTH BEHAVIOUR – XAVIER PROVOT

<https://graphics.stanford.edu/courses/cs468-02-winter/Papers/Rigidcloth.pdf>

### 9.5 [5] COLLISION AND SELF-COLLISION HANDLING IN CLOTH MODEL DEDICATED TO DESIGN GARMENTS – XAVIER PROVOT

[https://graphics.stanford.edu/courses/cs468-02-winter/Papers/Collisions\\_vetements.pdf](https://graphics.stanford.edu/courses/cs468-02-winter/Papers/Collisions_vetements.pdf)

### 9.6 [6] MATERIAL EXTRA

<https://graphics.stanford.edu/~mdfisher/cloth.html>