

ITBA - "72.25 - SIMULACIÓN DE SISTEMAS"

Trabajo Práctico Final

Alumnos:

De Simone, Franco

61100

Dizenhaus, Manuel

61101

Índice

1. Introducción	2
1.1. Social Force Model	2
1.2. Contractile Particle Model	3
2. Implementación	4
2.1. Estructura del proyecto	4
3. Simulaciones	5
4. Resultados	5
4.1. CPM y SFM: Un estudio comparativo	5
4.2. Faster Is Slower	10
5. Conclusiones	13
Bibliografía	15

1. Introducción

El estudio de la dinámica peatonal es un dominio de investigación tan interesante como importante, particularmente ante la necesidad de construir estructuras edilicias más seguras y cómodas, y que reflejen mejor los comportamientos naturales que presentamos los humanos. Los escenarios de pánico o estrés, en situaciones de peligro, resultan particularmente críticos de estudiarse e investigarse; la evacuación de un salón, con un gran número de peatones queriendo abandonar el recinto por una cantidad limitada de salidas, es un ejemplo importante de situaciones de esta índole. Debido a la dificultad que presenta la realización de experimentos en esta materia, resultando complicado simular situaciones de alto estrés sin que esto genere riesgos para las personas involucradas, se han desarrollado modelos de simulación para poder replicar estos escenarios vía software. En estos modelos los peatones son representados como partículas que interactúan entre ellas de distintas maneras, buscando reproducir de la forma más exacta posible los comportamientos que muestran los peatones en la vía pública.

Se estudiarán el **Social Force Model**[1], basado en fuerzas, y el **Contractile Particle Model**[2], modelo híbrido. Se buscará comparar a los dos métodos y estudiar cómo modelan este escenario bajo distintos parámetros. Estos modelos nos permiten describir y simular el comportamiento de partículas dentro de un espacio, de acuerdo a reglas preestablecidas, y con un *target* predefinido, que será la principal guía de la trayectoria de las mismas (en este caso, la puerta por la cual los peatones abandonan el recinto). Se estudiará como observable el *caudal específico* (la cantidad de personas que abandonan el recinto, por unidad de tiempo y de ancho de puerta). Dicha cantidad suele tomarse como constante en condiciones normales, y que toma valores entre 1,25 y 2 *ped/s/m* (*ped* = número de peatones) [2].

En la segunda parte del trabajo, se estudia el efecto "*Faster is Slower*" [1] con ambos métodos. Este fenómeno consiste en cómo, bajo ciertas condiciones, un mayor ímpetu por parte de los peatones para abandonar el salón, posiblemente producto de situaciones de estrés y/o peligro, termina resultando en un menor flujo de salida de los peatones y, lamentablemente, en una mayor duración de la evacuación. Este efecto fue estudiado experimentalmente, y se cuenta con evidencia empírica [3] que lo sustenta. Buscaremos replicar este comportamiento utilizando ambos modelos.

1.1. Social Force Model

El Social Force Model parte de la segunda ley de Newton:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1)$$

El sistema describe que cada peatón "*i*" tiene su ecuación dada por:

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_{GRANULAR} + \mathbf{F}_{SOCIAL} + \mathbf{F}_{DESEO} \quad (2)$$

Esto logicamente nos deja con \mathbf{N} ecuaciones diferenciales (una por partícula).

La fuerza granular, también conocida como fuerza de contacto, actúa solamente cuando dos partículas se tocan o chocan entre ellas. Se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{F}_{G_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_p} [(-\varepsilon_{ij} k_n) \mathbf{e}_{ij}^n + (v_{ij}^t \varepsilon_{ij} k_t) \mathbf{e}_{ij}^t] g(\varepsilon_{ij}) \quad (3)$$

donde ε_{ij} representa la superposición entre dos partículas i, j . Matemáticamente, se calcula de la siguiente forma: $\varepsilon_{ij} = r_{ij} - (R_i + R_j)$, donde R_i es el radio de una partícula, y r_{ij} es la distancia entre los centros de las partículas. Luego, k_n es una constante, \mathbf{e}_{ij}^n es el versor que apunta del centro del peatón j al peatón i , y \mathbf{e}_{ij}^t representa la dirección tangencial de las partículas en contacto. La función $g(x)$ devuelve 1 si las partículas están en contacto, y 0 en caso contrario.

Por otro lado, tenemos la Fuerza Social, que busca describir el deseo de los peatones de alejarse de los demás. Es una fuerza repulsiva, que representa la manera en la que la trayectoria de un peatón se ve afectada por la presencia de otros, buscando evitar el contacto antes de que suceda. La fuerza se describe con la ecuación:

$$\mathbf{F}_{S_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_p} A \exp \frac{-\varepsilon_{ij}}{B} \mathbf{e}_{ij}^n \quad (4)$$

A y B son constantes, mientras que ε y \mathbf{e} representan lo mismo que en la Fuerza Granular.

La tercera y última fuerza del sistema es la Fuerza de Deseo o de Autopropulsión. La misma busca describir el deseo del peatón de aproximarse a su objetivo. La fuerza se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{F}_{D_i} = m_i \frac{(v_{di} \mathbf{e}_i^{target} - \mathbf{v}_i)}{\tau_i} \quad (5)$$

donde \mathbf{e}_i^{target} es el versor que apunta desde el centro de la partícula hacia el objetivo que busca alcanzar la partícula, \mathbf{v}_i es la velocidad actual de la partícula, y τ_i es una constante relacionada a la forma en la que un peatón adapta su velocidad en pos de alcanzar su objetivo.

Es importante notar también que el método de integración utilizado para integrar paso a paso con el SFM fue el Gear Predictor Corrector de orden 4.

1.2. Contractile Particle Model

El Contractile Particle Model, o CPM, explica que las partículas tienen un radio variable, y que la velocidad deseada es en función del mismo.

Si la partícula no se encuentra en contacto con ninguna otra, su evolución temporal está dada por las siguientes ecuaciones, que describen su posición, radio, y velocidad:

$$\mathbf{x}(t + dt) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}_d dt \quad (6)$$

$$|\mathbf{v}_d| = v_d = v_d^{max} [(r - r_{min})(r_{max} - r_{min})]^\beta \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_d = v_d \mathbf{e}_{target} \quad (8)$$

$$\mathbf{e}_{target} = (\mathbf{x}_{target} - \mathbf{x}) / |\mathbf{x}_{target} - \mathbf{x}| \quad (9)$$

$$r(t + dt) = r(t) + r_{max} / (\tau / \Delta t) \quad (10)$$

En cambio, si la partícula efectivamente se encuentra en contacto con otra, las ecuaciones cambian, dado que el radio vuelve al mínimo, como también cambia la dirección instantanea en la cual se dirige la partícula en ese marco temporal:

$$\mathbf{x}(t + dt) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}_e dt \quad (11)$$

$$r = r_{min} \quad (12)$$

$$|\mathbf{v}_e| = v_e = v_d^{max} \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_e^i = v_e \frac{\sum_j \mathbf{e}_{ij}}{|\sum_j \mathbf{e}_{ij}|} \quad (14)$$

$$\mathbf{e}^{ij} = \frac{\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j}{|\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j|} \quad (15)$$

2. Implementación

2.1. Estructura del proyecto

En cuanto a la implementación técnica del trabajo, se trabajó con el lenguaje de programación *Java*, en su versión 8, para las simulaciones, Ovito para las animaciones, y Python para el posprocesamiento de la información y la generación de los gráficos.

Para las simulaciones, se modeló el problema con la clase principal *Particle*, que describía el comportamiento completo de una partícula, mientras que las clases SFM y CPM tomaron la misma para realizar las simulaciones de acuerdo a lo estudiado en las ecuaciones planteadas. Se utilizaron algunas clases para modelar elementos del sistema como *Room* y *Wall*, que modelaron el recinto y las paredes, correspondientemente. También, se modeló el Gear Predictor Corrector para la utilización en el SFM.

A continuación, se observa el diagrama UML de las clases del proyecto:



Figura 1: Diagrama *UML* del proyecto

3. Simulaciones

Las simulaciones están divididas en dos partes: La primera es el estudio comparativo entre el CPM y el SFM, tomando como observable el caudal de salida de los peatones (puntualmente, el caudal específico); la segunda se trata del estudio del efecto *FIS* (*Faster is Slower*).

Para el primer conjunto de simulaciones, se tomaron condiciones iniciales idénticas, y se estudió, a partir de la misma velocidad deseada máxima v_d^{max} , cantidades variables de partículas N y ancho de puerta d .

Se tomaron los valores $N = 200, 260, 320, 380, 440, 500$ y ancho de puerta $d = 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, 4.2$, donde cada N tiene su d correspondiente en el orden indicado.

Con estos valores, se plantearon curvas de descarga, como también de caudal Q (tomando el promedio de salida con ventanas temporales de 5s) a lo largo de la simulación, y luego caudales medio y específico para cada uno.

Luego, con N, d como parámetros fijos, se busco variar v_d^{max} para estudiar el efecto de *FIS*, y observar hasta que punto se cumple (si es que efectivamente podemos observar este efecto).

La velocidad deseada máxima v_d^{max} fue evaluada en los valores 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0.

El sistema se modeló en un recinto de largo $L = 20m$ por $L = 20m$ de ancho, con la puerta siempre centrada del lado inferior. Luego, para los parámetros fijos de los sistemas a estudiar, el CPM toma $r_{min} = 0,1m$, $r_{max} = 0,37m$, $\beta = 0,9$, $\tau = 0,5$. Estos parámetros fueron tomados del paper original donde se presenta el modelo y la simulación.[2] Para el SFM, los parámetros tomados fueron $\tau = 0,5$, $A = 2,10^3N$, $B = 0,08m$, $k_n = 1, 2,10^5N/m$, $k_t = 2, 4,10^5N/m$. Estos parámetros fueron tomados del paper de Helbing, Farkas, y Vicsek [1]. También se fijó el radio de las partículas como $R = 0,3m$.

4. Resultados

4.1. CPM y SFM: Un estudio comparativo

Como se explicó en la sección de simulaciones, la primera parte de este estudio es observar y entender como aproximan ambos sistemas la misma simulación.

Siguiendo con las simulaciones, se propuso aumentar la cantidad de partículas y el ancho de puerta, en pos de estudiar el efecto sobre el caudal. Los resultados se pueden observar en la figura 2, con las curvas promedio para cada (N, d) .

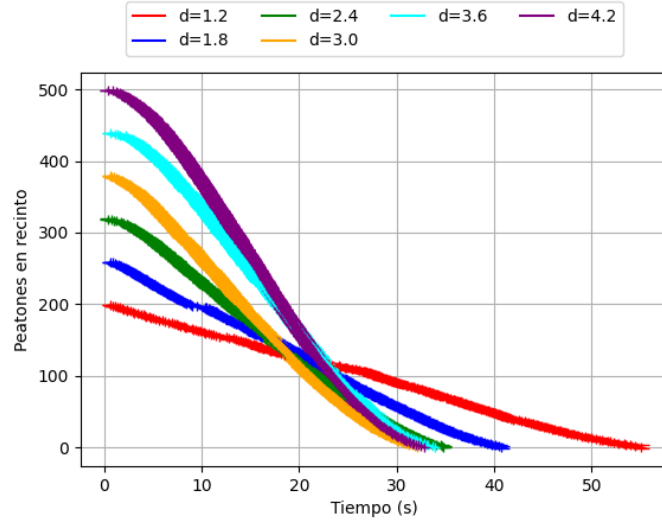


Figura 2: Curvas de descarga promedio con $N, d = [(200, 1,2), (260, 1,8), (320, 2,4), (360, 3,0), (420, 3,6), (460, 4,2)]$ ($v_d = 2m/s$) para el *Social Force Model*

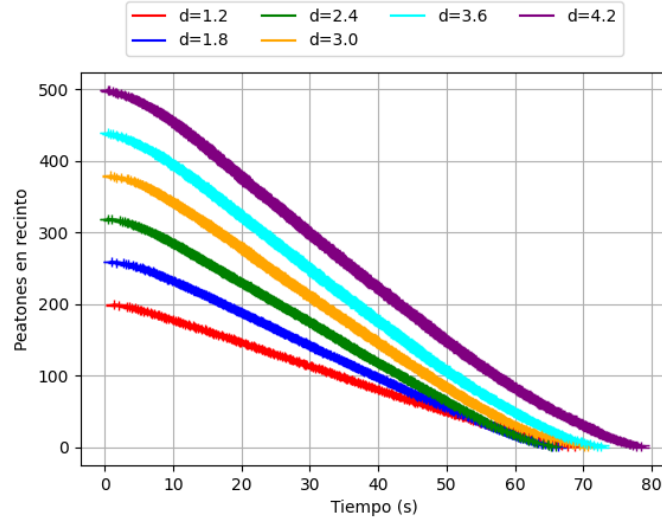


Figura 3: Curvas de descarga promedio con $N, d = [(200, 1,2), (260, 1,8), (320, 2,4), (360, 3,0), (420, 3,6), (460, 4,2)]$ ($v_d = 2m/s$) para el *Contractile Particle Model*

Para estudiar el caudal medio, se tomaron "ventanas" de 5 segundos, y se calculó cuantas partículas salieron en ese tiempo (tomando un promedio por segundo). Es decir, cada punto en el gráfico de la figura **n** representa el promedio de peatones que egresaron por segundo, en la ventana de 5 segundos. Aquí se observan los resultados obtenidos tanto para el *SFM* como para el *CPM*:

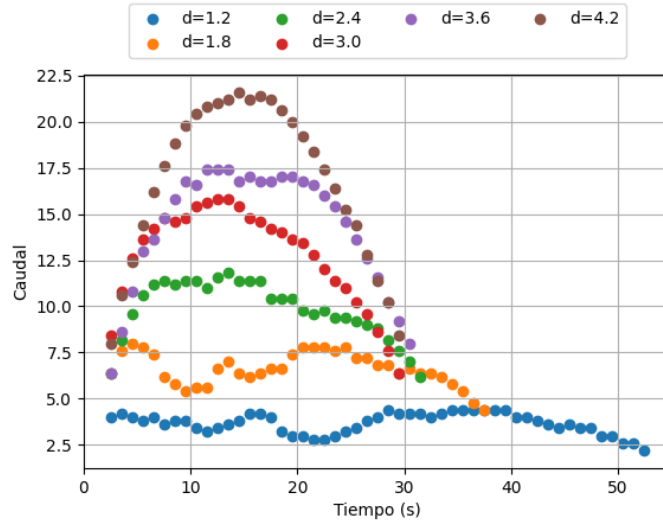


Figura 4: Caudal (ped/s) en función del tiempo para los diferentes d modelando con el *Social Force Model*

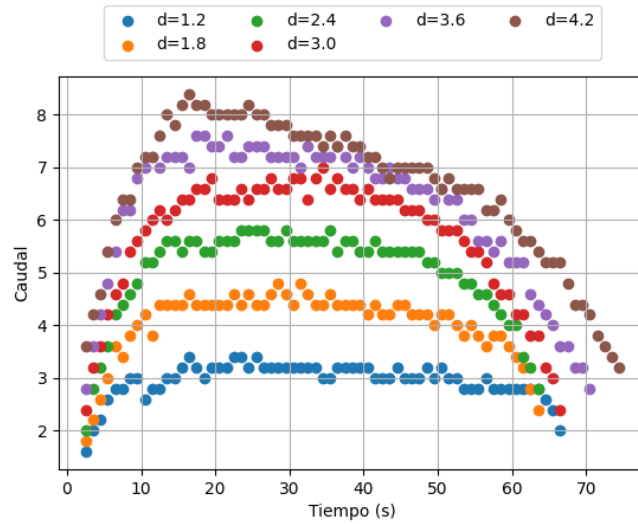


Figura 5: Caudal (ped/s) en función del tiempo para los diferentes d modelando con el *Contractile Particle Model*

En las figuras 3 y 4, observamos el efecto que pudimos notar a grandes rasgos en las curvas de la figura 2. Existe un estadio del sistema hasta que los peatones se acercan y 'agrupan' en la puerta en pos de salir, donde se puede observar un flujo de salida o caudal relativamente estable. En la Figura 6 se puede observar a los peatones amontonándose frente a la puerta (en violeta), permitiendo que unos pocos puedan salir a la vez (en amarillo o verde). Para el *SFM*, notamos una mayor variabilidad en el tiempo total de evacuación de los peatones, así como en la duración de este 'estado estacionario' de caudal. En el *CPM*, por otra parte, el flujo de salida de peatones del recinto se mantiene constante durante gran parte de la simulación, ascendiendo rápidamente al estado estacionario y descendiendo muy cerca del final.

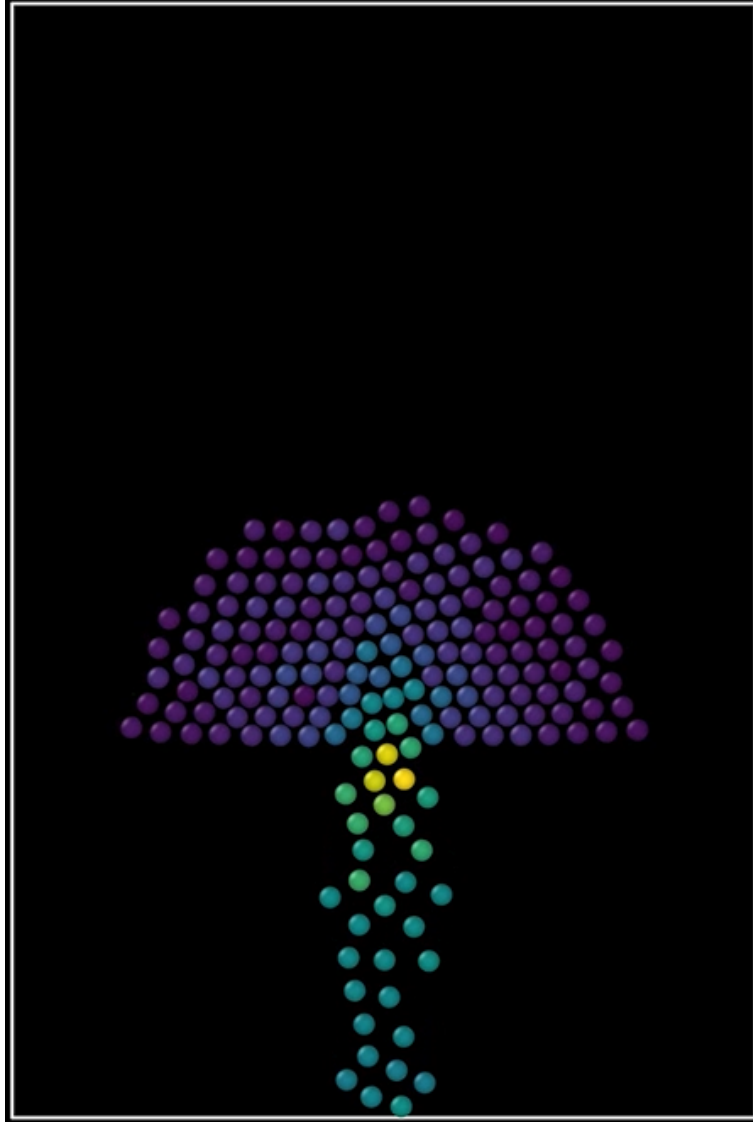


Figura 6: Peatones acumulándose frente a la puerta en una simulación generada por el *Social Force Model*

Otro fenómeno que se observa es la relación del tiempo total de evacuación con el ancho de puerta: la relación parece invertirse al pasar del *SFM* (en el cual las configuraciones con mayor número de partículas y mayor ancho de puerta muestran una evacuación más rápida) al *CPM* (en el cual sucede lo contrario). Se realizaron gráficos para visualizar el caudal *medio* Q_m y el caudal *específico* ($Q_e = Q_m/d$), en el estado estacionario, en función del ancho de puerta:

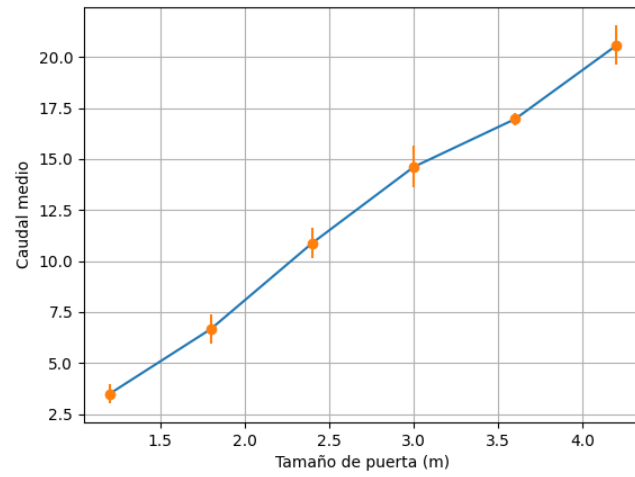


Figura 7: Caudal (ped/s) medio de egreso para los diferentes d modelando con el *Social Force Model*

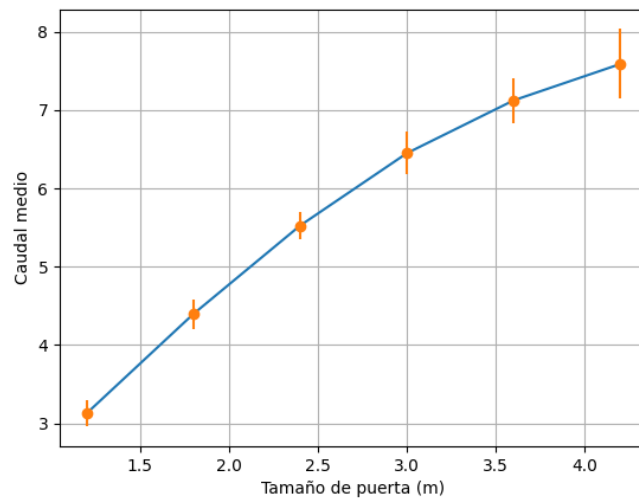


Figura 8: Caudal (ped/s) medio de egreso para los diferentes d modelando con el *Contractile Particle Model*

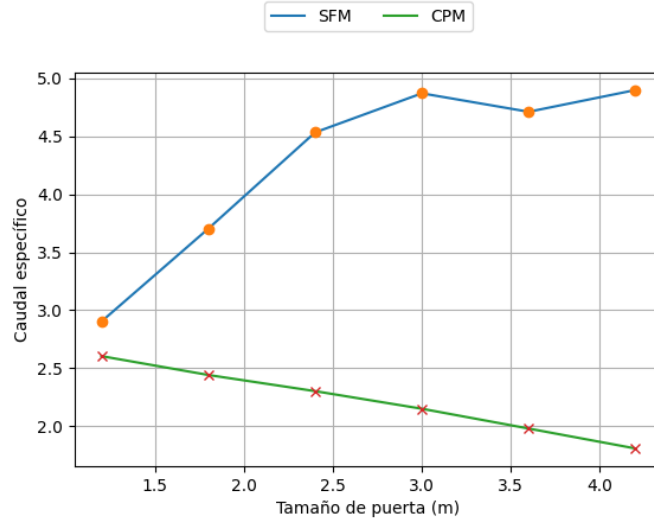


Figura 9: Caudal (ped/s) específico para los diferentes d

En las figuras 7 y 8 se observa un comportamiento esperable: a mayor ancho de puerta, mayor será el caudal de peatones que logre abandonar el recinto cuando se da la situación de 'amontonamiento' frente a la puerta. Sin embargo, resulta interesante estudiar cómo evoluciona el caudal medio al ir aumentando el ancho de la puerta; es por eso que se utiliza como parámetro el caudal específico, observable presentado en la Figura 8. El caudal específico está definido por el caudal medio dividido por el ancho de puerta, medido en $ped/s/m$. Conceptualmente, el caudal específico debería mantenerse constante en relación al tamaño de puerta. Ninguno de los dos modelos presenta exactamente este comportamiento, aunque se observa que el *CPM* se encuentra más cerca de lograrlo. En ambos casos se muestran caudales específicos generalmente por encima del intervalo $[1, 25; 2]$. Para el *SFM*, particularmente, obtenemos valores para el caudal específico significativamente por sobre el intervalo esperado.

4.2. Faster Is Slower

La segunda parte del trabajo se orientó a trabajar con el efecto *Faster Is Slower*, como se explicó anteriormente. Para esto, se varió la velocidad deseada máxima posible v_d^{max} entre $1,0m/s$ hasta $10m/s$. Además, se buscó explorar si el efecto *FIS* se puede observar tanto con el modelo *CPM* como también con *SFM*, o si ninguno de los dos nos permite analizar este fenómeno.

En primera instancia, se buscó estudiar el efecto de aumentar la velocidad deseada máxima v_d^{max} , pasando entre $[1,0, 2,0, 4,0, 6,0, 8,0, 10,0]m/s$, y al mismo tiempo probar si este efecto podía estar sujeto a la apertura de la puerta y al número de partículas, por lo que se repitió la simulación para varios anchos de puerta d . Los resultados se pueden observar en las figuras 10 y 11:

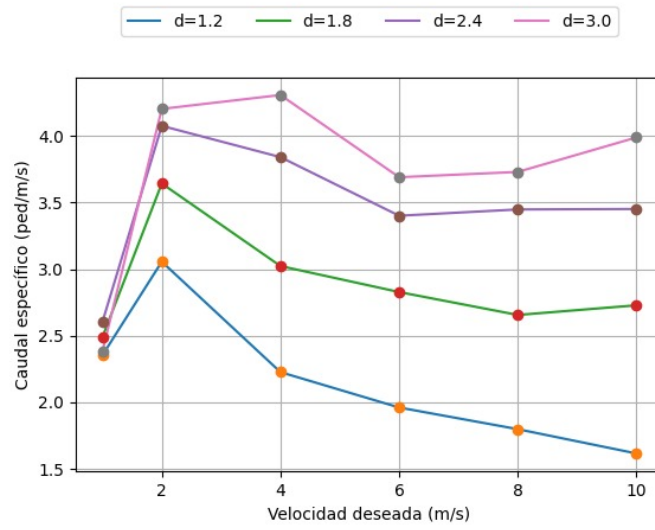


Figura 10: Caudal específico (ped/s/m) para los diferentes d con el modelo *Social Force Model*

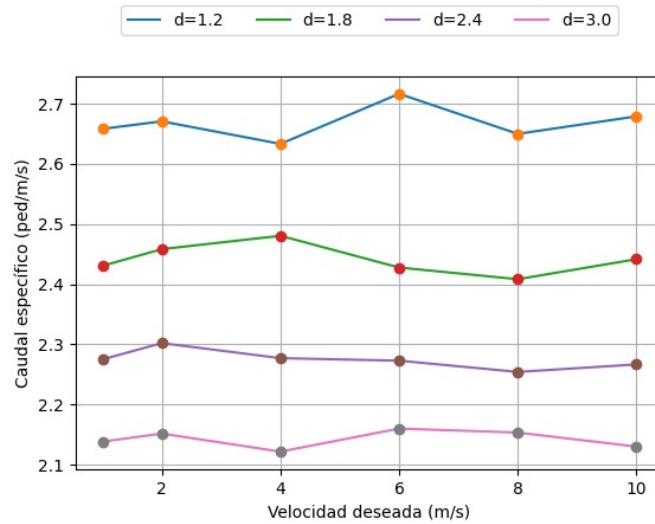


Figura 11: Caudal específico (ped/s/m) para los diferentes d con el modelo *Contractile Particle Model*

La Figura 10 nos muestra los caudales específicos obtenidos para diferentes velocidades, para cada apertura de puerta d . Lo primero que se observa es el comportamiento con la velocidad deseada de $1,0 \text{ m/s}$, donde el caudal es prácticamente el mismo. Esto resulta de una velocidad demasiado baja para la salida de los peatones; el caudal específico bajo que se obtuvo para esta velocidad deseada se explica en mayor medida por la baja velocidad de las partículas que por situaciones de atascamiento en la puerta. Para entender mejor este comportamiento, se comparó la curva de caudal a través del tiempo para velocidad de 1 m/s con la correspondiente a 4 m/s , velocidad en la que ya nos encontramos dentro del estado *Faster Is Slower*, pero que muestra un valor de caudal específico muy similar.

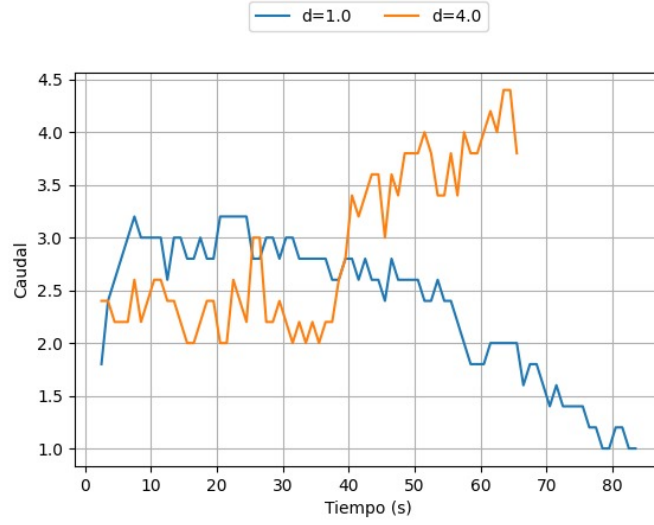


Figura 12: Caudal a través del tiempo para dos d diferentes, con el modelo *Social Force Model*

Vemos en la Figura 12 que, para $v_d^{max} = 1m/s$, el flujo de peatones por la puerta se desarrolla de forma prácticamente constante durante la mayor parte de la simulación; por otro lado, para $v_d^{max} = 4m/s$, existe una mayor amplitud para los valores de caudal en distintos momentos de la simulación, mostrando que existen bloqueos en una proporción mucho mayor, así como repentinas "descargas" de peatones pasando por la puerta en momentos en los que estos bloqueos se liberan. A su vez, en los momentos en los que no se presentan amontonamientos, el caudal será mayor debido al mayor valor de velocidad deseada de los peatones.

A partir de $v_d^{max} = 2m/s$ en adelante se puede observar el efecto que queremos analizar. A medida que nos movemos hacia la derecha en el gráfico, la velocidad máxima de las partículas aumenta, pero no así el caudal específico. Esto ocurre para todas las aperturas de puerta, al menos para las velocidades entre $2m/s$ y $8m/s$. Sin embargo, también se observa que ocurre algo más a considerar: excepto para la curva de $d = 1, 2m$, en el resto de los casos se observa un comportamiento *Faster Is Faster* para las velocidades más altas del estudio, particularmente para $10m/s$. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que, a partir de ciertas magnitudes de velocidad deseada, un incremento en la velocidad no necesariamente implique un aumento en la cantidad de amontonamientos frente a la puerta, pero sí provoca una mayor presión de los peatones agolpados, lo cual puede resultar en una más veloz ruptura del cúmulo bloqueante [4].

Este efecto no se puede apreciar de tal manera para el modelo *CPM*. Observamos que el aumento en velocidad del sistema no repercute negativamente de ninguna forma en la salida de los peatones del recinto, manteniéndose el caudal específico en valores relativamente similares. Este efecto se observa repetido con todas las amplitudes de puerta testeadas.

Para medir la *intensidad* del efecto producido por el *Faster Is Slower*, se buscó modelar matemáticamente una cuantificación que permita acercarse al valor a 0 cuando el aumento en velocidad no repercutía en el caudal de salida ni positiva ni negativamente (en términos simples, 'cuando no hay FIS').

Para esto, se tomó una cantidad escalar que denominamos *Coeficiente FIS*, dada por la suma de las diferencias entre los distintos puntos de las curvas de las Figuras 10 y 11 con puntos anteriores de la misma curva, siendo estas diferencias divididas por la diferencia entre velocidad deseada de los puntos. Se define:

$$FIS = -10 \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^i \frac{Q_e^i - Q_e^j}{v_d^{max_i} - v_d^{max_j}} \quad (16)$$

Los sumandos representan la pendiente de la recta que uniría los distintos puntos de la curva, dando una medida de cómo varió el caudal específico en función de los cambios de velocidad. Como queremos que el valor de FIS sea alto en el caso de que las pendientes sean negativas, debemos invertir el signo; a su vez, decidió multiplicar los resultados por 10 para una mayor claridad en la presentación de los mismos. Se excluyó del cálculo el primer punto, $v = 1m/s$, para todos los casos; se considera que a esta velocidad no se está en el régimen de "Faster Is Slower", por lo que no conviene agregarlo al análisis para obtener un resultado claro.

Este cálculo refleja que si la diferencia entre las pendientes es similar, el valor del coeficiente se acerca al 0.

Los resultados del 'Coeficiente FIS' calculado se pueden observar en la Figura 13:

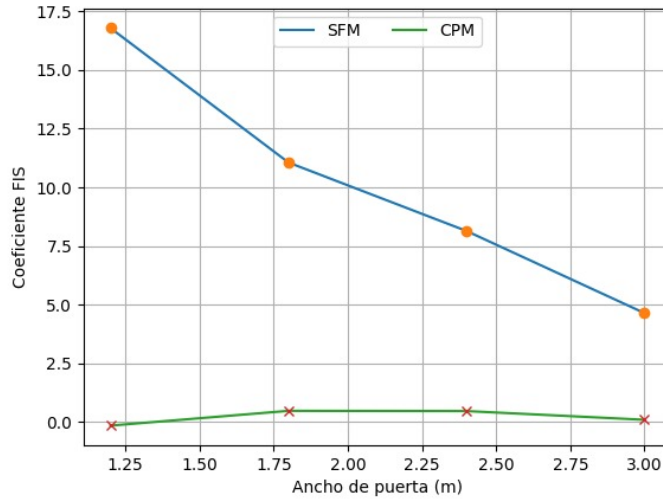


Figura 13: 'Coeficiente FIS' contra el ancho de puerta d evaluado con SFM y CPM.

Es notorio que el SFM y el CPM reflejan diferencias claras a la hora de estudiar el efecto de FIS. Para la curva del CPM, todos los puntos se encuentran muy cerca del 0, implicando que, con este modelo de estudio de las partículas, no se puede estudiar el efecto del FIS.

Sin embargo, el modelo SFM muestra mayores valores para el coeficiente, mostrando la existencia del FIS. Es interesante observar el comportamiento de la curva; a medida que la apertura de la puerta se agranda, el valor del coeficiente se reduce. Esto se puede adjudicar al hecho de que un mayor tamaño de puerta ayuda a que se generen menos bloqueos (o se desarmen más rápidamente); también existe una relación entre la presión generada por un mayor número de peatones (se recuerda que los aumentos en el ancho de puerta traían consigo un aumento en el número de peatones) y un potencial efecto *Faster Is Faster* que puede tener un rol [4].

5. Conclusiones

El estudio realizado arrojó numerosas conclusiones respecto del modelado del escenario de peatones evacuando un recinto mediante los modelos *SFM* y *CPM*. Ambos modelos han mostrado

resultados diferentes, así como sus propios patrones de comportamiento. Mientras que para el *SFM*, aumentar tanto el número de peatones como el ancho de puerta resultó en una mayor velocidad de evacuación, para el *CPM* se observó lo contrario. Las simulaciones realizadas con el *CPM* arrojaron valores de caudal específico más cercanos a aquellos observados experimentalmente, y considerados por regulaciones de seguridad; el *SFM* mostró valores de caudal muy altos, resultando en velocidades de evacuación significativamente más altas. En cuanto al fenómeno *Faster Is Slower*, el *SFM* resultó el modelo exitoso. Pudimos observar dicho comportamiento, viendo como situaciones de mayor estrés, representadas por una velocidad deseada mayor, derivaban en caudales más bajos de evacuación de peatones, resultando en un mayor tiempo de evacuación. La principal razón de este comportamiento se encuentra en el hecho de que este ímpetu de los peatones por abandonar el recinto hace que muchos se amontonen en la puerta, bloqueando la salida, en vez de salir ordenadamente. El ancho de puerta tiene un efecto importante en este fenómeno; mayores anchos de puerta hace que se produzcan menos bloqueos, o que éstos sean menos importantes; una potencial explicación de porqué en el *SFM*, al aumentar tanto ancho de puerta como número de peatones, lo que prevalece es el ancho de puerta, generando evacuaciones más fluidas. Se observó que el valor óptimo de velocidad deseada para este escenario se encuentra cercano a los $2m/s$, velocidad en la cual los peatones se mueven rápidamente hacia la puerta, pero no genera bloqueos en tanta cantidad y magnitud como para velocidades aún mayores. El *CPM*, por otro lado, no pudo reproducir el efecto *FIS*; aumentar la velocidad deseada de los peatones no produjo grandes cambios en el caudal específico en el estado estacionario. En el futuro, sería interesante investigar cómo se pueden modelar otras posibilidades de lo que puede ocurrir en el escenario de una evacuación, como peatones que se tropiezan o que resultan heridos, y qué efecto puede tener esto en los observables presentados.

Bibliografía

- [1] Dirk Helbing, Illés Farkas y Tamás Vicsek. “Simulating Dynamic Features of Escape Panic”. En: *Nature* 407 (sep. de 2000), págs. 487-490. DOI: [10.1038/35035023](https://doi.org/10.1038/35035023).
- [2] Gabriel Baglietto y Daniel Parisi. “Continuous-space automaton model for pedestrian dynamics”. En: *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 83 (mayo de 2011), pág. 056117. DOI: [10.1103/PhysRevE.83.056117](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.056117).
- [3] Daniel Parisi e Iker Zuriguel. “Experimental proof of faster-is-slower in systems of frictional particles flowing through constrictions”. En: *Physical Review E* 92 (dic. de 2015), pág. 062817. DOI: [10.1103/PhysRevE.92.062817](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062817).
- [4] Ignacio Sticco et al. “Beyond the ”faster is slower.^{effect}”. En: *Physical Review E* 96 (jun. de 2017). DOI: [10.1103/PhysRevE.96.052303](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.052303).