



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE FÍSICA JUAN JOSÉ GIAMBIAGI

Dinámica de partículas autoimpulsadas:
evacuación a través de dos puertas.

TESIS DE LICENCIATURA

Ignacio Mariano Sticco

Director: Dr. Claudio Oscar Dorso

Codirector: Dr. Guillermo Alberto Frank

Septiembre de 2016

TEMA: Dinámica de partículas autoimpulsadas: evacuación a través de dos puertas.

ALUMNO: Ignacio Mariano Sticco

LU N°: 888/10

LUGAR DE TRABAJO: Departamento de Física, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad de Buenos Aires (UBA)

DIRECTOR DEL TRABAJO: Dr. Claudio Oscar Dorso

CODIRECTOR DEL TRABAJO: Dr. Guillermo Alberto Frank

FECHA DE INICIACIÓN: Septiembre de 2015

FECHA DE FINALIZACIÓN: Septiembre de 2016

FECHA DE EXAMEN:

INFORME FINAL APROBADO POR:

| | |
|--|---------------------|
| Autor | Jurado |
| Director | Jurado |
| Profesor de Tesis de Licenciatura | Jurado |

Contenidos

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| Appendices | 1 |
| 1 Introducción | 5 |
| 1.1 Antecedentes | 5 |
| 1.2 Objetivos | 10 |
| 2 Marco Teórico | 11 |
| 2.1 Modelo de Fuerza social | 11 |
| 2.2 Blocking Clusters | 13 |
| 2.3 Algoritmo de Verlet | 15 |
| 3 Simulaciones | 17 |
| 3.1 Condiciones iniciales | 18 |
| 3.2 Módulos | 19 |
| 3.3 Mediciones Realizadas | 21 |
| 4 Resultados y Discusión | 24 |
| 4.1 Una puerta | 24 |
| 4.2 Dos puertas | 32 |
| 4.2.1 Faster is slower | 32 |
| 4.2.2 Tiempo de evacuación | 34 |
| 4.2.3 Blocking clusters | 36 |
| 4.2.4 Presión | 38 |
| 5 Conclusiones | 41 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| Apéndices | 43 |
| A Presión | 44 |
| A.1 Presión local | 44 |
| A.2 Individuos en hilera | 46 |
| A.3 Muestras de performance | 47 |
| A.3.1 Partículas centradas | 49 |
| A.3.2 Partículas en hilera | 50 |
| B Script básico de Lammmps | 52 |
| C Características del cluster | 57 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

A lo largo de los últimos años se evidenció cómo la dinámica descontrolada de multitudes (*i.e.* en estado de pánico) llevó a tener que lamentar numerosas víctimas. Se recuerdan las fatalidades de la “puerta 12” en el estadio de River Plate (1968) y la catástrofe en el salón de espectáculos de Cromagnon (2004), por mencionar algunos hechos conmovedores. Otras fatalidades se han convertido en recurrentes como las del puente de Jamaraat, durante la peregrinación anual a la Meca.

Estos sucesos ocasionados por el movimiento de multitudes en estado de pánico ha atraído la atención de investigadores en diversas áreas (psicología social, ingeniería, física, etc.). Diversos modelos han sido propuestos para describir esta problemática, que van desde la dinámica de fluidos hasta los autómatas celulares.

En una aproximación al continuo, algunos autores utilizan ecuaciones de evolución del tipo fluido. El esfuerzo está puesto en analizar la evolución temporal de una cierta “densidad de masa de individuos” y del flujo, que viene a representar, de manera simplificada, el movimiento de personas [4].

Por otro lado, los modelos de tipo autómatas celulares asimilan a los individuos como agentes móviles sobre un arreglo regular de “celdas”. Éstos se desplazan “celda a celda” de acuerdo a reglas diseñadas para reproducir comportamientos típicos de peatones en multitudes. Tienen la ventaja de ser muy rápidos y fácilmente entendibles para los no habituados a problemas de dinámica molecular o granular. Sin embargo, no son muy aptos para describir la emergencia de situaciones de alta densidad y las correspondientes variaciones de la dinámica [1].

Una mejor aproximación al estudio del movimiento de multitudes es el modelo de Fuerza Social de Helbing [9]. El modelo de Helbing se basa en observaciones empíricas sobre el comportamiento social de individuos. Considera que el movimiento de individuos se debe a una combinación de fuerzas socio-psicológicas y físicas. Las fuerzas ingresan entonces a una ecuación de movimiento clásica.

El modelo básico de Helbing identifica al menos dos tipos de “fuerzas sociales” y una fuerza “física”. Las dos primeras corresponden al “deseo” del individuo por moverse en cierta dirección (como consecuencia de sus propias motivaciones) y a la “preservación” de su “espacio de privacidad”, o sea, la tendencia de los individuos a estar alejados unos de otros. La fuerza “física” es la fricción experimentada entre individuos en contacto. En las Refs [9, 19, 7] se puede encontrar información detallada sobre cada una de las fuerzas.

La “fuerza de deseo” es el resultado de las motivaciones de los individuos. Allí se incluye, no sólo el nivel de ansiedad de una persona para llegar a destino, sino también otros factores de su personalidad y cultura, como por ejemplo, la tendencia a seguir a otros, o de establecer consensos [7, 8]. Puede consultarse las Refs. [22, 16] para algunas situaciones específicas. La formulación matemática del modelo de Helbing será detallada en el capítulo 2.

El modelo de fuerza social es capaz de describir varios fenómenos propios de las evacuaciones en estado de pánico. Entre ellos el efecto más sobresaliente es el “más rápido es más lento” (faster is slower) [9]. Cuando los individuos se esfuerzan más por salir, más tiempo demoran. En este régimen, se producen demoras debido al incremento en la fricción entre personas y

a la formación de estructuras bloqueantes ("blocking cluters"). En las Refs. [19] se pueden encontrar más detalles al respecto.

El modelo básico de Helbing cubre una amplia variedad de situaciones y puede utilizarse para modelar evacuaciones en recintos con geometrías complejas. En este trabajo de tesis se aborda la problemática de evacuaciones en estado de pánico en recintos con una y dos puertas sobre la misma pared.

La práctica de incluir dos puertas para evacuaciones de emergencia se remonta a los tiempos de la última dinastía Qing en China (1644-1911 AD). Una norma legal estableció que los edificios grandes debían tener dos salidas para evitar problemas en caso de incendio [2].

Las regulaciones edilicias actuales cuentan con especificaciones bien detalladas sobre la ubicación de las puertas de emergencia, su ancho y la separación entre éstas [18, 6]. Además exigen que el ancho mínimo de las puertas debe ser 0,813 m y el tamaño máximo de una hoja no debe ser mayor a 1,219 m[6, 5]. Si se requieren más de dos puertas, la separación entre dos de ellas debe ser al menos un cuarto o un tercio de la distancia diagonal máxima de la habitación. No hay ningún requerimiento especial sobre el resto de las puertas, más allá del hecho que no deben estar simultáneamente bloqueadas[6, 5].

La regulación vigente permite que cualquier salida adicional a las dos obligatorias sea ubicada en una posición arbitraria. De esta forma, es posible encontrar configuraciones de dos puertas en un mismo lado del recinto (existiendo otra a una distancia mayor). El caso especial de dos puertas contiguas ha sido examinado en la literatura [14, 20, 3, 11].

Kirchner y Schadschneider estudiaron el proceso de evacuación de peatones a través de dos puertas contiguas usando un modelo de autómatas celulares[14]. Los agentes podían abandonar la habitación siguiendo comportamientos que iban desde el individualismo hasta un movimiento fuertemente acoplado como el de una *manada*. Según este modelo, el tiempo de evacuación resultó ser independiente de la distancia entre las puertas contiguas (cuando los

individuos se comportan de manera individualista). Pero, si los peatones se movían en manada, se reportó un tiempo de evacuación mayor para separaciones entre puertas (contiguas) menores a 10 individuos.

Otras investigaciones parecen no concordar con las observaciones de Kirchner y Schadschneider. En la Ref. [20] se concluye que el número de peatones que abandona el recinto por unidad de tiempo mostró una disminución para distancias de separación menores al ancho de cuatro puertas. Esta disminución del flujo fue asociada a un efecto de interferencia debido a peatones cruzándose mutuamente. El umbral de cuatro anchos de puerta ($4 d_w$) corresponde a la distancia de separación necesaria para distinguir dos grupos independientes de peatones, cada uno de ellos rodeando a la puerta más cercana (en recintos con 200 individuos).

Los investigadores destacaron el hecho de que para distancias de separación muy grandes entre puertas, el rendimiento de la evacuación no mejora el doble respecto al rendimiento que tiene una única salida (con un ancho igual al doble). Este efecto se le atribuye a algún tipo de interferencia entre peatones[20].

Aunque los resultados arriba mencionados fueron obtenidos para puertas muy angostas (*i.e.* del ancho de un individuo), investigaciones posteriores exhiben resultados similares para anchos de puertas equivalentes a dos individuos. A pesar de ello, si los peatones salen por una única salida, el flujo de salida parece depender del ancho de la puerta, de acuerdo a los resultados mostrados en la Ref. [3]. La tasa del flujo dividido el ancho de la puerta (es decir, flujo/ancho) parece decrecer aunque el flujo total aumente [3].

Cuando la separación entre puertas es muy grande, puede ocurrir que las mismas queden ubicadas muy cerca de una esquina. Según las Refs. [14, 3], este hecho perjudica la eficiencia en la evacuación, pero no se conoce una explicación precisa de este fenómeno.

Según algunos investigadores (Ref. [11], es posible identificar cinco distancias capaces de

afectar la eficiencia de la evacuación de individuos: el ancho total de las salida (es decir, sumar los anchos de cada puerta), la distancia de separación entre puertas, la diferencia de ancho entre las puertas y la distancia a la esquina más cercana [11].

Algunos resultados recientes muestran que el ancho total de las salidas (suma del ancho de las dos puertas) puede mejorar el tiempo de evacuación entre puertas, independientemente de la distancia de separación (dentro de un cierto rango). Pero, si este ancho total se mantiene constante, la distancia entre puertas parece regular en cierta forma la eficiencia en la evacuación (ver Ref. [11]).

En suma los resultados previos sugieren que:

- (a) Según Kirchner y Schadschneider [14], el tiempo de evacuación es independiente de la distancia de separación para el caso de peatones con comportamiento individualista. Esto será refutado en la sección 4.2.
- (b) Si los peatones se mueven en manada, el tiempo de evacuación para pequeñas separaciones es mayor [14]. En este trabajo de tesis no se analiza el caso de movimientos en manada.
- (c) Según Perez [20], el número de peatones que abandonó el recinto por unidad de tiempo mostró una disminución para distancias de separación menores al ancho de cuatro puertas. Esto no concuerda con los resultados discutidos en la sección 4.2.
- (d) No importa cuan separadas están las dos puertas, el rendimiento de la evacuación no mejora el doble respecto al rendimiento que tiene una única salida (con el mismo ancho). Se mostrarán resultados que concuerdan con esta observación en la sección 4.2.

Nuestra investigación se centra en configuraciones simétricas con puertas de igual tamaño. A diferencia de la literatura arriba mencionada, se examina la dinámica de la evacuación a través del modelo de fuerza social. En el capítulo siguiente se encuentra una descripción de dicho modelo.

1.2 Objetivos

En este trabajo nos proponemos estudiar la dinámica de evacuación de peatones en estado de pánico en recintos con una o dos salidas disponibles. Se explorarán distintos escenarios con cientos de personas.

Se compararán campos de presión y velocidad para recintos con puertas anchas y angostas con el fin de comprender cómo el ancho de la salida afecta el comportamiento de la evacuación. La descripción de esta problemática será tratada en la sección 4.1

Se modificará la cantidad de peatones y el grado de ansiedad de los individuos para observar cómo estas propiedades alteran la dinámica y encontrar magnitudes que sean independientes de las mismas. Estos aspectos se exhiben a lo largo del capítulo 4

Se realizarán simulaciones para saber a qué distancia deben ubicarse las puertas para que la evacuación se efectúe en el menor tiempo posible. Además se buscará responder si una única puerta ancha produce una evacuación igual de eficiente que dos puertas angostas separadas. El abordaje de esta parte de la investigación se desarrolla en la sección 4.2

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se describirá el modelo en el cual se basa toda la investigación, también se definirán los conceptos utilizados a lo largo del trabajo como la definición de la presión social y los "blocking clusters". Además se comentará el algoritmo de integración temporal utilizado en la evolución temporal de cada proceso.

2.1 Modelo de Fuerza social

El modelo de "fuerza social" básico considera a los individuos como partículas auto-impulsadas. El movimiento de los individuos está dominado por tres tipos de fuerzas de naturaleza diferente: la fuerza de deseo (autopropulsión), fuerzas sociales (repulsión) y fuerzas granulares (rozamiento). Se tienen en cuenta la interacción entre individuos y la interacción individuo-pared. Todas estas serán detalladas más adelante.

Las fuerzas del modelo básico ingresan a una ecuación de movimiento (ley de Newton) de la forma de Ec. (2.1); de esta manera queda expresada la variación de velocidad en el tiempo que siente un individuo. El término $\mathbf{f}^{(ij)}$ es la interacción entre individuos; mientras que $\mathbf{f}^{(iW)}$ refleja la interacción con las paredes. Ambos términos contemplan tanto a la repulsión como al rozamiento. La variación de la posición viene dado por $v_i(t) = d\mathbf{r}_i/dt$.

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_d^{(i)}(t) + \sum_{i \neq j}^N \mathbf{f}^{(ij)} + \sum_W^N \mathbf{f}^{(iW)} \quad (2.1)$$

La fuerza de deseo expresa el hecho de que cada persona es capaz de acelerar o desacelerar hasta alcanzar la velocidad en que se siente más cómoda. La magnitud de esta velocidad se corresponde con el nivel de ansiedad que tenga por llegar a cierto lugar. La expresión matemática de esta fuerza viene dada por la fórmula 2.2. Esta fórmula refleja el hecho que el individuo i -ésimo, que posee masa m_i , desea moverse con una velocidad $v_d^{(i)}(t)$ en una dirección $\hat{\mathbf{e}}_d^{(i)}(t)$, por lo tanto readapta su velocidad $\mathbf{v}_i(t)$ con un cierto tiempo característico τ .

$$\mathbf{f}_d^{(i)}(t) = m_i \frac{v_d^{(i)}(t) \hat{\mathbf{e}}_d^{(i)}(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau} \quad (2.2)$$

La repulsión social es una fuerza que describe la tendencia que tienen las personas a mantenerse alejadas unas de otras. Depende de la distancia de separación entre individuos $d_{ij} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$ y está en la dirección normal $\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)/d_{ij}$ (versor que apunta desde el individuo j al individuo i). Los peatones están en contacto si el valor de d_{ij} es más chico que la suma de los radios $r_{ij} = (r_i + r_j)$. A_i y B_i son constantes que se determinan experimentalmente.

$$\mathbf{f}_s^{(ij)} = A_i e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} \mathbf{n}_{ij} \quad (2.3)$$

Cuando los individuos están en contacto, comienza a actuar una fuerza de rozamiento, la misma es proporcional a la velocidad relativa entre los mismos $\Delta \mathbf{v}_{ij} = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)$. La dirección tangencial está representada por $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$. κ es una constante y $g(x)$ es una función nula cuando los individuos no se tocan ($r_{ij} < d_{ij}$) y toma el valor de su argumento en caso contrario.

$$\mathbf{f}_g^{(ij)} = \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{t}_{ij} \quad (2.4)$$

La interacción de los individuos con las paredes tiene un tratamiento similar al que se tiene con la interacción entre individuos. La expresión (2.5) agrupa tanto a la repulsión como al rozamiento de la interacción peatón-pared. Las variables que componen esta expresión son:

d_{iW} que es la distancia del i -ésimo peatón con la pared W , n_{iW} es la dirección perpendicular entre éstos y t_{iW} la dirección tangencial.

$$\mathbf{f}^{iW} = A_i e^{(r_i - d_{iW})/B_i} \mathbf{n}_{iW} - \kappa g(r_i - d_{iW}) \Delta \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iW} \quad (2.5)$$

A partir de la ecuación de movimiento (2.1) y de las condiciones iniciales en posición y velocidad de los individuos, es posible determinar la dinámica de los peatones a lo largo del tiempo.

Una magnitud relevante y utilizada para caracterizar las multitudes evacuando en estado de pánico es la presión que siente cada individuo. En el área de la dinámica molecular existen diversas formas de definir la "presión local" [15]. Según Helbing, esta se define como la suma de fuerzas normales actuando sobre un individuo, dividido su perímetro [9]. Por lo tanto, se tiene una fuerza por unidad de longitud; esta misma se representa en la ecuación (2.6). En la Ref. [9] se reporta que a valores de presión superiores a 1600 Nm^{-1} los individuos se lastiman y se vuelven obstáculos inamovibles. En este trabajo no se tienen en cuenta los eventuales desmayos producidos por las altas presiones.

$$P_i = \frac{1}{2\pi r_i} \sum_{j \neq i}^N \mathbf{f}_s^{(ij)} \cdot \mathbf{n}_{ij} \quad (2.6)$$

En el apéndice se desarrolla una derivación de la presión local que utiliza el teorema del virial y da soporte teórico a la presión utilizada por Helbing. En la sección 2.3 se detallará el cómputo de integración temporal de la Ec. (2.1), mientras que en la Sección 3.1 se comentarán qué condiciones iniciales se eligieron para cada situación de escape.

2.2 Blocking Clusters

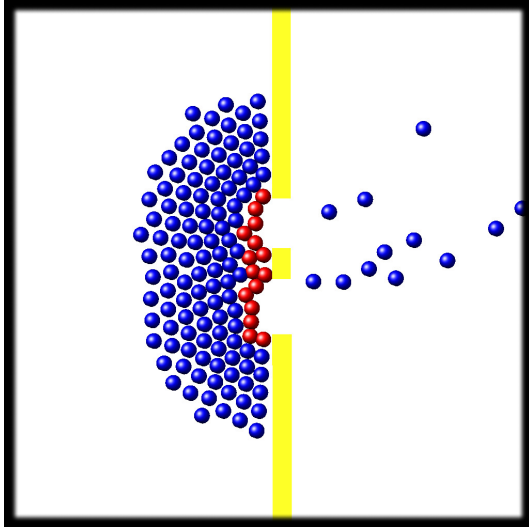
Al analizar la evolución de los individuos en estado de pánico se observó que el flujo no era constante y que presentaba "saltos" asociados a "taponamientos". Resultó entonces apropiado definir el concepto de blocking cluster [19] para estudiar a los individuos más próximos a la puerta que satisfacen la condición de estar en contacto con ella. Se lo define

como un conjunto mínimo de individuos en contacto que va desde un punto de la pared hacia otro. Estos puntos están próximos a los costados de la puerta. En forma más rigurosa, si un cluster granular (cluster humano) se define como

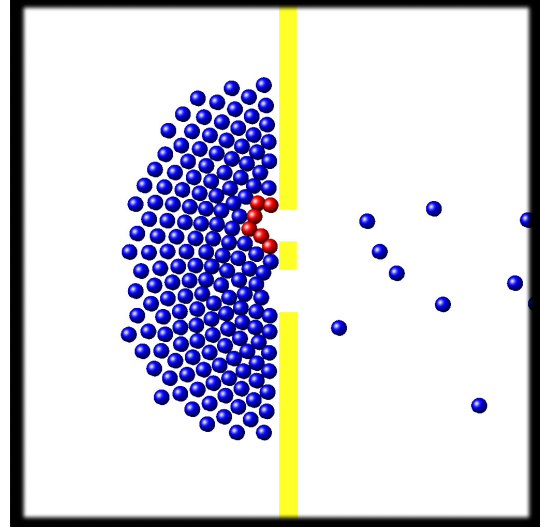
$$P_i \in C_g \iff \exists j \in c_g / d_{ij} < (r_i + r_j) \quad (2.7)$$

Siendo P_i la i -ésima persona y r_i su radio. Entonces el blocking cluster corresponde al subconjunto mínimo de individuos (del cluster granular) tal que se encuentran más cerca de la puerta y cuyas primer y última partículas están en contacto con la pared a ambos lados de la puerta. Aquellos peatones que conforman el blocking cluster son los responsables de bloquear la salida de los individuos que se encuentran detrás de ellos. Típicamente se observa que los blocking cluster formados en las evacuaciones tiene estructura de "arco" como el que se muestra en la Fig. 2.1. Basta que un solo peatón deje de estar en contacto con sus vecinos para que el blocking cluster deje de estar constituido. Además, estas estructuras mínimas actúan como una barrera para los individuos que tienen detrás, impidiendo la evacuación de peatones.

En este trabajo consideramos dos definiciones adicionales referentes a los *blocking clusters*: por un lado, si los extremos de este no están en contacto con la pared de separación de las puertas (pero sí con las otras paredes del mismo lado del recinto) lo llamamos *big blocking cluster*. En cambio, si una de las paredes de contacto es la pared de separación entre puertas, entonces los llamamos *small blocking cluster* (ver ejemplos en la Fig. 2.1).



(a) *Big blocking cluster*



(b) *Small blocking cluster*

Figure 2.1: Imagen del proceso de evacuación de 200 individuos a través de dos puertas (velocidad de deseo $v_d = 4 \text{ m/s}$). Las paredes se muestran en amarillo. Los individuos corresponden a las partículas en color azul. La salida de personas se produce de izquierda a derecha. Los *blocking clusters* están identificados en color rojo. (a) se muestra un *big blocking cluster*. La unión de individuos contempla las dos puertas. (b) Se muestra un *small blocking cluster* alrededor de la puerta superior.

2.3 Algoritmo de Verlet

Para integrar las ecuaciones de movimiento se usó el algoritmo de Verlet en velocidades [12]. Este método es ampliamente utilizado en el campo de dinámica molecular. Para esta forma de resolución, las ecuaciones que lo describen son:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(t)\Delta t^2 \quad (2.8)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{a(t) + a(t + \Delta t)}{2}\Delta t \quad (2.9)$$

El esquema de Verlet tiene un error de truncamiento local de (Δt^2) . En la Fig. 2.2 se muestra un diagrama del procedimiento, en donde se detalla la secuencia de actualización de variables para cada individuo. En el estado inicial disponemos únicamente de las posiciones

y las velocidades de los individuos. Las aceleraciones se obtienen por medio de evaluación de las fuerzas \mathbf{f}_d , \mathbf{f}_s y \mathbf{f}_g . Con estas magnitudes se calcula una nueva posición, se re-evalúan las fuerzas (aceleraciones) y se re-calcula la velocidad. Luego se vuelven a actualizar la posiciones y se repite el ciclo hasta construir las trayectorias de las partículas. En la sección 3.1 del capítulo 3 se detallarán las condiciones iniciales usadas en cada proceso de evacuación.

El algoritmo de Verlet es ampliamente utilizado por preservar las simetrías de las ecuaciones de Newton y las propiedades físicas de una gran cantidad de sistemas. Esto es gracias al hecho que tiene reversibilidad temporal y es simpléctico (conserva el volumen en el espacio de fases). Además, es simple de implementar y posee buena estabilidad incluso para pasos temporales moderadamente grandes.

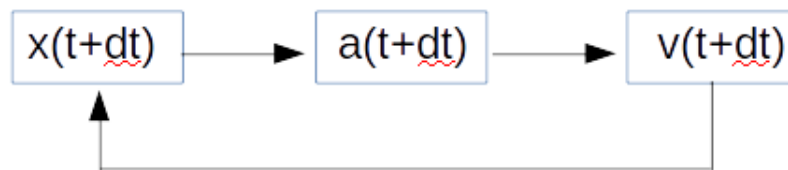


Figure 2.2: Esquema del procedimiento algorítmico de Verlet en velocidades

Capítulo 3

Simulaciones

En este capítulo se describirán los métodos usados para llevar a cabo las simulaciones.

Para realizar las simulaciones se utilizó el programa LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [21]. Es un software de código libre distribuido bajo los términos de GPL. LAMMPS se caracteriza por hacer uso de las listas de vecinos para efectuar cálculos que permiten reducir la complejidad algorítmica, hace posible correr las simulaciones en un único procesador o en paralelo (valiéndose de técnicas message-passing y descomposición espacial del dominio de simulación), además cuenta con una gran cantidad de funciones implementadas orientadas al uso de simulaciones de dinámica molecular.

Todas las simulaciones constaron de N individuos en un recinto cuadrado cuyo tamaño estaba ligado a la cantidad de peatones de modo tal que mantenga constante la densidad. En una de las paredes se ubicaron una o dos puertas. Las puertas se ubicaban simétricamente respecto del medio para evitar efectos de borde. Cuando el recinto tenía dos salidas, ambas se fijaban del mismo ancho. Las condiciones iniciales se detallan en la subsección 3.1. Luego del instante inicial, los agentes cambiaban su velocidad acorde a la velocidad de deseo (parámetro asociado al apuro) configurada de forma tal que los individuos evacúen por la puerta más cercana. Una vez que los individuos abandonaban el recinto no se los reinyectaba. De esta forma, al evacuar dejaban de importar sus observables.

La información era guardada cada 0,05 s. Para integrar las ecuaciones de movimiento se utilizó el algoritmo de Verlet.

Los gráficos de la figura 3.1 representan el estado inicial de una simulación (izquierda) donde los individuos están ordenados en un arreglo periódico cuadrado. La imagen de la derecha muestra el estado 50000 iteraciones después (luego de 5 segundos de simulación). Puede verse que para ese entonces la multitud forma una estructura de "semi círculo" en torno a la salida. Este fenómeno emergente es propio de la dinámica granular [13] y característico de las evacuaciones en estado de pánico [9]

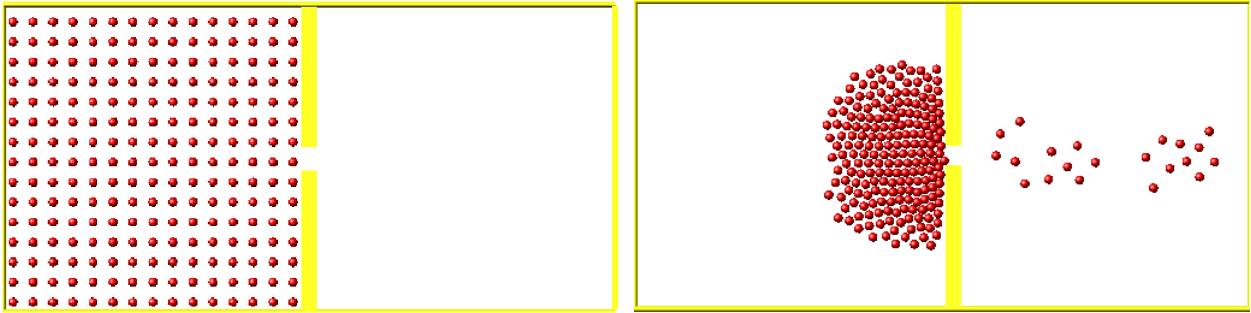


Figure 3.1: Izquierda: Estado inicial de una simulación de 225 individuos en un recinto de 20×20 m. Derecha: Estado de la simulación en la iteración 50000. Las barras amarillas representan las paredes. Los individuos evacúan de izquierda a derecha.

Con el fin de compatibilizar el modelo de fuerza social con LAMMPS, se crearon varios módulos con las fuerzas que caracterizan a este modelo. Todos estos fueron escritos en c++. En la sección 3.2 se describe cada uno de ellos. En la sección 3.3 se detallarán los distintos tipos de mediciones llevadas a cabo.

3.1 Condiciones iniciales

Para todas los sistemas estudiados se configuró un arreglo bidimensional de individuos, ordenados inicialmente tipo red cuadrada, con una densidad de $0,6$ personas/m², similar al límite de las regulaciones actuales [17] (con esta distancia la interacción de repulsión social es despreciable). Todos los individuos tenían una velocidad aleatoria con una distribución gaussiana centrada en cero. El módulo de la velocidad inicial de los peatones se fijó con el

comando `velocity` de lammps. Esta instrucción requiere la "temperatura" del sistema. La misma se vincula con la energía cinética mediante la siguiente expresión

$$v = \sqrt{\frac{2k_b}{m}T} \quad (3.1)$$

donde k_b es la constante de Boltzman y T es la temperatura configurada en la simulación. El valor usado de temperatura fue 10^{23} de modo que el módulo de la velocidad inicial sea $v = 1.19$ m/s

3.2 Módulos

Para hacer las simulaciones se construyeron varios módulos que permitieron compatibilizar Lammps con el modelo de fuerza social y el cálculo de la presión. A continuación se describirá cada uno de ellos.

`pair_social`

Este módulo se hizo para incluir la fuerza de repulsión social ($\mathbf{f}_s^{(ij)}$) del modelo de Helbing (ver sección 2.1). Toma como parámetros la constante B y la distancia de corte (si los individuos están separados por una distancia mayor a este corte, la fuerza social entre ellos no se calcula). Otros parámetros son agregados a través de la función `pair_coef`. Estos son la constante A del modelo de Helbing, la distancia de corte y el radio de los individuos. Los valores utilizados fueron: $A = 2000$, $B = 0,08$, $r_{cut} = 3,5$, $d = 0,30$. La elección de la distancia de corte se tomó de modo tal que la fuerza social que sienten individuos separados a esa distancia sea despreciable ($\sim 10^{-12}$ N). El resto de los parámetros fueron extraídos de la bibliografía del modelo de fuerza social [9].

`pair_gran_social`

Se creó para que exista rozamiento entre los individuos que están en contacto. Requiere como parámetro el valor de la constante de rozamiento, el mismo fue $\kappa = 2,4 \times 10^5$ kgm⁻¹s⁻¹. Tanto el valor de κ como la expresión de la fuerza concuerdan con los del modelo de Helbing (ver Ec. 2.4).

fix_wall_social y fix_wall_gran

Estos módulos son análogos a `pair_social` y `pair_gran_social` pero aplicados a las fuerzas de interacción entre los individuos y las paredes. El primero simula la fuerza de repulsión y posee los mismos parámetros que la repulsión entre individuos mientras que el segundo modela la fuerza de rozamiento dinámico.

fix_social_self y fix_social_self_multi

La fuerza de deseo del modelo de Helbing fue simulada con estos módulos. El primero se usó para los recintos con una única puerta mientras que el segundo para recintos con dos. `fix_social_self` requiere como parámetro la masa de los individuos y la velocidad de deseo. El target que tiene cada individuo, depende de la posición en donde se encuentre. Por cada puerta hay tres targets: superior, medio e inferior. El medio está ubicado en la mitad de la puerta, los otros 0,3 m por encima y por debajo de los bordes de la puerta. Los individuos cuya posición en la coordenada 'y' sea mayor (menor) que el target superior (inferior) actualizan su velocidad para apuntar al target superior (inferior). Si se encuentran en medio de éstos, apuntan al centro de la puerta. De este modo los peatones siempre se dirigen al target más cercano. Cabe destacar que todos los individuos ven la salida independientemente de cuan lejos estén de la misma y cuantas personas tengan delante.

Cuando se simularon recintos con dos puertas se usó `fix_social_self_multi`, sus parámetros son: la masa de los individuos, la velocidad de deseo y el gap (la distancia de separación entre puertas). Si el gap es nulo, las dos puertas están unidas (formando una única puerta ancha). En este caso, se establecen tres targets: el superior (inferior), que está 0.3 m debajo (encima) del borde de la puerta superior (inferior). Los individuos que se encuentran en el medio apuntan al centro (al igual que en el caso de una única puerta). Si el gap no es nulo, es decir, existe una porción de pared entre ambas puertas, la dirección de la velocidad de los individuos se actualiza de forma análoga al caso de una puerta. De esta forma los individuos siempre buscan la salida más cercana.

compute_helbing_pressure

Calcula la función de presión social de la expresión (2.6). Para cada timestep devuelve un

vector con la presión que soporta cada peatón como consecuencia de la interacción con sus vecinos. Solo se tienen en cuenta las presiones producidas por la repulsión de fuerza social, es decir, se ignoran las interacciones con las paredes así como el rozamiento entre individuos. Cabe destacar que esta forma de computar la presión no contempla el momento ni la fuerza de deseo.

`compute_dijkstra_atom`

Rotula con la misma etiqueta a todos los elementos que forman parte de un blocking cluster. Requiere como parámetro las posiciones en la coordenada 'y' de los puntos de origen y terminación del blocking cluster y la posición de la pared en la coordenada 'x'. Para cada timestep devuelve un vector con N componentes (siendo N la cantidad de peatones). Cada una de estas componentes está asociada a un individuo; toma un número distinto de cero cuando el individuo forma parte de un cluster de bloqueo y cero en caso contrario.

3.3 Mediciones Realizadas

En esta sección se detallarán los experimentos llevados a cabo y el análisis de los observables que permitió describir el comportamiento de las evacuaciones en estado de pánico.

Isobaras

Se hicieron simulaciones con el módulo que cuantifica la presión social sobre cada agente (`compute_helbing_pressure`) a partir de la expresión (2.6). De esta forma se obtuvieron datos de presión y posición en función del tiempo para cada individuo. Con Python se creó una grilla con celdas de 1 m^2 . Se sumó la presión asociada a cada una y se la normalizó por la cantidad de individuos que pasaron por dicha celda. Así se obtuvo la presión promedio en cada región del recinto. Luego se generó un gráfico de isobaras (contour map). Los datos de cada celda fueron promediados con los de sus celdas vecinas para obtener gráficos de presiones "suavizados".

Estos mapas de presión se hicieron para recintos de $20 \times 20\text{ m}$ con 225 individuos. La habitación contaba con una única puerta de ancho: 1,2 m, 2,4 m, 3,6 m o con dos puertas de 1.2 m separadas a distintas distancias. Para cada tipo de medición se efectuaron 30

simulaciones. Cada una de estas se terminó al evacuar 100 individuos.

Flujo de velocidad

De forma análoga se midió la velocidad de cada individuo (v_x y v_y) con el fin de realizar gráficos de líneas de corriente (stream plots). Las condiciones de medición y los recintos de simulación fueron los mismos que los del gráfico de isobaras.

Presión y velocidad en función del tiempo

Para un peatón cuya posición inicial es $(x, y)=(12.35, 8.45)$ en un recinto de 20×20 m con 225 individuos se midió la presión social y velocidad (módulo) en función del tiempo desde que comienza la simulación hasta que logra evacuar. Estas simulaciones se hicieron para recintos con una única puerta de 1,2 m y 3,6 m de ancho.

Tiempo de evacuación

Se registró el tiempo que tarda en evacuar más del 70% de los individuos en distintos recintos y bajo diferentes condiciones. Se hicieron mediciones en recintos de 20×20 m, 30×30 m y 40×40 m con 225, 583 y 961 individuos respectivamente para diferentes velocidades de deseo (de 2 m/s a 8 m/s). Algunas mediciones se hicieron para estudiar la variación del tiempo de evacuación en función del gap y otras para confirmar el efecto "Faster is slower".

Probabilidad de formar blocking clusters

Mediante el módulo que identifica los individuos que conforman un blocking cluster se calculó el cociente entre el tiempo que la salida está bloqueada y el tiempo total de la evacuación. Este cociente es la probabilidad de formar blocking clusters. Se graficó esta probabilidad para clusters grandes y pequeños en recintos de 20×20 m con 225 individuos con velocidades de deseo de 4 m/s y 6 m/s. También se hicieron mediciones en recintos de 40×40 m con 961 individuos a $v_d=4$ m/s. 30 iteraciones fueron realizadas para promediar los resultados.

Presión en función de distancia a la puerta

Se midió la presión (social) media en función de la distancia a la salida en recintos de 20×20 m con 225 individuos. El ancho de la puerta fue 1,2 m. La velocidad de deseo 4 m/s. Se promedió el resultado de 30 iteraciones las cuales terminaban cuando 100 peatones abandonaban el recinto. Se dividió al recinto con un grillado en forma de discos separados a 0.3 m

de distancia. De este modo se tomó el promedio de presión asociado a cada disco ($p(r)$).

En el apéndice B se muestra un script básico de Lammmps, el mismo cuenta con una descripción detallada de las funciones usadas. Este apéndice se creó con el fin de ejemplificar cómo es la sintaxis de los códigos utilizados a lo largo de la investigación.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

An intellect which at a certain moment would know all forces that set nature in motion, and all positions of all items of which nature is composed, if this intellect were also vast enough to submit these data to analysis, it would embrace in a single formula the movements of the greatest bodies of the universe and those of the tiniest atom; for such an intellect nothing would be uncertain and the future just like the past would be present before its eyes.

Pierre Simon Laplace, A Philosophical Essay on Probabilities

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos en el trabajo. Está dividido en dos secciones, la primera está dedicada a recintos con una única puerta y la segunda a recintos con dos puertas sobre la misma pared.

4.1 Una puerta

En esta sección se estudiará el caso de un recinto cuadrado con 225 individuos y una sola puerta. Se compararán los campos de presión y velocidad para recintos con puerta ancha (3,6 m) y angosta (1,2 m). También se hará una comparación de la presión y velocidad en función del tiempo que posee un individuo que comienza en el medio de la habitación. Se discutirá, además, cómo varía la presión según la distancia a la salida.

Puerta ancha (3,6 m)

Los resultados que se presentan en esta subsección son de simulaciones hechas para un recinto de 20×20 (m) con 225 individuos y una puerta centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m con un ancho $L = 3,6$ m.

En la figura 4.1 (izquierda) se muestra un gráfico de isobaras. La presión que aparece en estos gráficos fue calculada a partir de la expresión (2.6). Puede verse que la zona de mayor presión se da a los costados de la puerta mientras que en el medio la presión es menor (sobre todo en la zona más próxima a la puerta). La distribución de presiones es simétrica con respecto al eje $y = 10$ m.

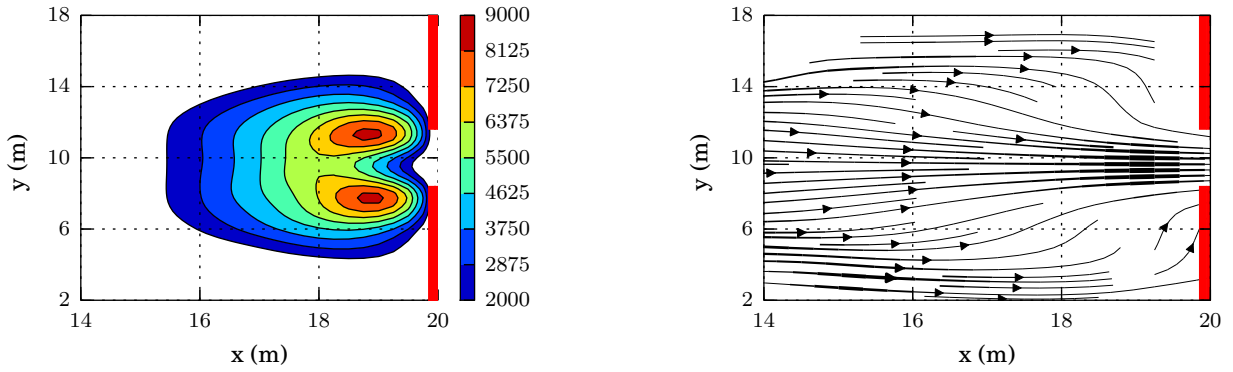


Figure 4.1: Izquierda: Isobaras cercanas a la puerta; la escala a la derecha está expresada en $[P]=N/m$. Derecha: Gráfico de flujo de velocidad. Para ambos gráficos, la salida está centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m y tiene ancho $L = 3,6$ m. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. La gráfica corresponde a valores medios a lo largo de 30 procesos de evacuación. Se usó un grillado de $1m^2$ para promediar los campos de presiones y velocidad. La velocidad deseada de los individuos fue de $v_d = 4$ m/s. Las barras rojas representan las paredes laterales.

El gráfico de la derecha muestra el promedio del flujo de velocidades. El ancho del trazo denota la magnitud del módulo de la velocidad. La mayor celeridad se obtiene en la zona del medio (en la coordenada y), dando a entender que los individuos que se encuentran en dicha región evacúan más rápido que los individuos que van por los costados. Puede verse que las zonas de alta presión coinciden con zonas de baja velocidad (costados) mientras que las zonas de alta velocidad son áreas con menor presión (centro).

La relación entre presión y velocidad se condice con los resultados obtenidos en la figura 4.2. Allí se muestran la presión y velocidad en función del tiempo para un individuo que comienza en el medio de la habitación ($x = 12,35$ m e $y = 8,45$ m). Al principio su velocidad aumenta sin que la presión se vea afectada ya que corre en la zona de baja densidad local (sin interactuar con el resto de los peatones). Luego, su velocidad disminuye conforme su presión incrementa. En este momento la salida se obstruye y la multitud se amontona. Finalmente la velocidad vuelve a aumentar y su presión disminuye, en este momento el individuo logra hacerse paso para evacuar.

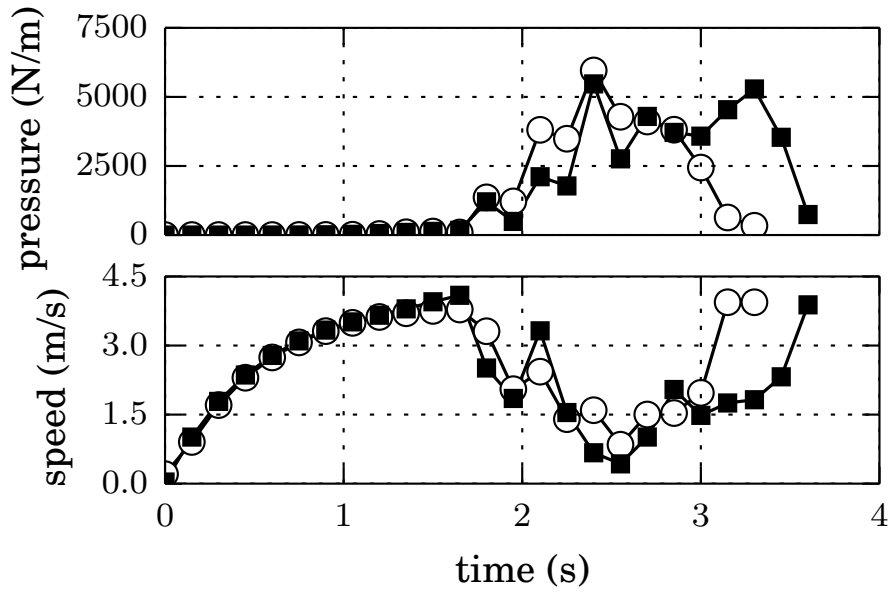


Figure 4.2: Gráfico de velocidad(inferior) y presión(superior) en función del tiempo para un individuo ubicado inicialmente en $x = 12,35$ m e $y = 8,45$ m. La salida está centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m y tiene ancho $L = 3,6$ m. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. La gráfica corresponde a dos iteraciones diferentes (variando la velocidad inicial). La velocidad deseada del individuo fue de $v_d = 4$ m/s.

En resumen, cuando la puerta es ancha, alta presión implica baja velocidad. Este fenómeno se evidencia tanto en los campos de presión y velocidad como en la evolución temporal de un individuo en particular.

Puerta angosta (1,2 m)

Los resultados que se exhiben en esta subsección corresponden a simulaciones hechas para un recinto de 20×20 (m) con 225 individuos y una puerta centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m con un ancho $L = 1,2$ m. El tamaño de la puerta angosta coincide con el ancho de hombros de dos individuos.

En el gráfico izquierdo de la figura 4.3 se muestra la distribución de presión para este tipo de recintos. La presión máxima se da en el centro, a diferencia de lo que ocurre en recintos con puerta ancha, donde la máxima presión está a los costados.

En el gráfico derecho de la figura 4.3 se exhibe el flujo de velocidad. Al igual que en la imagen derecha de 4.1, la máxima celeridad se da en el medio (coordenada y). Cabe destacar que la zona de mayor velocidad no coincide con una región de baja presión. De hecho se tiene máxima presión y velocidad en la misma área.

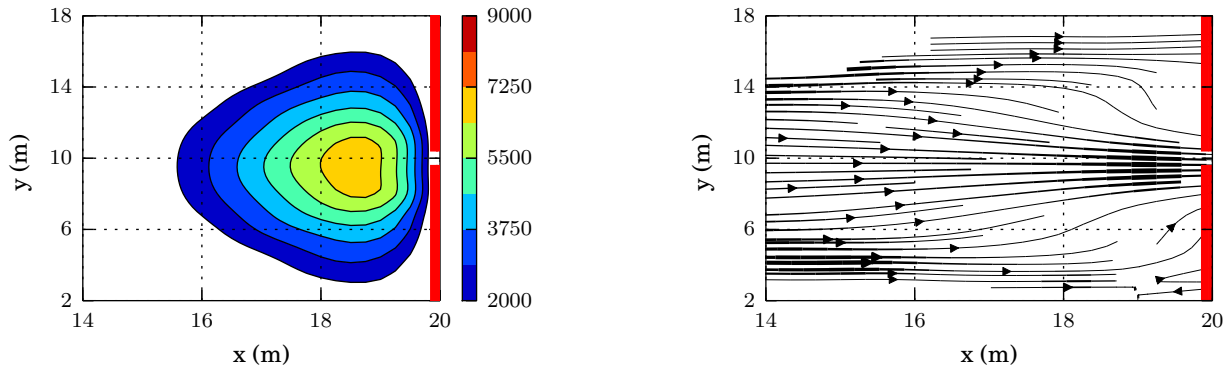


Figure 4.3: Izquierda: Isobaras cercanas a la puerta; la escala a la derecha está expresada en $[P]=N/m$. Derecha: Gráfico de flujo de velocidad. Para ambos gráficos, la salida está centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m y tiene ancho $L = 1,2$ m. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. La gráfica corresponde a valores medios a lo largo de 30 procesos de evacuación. Se usó un grillado de $1m^2$ para promediar los campos de presiones y velocidad. La velocidad deseada de los individuos fue de $v_d = 4$ m/s. Las barras rojas representan las paredes laterales.

En la figura 4.4 se presenta un gráfico de presión y velocidad en función del tiempo para un individuo cuya posición inicial es: $x = 12,35$ m e $y = 8,45$ m. Luego de los primeros

segundos (estado estacionario), los momentos en los que soporta alta presión son momentos de baja velocidad y viceversa. Esto coincide con lo obtenido para un peatón con la misma posición inicial en una habitación con puerta ancha (fig. 4.2). A pesar de esta similitud, notar que el individuo tarda mucho más tiempo en evacuar el recinto cuando la puerta es angosta.

Puede decirse que para recintos de puerta angosta, en cada instante de tiempo, se mantiene la correlación presión-velocidad (fig 4.4), sin embargo, al promediar, la correlación deja de manifestarse (fig 4.3). Este fenómeno será explicado en los párrafos siguientes.

El tamaño de la puerta influye en la relación presión-velocidad. Cuando la puerta es ancha se obtuvo que zonas de alta presión concuerdan con zonas de baja velocidad. El mismo comportamiento ocurre en cada instante para cada individuo.

En cambio, cuando la puerta es angosta la zona de mayor presión concuerda con zona de mayor velocidad (en promedio) pero en cada instante de tiempo y para cada individuo se tiene que al soportar altas presiones sus velocidades son bajas.

Esta diferencia se debe al hecho que cuando la puerta es ancha el flujo de la evacuación es permanente. Se forma un canal en el medio por donde los individuos transitan de forma continua casi sin detenerse. Esto tiene como consecuencia que la mayor velocidad se da en el medio y estimula la acumulación de peatones en los costados (formando focos de alta presión en dicha zona). No hay diferencias en cuanto al comportamiento presión-velocidad que sienten los individuos en cada instante de tiempo.

En cambio, cuando se tienen recintos con puerta angosta, el flujo de evacuados es intermitente. Por momentos los peatones logran salir y por momentos se encuentran detenidos. Este efecto de Stop-and-go [10] es determinante a la hora de promediar presión y velocidad ya que los momentos en los cuales la evacuación fluye aportan mucha velocidad en el medio (fig. 4.3 derecha) y los momentos en los que las personas están quietas suman mucha presión en el centro por ser la región de mayor amontonamiento (fig. 4.3 izquierda). Es por eso que para cada instante de tiempo se preserva la relación inversa entre presión y velocidad pero en promedio esta relación deja de valer.

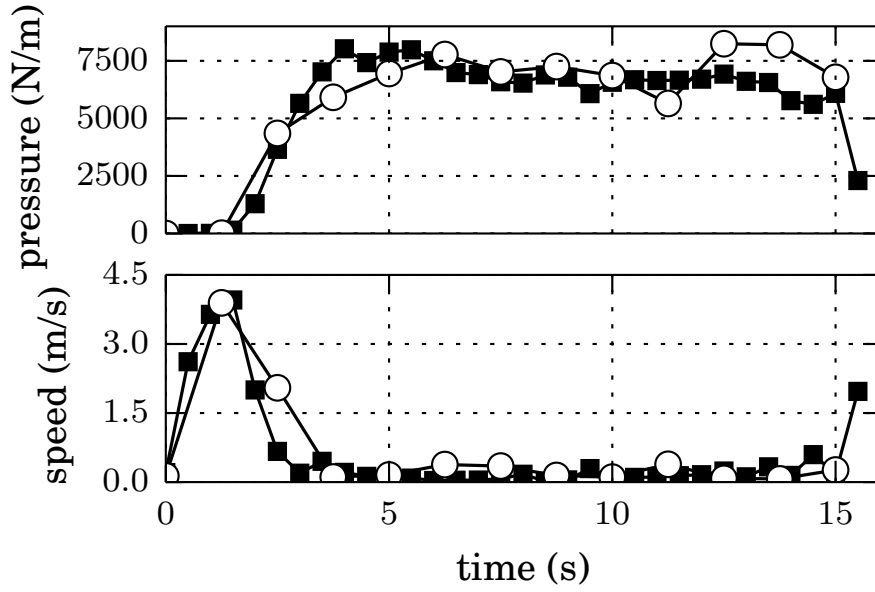


Figure 4.4: Gráfico de velocidad(inferior) y presión(superior) en función del tiempo para un individuo ubicado inicialmente en $x = 12,35$ m e $y = 8,45$ m. La salida está centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m y tiene ancho $L = 1,2$ m. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. La gráfica corresponde a cinco iteraciones diferentes (variando la velocidad inicial). La velocidad deseada del individuo fue de $v_d = 4$ m/s.

En los sistemas de puerta angosta la máxima presión se da en la zona cercana a la puerta (a 1,5 m). La figura 4.5 muestra la presión en función de la distancia radial a la puerta ($p(r)$). Se observa que la presión promedio aumenta hasta alcanzar el máximo a 1,2 m de la salida y luego disminuye (ya que los individuos más alejados están menos presionados). Los individuos más cercanos a la puerta no son los que soportan las mayores presiones ya que no se está cuantificando la presión que aportan las paredes (solo se tiene en cuenta la repulsión social).

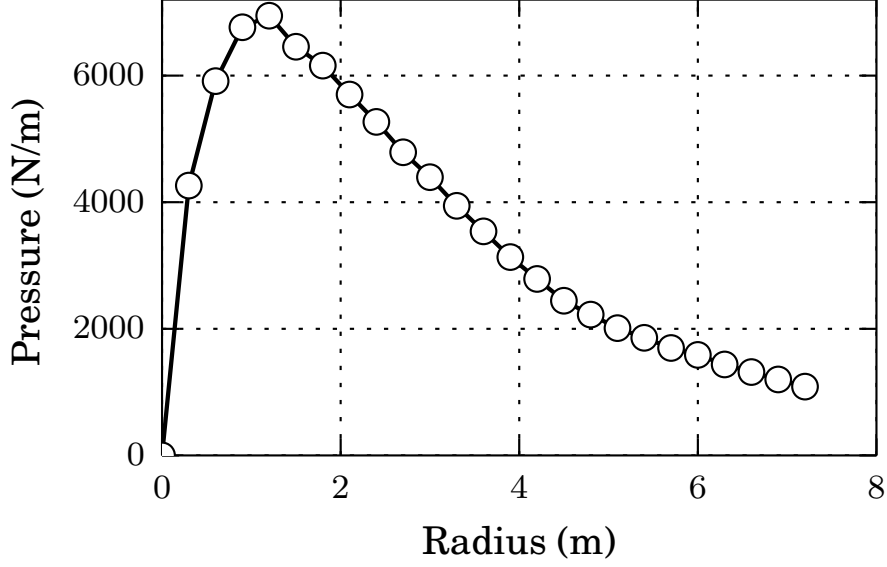


Figure 4.5: Presión media en función de la distancia a la salida. El tamaño del recinto fue $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ con una puerta de $L = 1.2\text{ m}$ width. Los valores medios fueron calculados a partir de 30 procesos hasta que 100 peatones abandonaron la habitación. La velocidad de deseo fue $v_d = 4\text{ m/s}$. La distancia a la puerta fue dividida en bins de tamaño 0.3 m .

Se hicieron simulaciones para determinar la presión que soportan los individuos que forman parte del blocking cluster (aquellos individuos que bloquean la puerta). Los resultados muestran que la presión es mayor si el recinto tiene más individuos o si la velocidad de deseo es más alta. En la tabla 4.1 se muestra el promedio de presión del blocking cluster para diferentes velocidades de deseo ($v_d = 4\text{ m/s}$ y $v_d = 8\text{ m/s}$) y diferente cantidad de individuos ($N = 225$ y $N = 961$), todas las simulaciones se terminaron al evacuar 100 peatones. Este resultado sugiere que la dinámica de evacuaciones con pocos individuos y alta v_d sería similar a la de muchos individuos con baja velocidad de deseo.

| | N=225 | N=961 |
|----------------------|------------------|-------------------|
| $v_d = 4\text{ m/s}$ | 8580 ± 2630 | 19640 ± 7330 |
| $v_d = 8\text{ m/s}$ | 14700 ± 5240 | 33130 ± 11920 |

Table 4.1: Promedio de presión social que soportan los individuos del blocking cluster para un recinto de 20×20 y 40×40 con 225 y 961 individuos respectivamente. Para cada uno de ellos se usó $v_d = 4\text{ m/s}$ y $v_d = 8\text{ m/s}$. Todas las simulaciones se terminaron al evacuar 100 individuos.

En esta sección se compararon la presión y velocidad tanto a nivel "macroscópico" (prome-

dio) como a nivel "microscópico" (variación temporal para un individuo en particular) en recintos con puerta angosta (1,2 m) y recintos con puerta ancha (3,6 m). Se obtuvo que con puertas angostas surge el efecto Stop-and-go que provoca altas presiones en el centro mientras que con puertas anchas este efecto no aparece ya que la evacuación fluye de forma permanentemente (casi sin detenerse). Es por eso que la mayor presión se da en las zonas laterales. La máxima velocidad se tiene en el medio para ambos recintos. Por lo tanto, la relación inversa de presión-velocidad se verifica en habitaciones con puertas anchas (a nivel macroscópico y microscópico) mientras que en recintos con puertas angostas solo se da a nivel microscópico.

También se verificó que la presión decae con la distancia y la magnitud de la presión soportada por los integrantes del blocking cluster aumenta con el número de individuos y el nivel de ansiedad.

Además pudo comprobarse que las puertas anchas mejoran la evacuación (produciendo tiempos de evacuación inferiores). Este resultado es consistente con lo discutido en la Ref. [11].

4.2 Dos puertas

En esta sección se muestran los resultados para recintos con dos puertas ubicadas sobre la misma pared. Se estudió cómo varían el tiempo de evacuación, la probabilidad de formar clusters de bloqueo y la distribución de presión en función de la distancia de separación entre puertas (g).

4.2.1 Faster is slower

”Faster is slower” es un efecto típico de evacuaciones en estado de ansiedad. Cuanto mayor es la velocidad de deseo, mayor es el tiempo que tardan en evacuar los individuos. La figura 4.6 muestra el tiempo de evacuación cuando dos puertas están separadas por una distancia de $g = 1$ m y cuando no hay separación ($g = 0$ m). Esta última significa una única salida. Ambos casos (con y sin separación) exhiben un cambio en su pendiente. Es decir, el efecto “faster is slower” se obtiene aun para salidas distanciadas, teniendo un comportamiento cualitativo similar al que aparece en la bibliografía para cuartos con una única salida [9, 19].

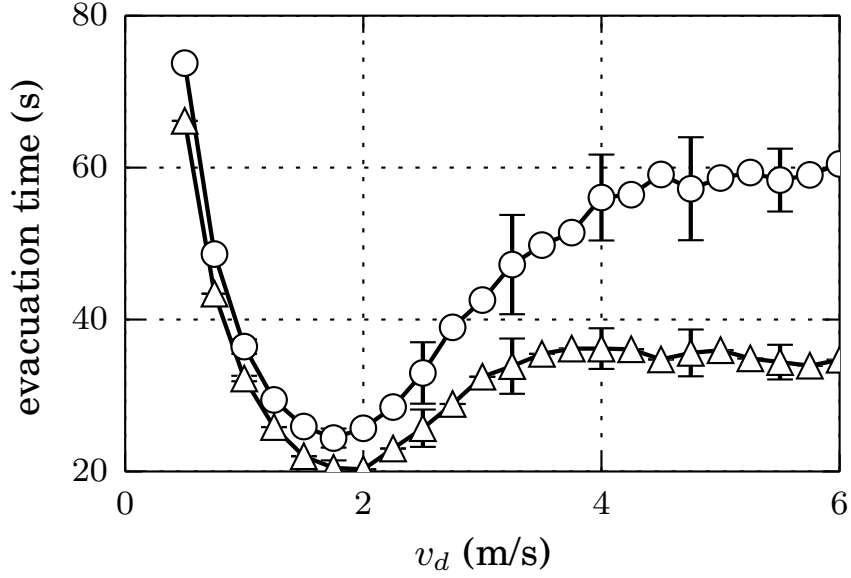


Figure 4.6: Tiempo de evacuación para 160 individuo vs. la velocidad de deseo de los peatones (m/s). Los valores medios fueron computados para 30 procesos de evacuación. El ancho de cada puerta era $L = 1,2$ m. Se muestran dos situaciones: \triangle corresponde a separación nula entre puertas, es decir, una única puerta de ancho $2L$. \circ corresponde a una separación entre puertas de 1 m.

El tiempo de evacuación para puertas separadas siempre está por encima del tiempo que demora evacuar con una única puerta (*i.e.* gap nulo). Para $v_d = 6$ m/s, una única salida reduce el tiempo de evacuación a la mitad con respecto al tiempo que demanda la configuración con $g = 1$ m. Otras distancias de separación (no exhibidas) muestran el mismo comportamiento que el de la figura 4.6.

Puede decirse que aún dejando fijo el tamaño total de la abertura, separar este ancho en dos salidas simétricas puede afectar significativamente el rendimiento de la evacuación. Esto se debe a que con dos puertas angostas se produce el efecto Stop-and-go en cada una de ellas (generando una evacuación más lenta que con una única puerta ancha donde el flujo de evacuación es casi continuo).

4.2.2 Tiempo de evacuación

En esta subsección se presentan los resultados de las mediciones de tiempo de evacuación en función de gap. El tiempo de evacuación se define como el lapso que tarda una determinada cantidad de individuos ($> 70\%$ de la cantidad inicial) en evacuar el recinto.

En la figura 4.7 se muestra la relación entre el tiempo de evacuación y el gap para un recinto con 225 individuos con una velocidad de deseo de 4 m/s. Puede verse que el tiempo de evacuación aumenta mucho hasta alcanzar el máximo en $g = 1,5$ m. Para $g > 1,5$ m, la pendiente de la curva se hace menor; el tiempo de evacuación disminuye a medida que aumenta el valor de g . Es decir, existe un gap crítico (g_c) para el cual cambia la pendiente de la curva.

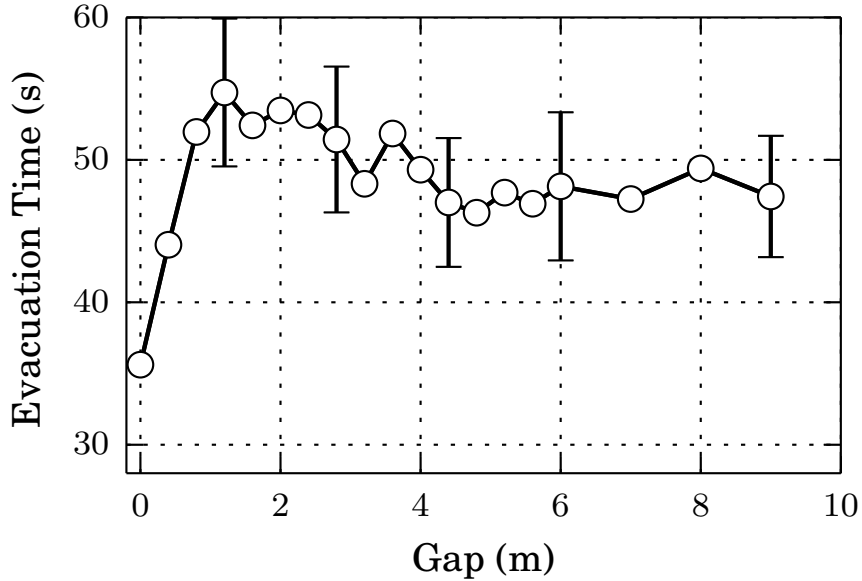


Figure 4.7: Gráfico de tiempo de evacuación en función del gap. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos y dos puertas, cada una tiene un ancho de $L = 1,2$ m. La gráfica corresponde al promedio de treinta iteraciones. La velocidad de deseo del individuo fue de $v_d = 4$ m/s. Cada simulación termina cuando evacúan 160 individuos.

En el gráfico izquierdo de la figura 4.8 se muestra el tiempo de evacuación por individuo (te/N) en función de la distancia de separación de las puertas (gap). Se presentan tres curvas, cada una de ellas para recintos con diferente número de individuos: 961 (cuadrados),

584 (triángulos) y 225 (círculos). En todos los casos la pendiente de la curva cambia aproximadamente en $g = 1,5$ m, por lo que el g_c no depende del número de individuos. El tiempo de evacuación por individuo depende de N . A mayor cantidad de individuos mayor es te/N para todo gap. Si bien en los tres casos la pendiente cambia luego del gap crítico, puede verse que para sistemas con 225 individuos la pendiente se hace ligeramente negativa mientras que para el resto la pendiente es prácticamente nula. El gráfico muestra hasta $g=6$ m porque las tres curvas alcanzaron el estado asintótico.

Algunos autores sostienen que el estado asintótico se alcanza cuando los bulks asociados a cada puerta están separados [20]. En la figura puede verse que para $g>5$ m el tiempo de evacuación por peatón se vuelve independiente del gap (asintótico) a pesar de que las áreas de bloqueo estén superpuestas. En las simulaciones de 961 individuos se requiere $g = 16$ m para que los bulks estén disjuntos.

El gráfico de la derecha muestra el tiempo de evacuación en función del gap para recintos con 225 individuos. La curva con cuadrados corresponde a sistemas de individuos con velocidad de deseo $v_d = 8$ m/s, la curva de círculos es para sistemas de individuos con $v_d = 4$ m/s. Ambas tienen igual valor de g_c , pero la curva correspondiente a 8 m/s no pasa a tener pendiente negativa luego del g_c . Por lo tanto, el comportamiento para sistemas con individuos más apurados ($v_d = 8$ m/s) es semejante al de sistemas con muchos individuos ($N=961$).

Cabe destacar que el tamaño de g_c corresponde al ancho de dos individuos. Esto hace suponer que cuando el espacio entre puertas es suficientemente grande para que entren dos personas, la dinámica entra en un régimen diferente (para el cual cambia la pendiente).

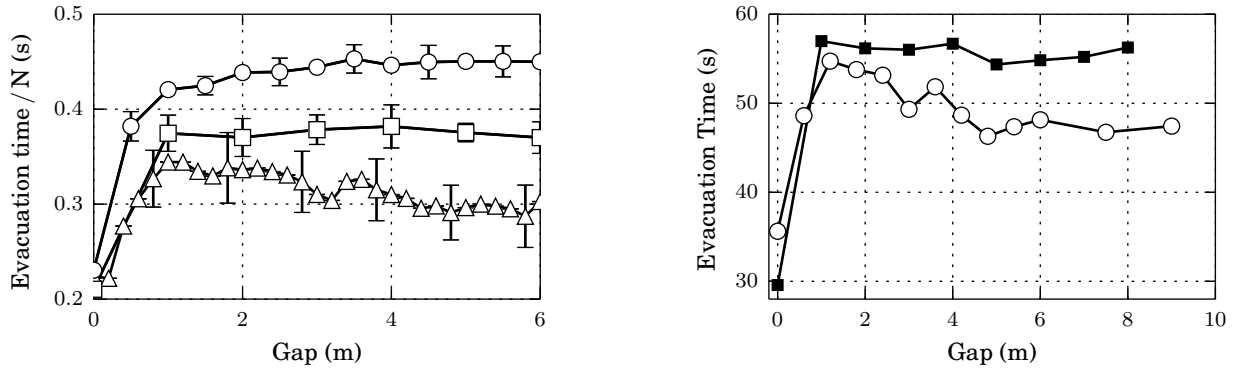


Figure 4.8: Gráfico de tiempo de evacuación en función del gap para recintos de 20×20 (m) (círculos), 30×30 (m) (triángulos) y 40×40 (m) (cuadrados) con 225, 580 y 961 individuos respectivamente. Todos los recintos tienen dos puertas, cada una de ancho $L = 1, 2$ m. Las gráficas corresponden al promedio de treinta iteraciones. Para todos los casos, la velocidad deseada del individuo fue de $v_d = 4$ m/s. Cada simulación termina cuando evacúan 160, 529 y 961 individuos respectivamente. Derecha: Gráfico de tiempo de evacuación en función del gap. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos y dos puertas, cada una tiene un ancho de $L = 1, 2$ m. La gráfica corresponde al promedio de treinta iteraciones. Las velocidades de deseo de los individuos es de $v_d = 4$ m/s (círculos) y $v_d = 8$ m/s (cuadrados). Cada simulación termina cuando evacúan 160 individuos.

4.2.3 Blocking clusters

En esta subsección se compararán las diferencias en la probabilidad de formar clusters de bloqueo grandes (que abarcan ambas puertas) y chicos (abarcan solo una puerta). También se muestra cómo esta probabilidad depende de la cantidad de individuos y la velocidad de deseo. Recordemos que la probabilidad de formar blocking clusters se define como la razón entre el tiempo que hay blocking clusters constituidos y el tiempo total de simulación.

Un sistema de 225 individuos con $v_d = 4$ m/s manifiesta, en la figura 4.9, que la probabilidad de formar big blocking clusters (círculos) decae con la separación de las puertas. Es decir, cuanto más lejos están las puertas es más difícil tener un conjunto de individuos que vaya de una pared a otra. Por otro lado, la probabilidad de formar clusters de bloqueo pequeños (bloqueos de una única puerta) tiene una forma funcional que alcanza el máximo en el g_c y luego desciende. Este descenso se debe a que al estar separadas las puertas disminuye la presión que hay en cada bulk, esto hace que los individuos tengan menos probabilidad

de formar blocking clusters. El comportamiento de esta función es similar al de tiempo de evacuación en función del gap.

El tamaño del gap critico equivale al ancho de dos individuos. Este tamaño favorece la formación de dos blocking clusters (uno para cada puerta). Esto genera un aumento de los bloqueos que se manifiesta en un incremento del tiempo de evacuación.

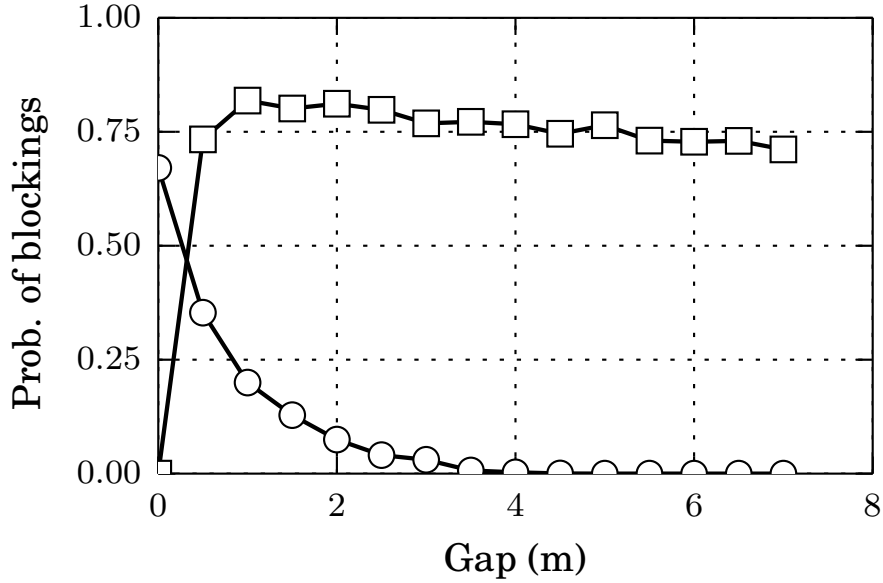


Figure 4.9: Probabilidad de formar big (círculos) y small (cuadrados) blocking clusters (bloqueos de dos y una puerta respectivamente), ambos en función del gap. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos y dos puertas, cada una tiene un ancho de $L = 1, 2$ m. Las gráficas corresponden al promedio de treinta iteraciones diferentes. La velocidad de deseo es de $v_d = 4$ m/s. Cada simulación termina cuando evacúan 160 individuos.

La probabilidad de formar clusters de bloqueo esta vinculada al número de individuos y la velocidad de deseo. Esto puede verse en la figura 4.10 donde la curva con triángulos representa la probabilidad de formar blocking clusters para un recinto con 961 individuos, la curva que esta debajo (cuadrados) es para un sistema con 225 individuos con velocidad de deseo $v_d = 6$ m/s y la curva con círculos corresponde a $v_d = 4$ m/s y 225 peatones. Incrementar N o V_d produce un aumento de la probabilidad de formar clusters de bloqueo. Es decir, si los individuos están apurados o si el tamaño de la multitud es grande, aumentan los lapsos de tiempo en los cuales las puertas están bloqueadas.

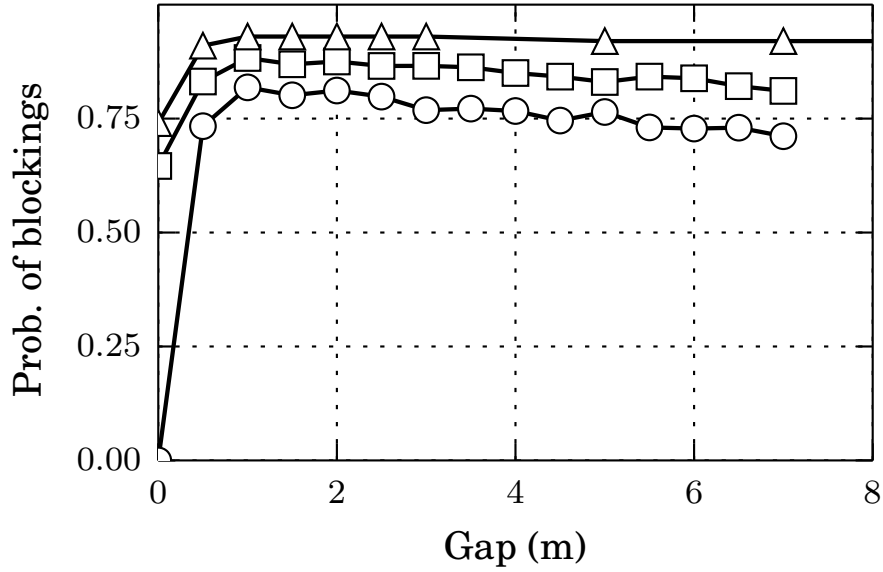


Figure 4.10: Probabilidad de formar small blocking clusters (bloqueos de una sola puerta) en función del gap, para un recinto 20×20 (m) con 225 individuos a $v_d = 4$ m/s (círculos) y $v_d = 6$ m/s (cuadrados). Lo mismo para un recinto de 40×40 (m) con 961 individuos a $v_d = 4$ m/s (triángulos). Ambos recintos poseen dos puertas, cada una tiene un ancho de $L = 1, 2$ m. Las gráficas corresponden al promedio de treinta iteraciones diferentes. Las simulación terminan cuando evacúan 160 individuos y 864 respectivamente.

4.2.4 Presión

En esta subsección se describirán los diagramas de isobaras para recintos con dos puertas separadas por un gap. Cuando la separación es nula (gap cero) se recupera una distribución de presión similar a las distribuciones de la sección anterior. La presión máxima se da en los costados ya que en el medio se forma un canal por donde la gente puede transitar (figura 4.11). Se tiene simetría de reflexión con respecto al eje $y = 10$ m.

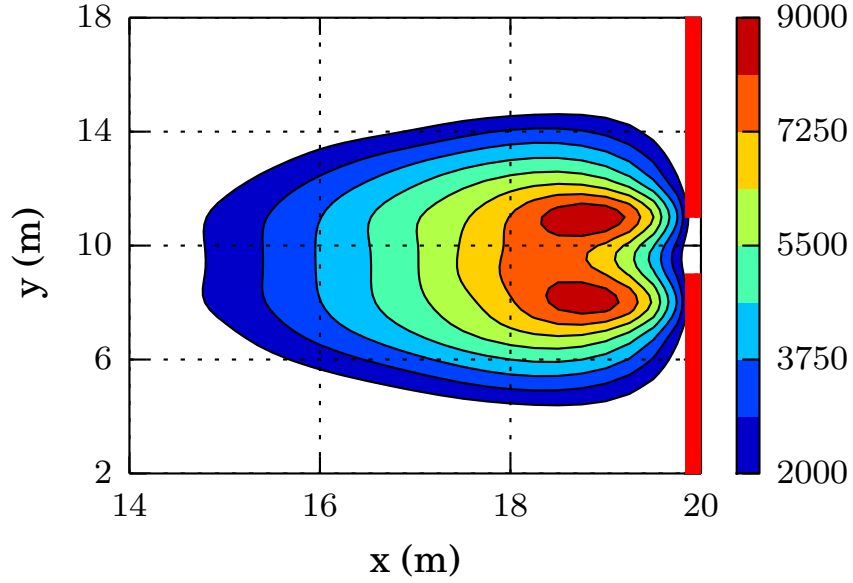


Figure 4.11: Isobaras cercanas a la puerta; la escala a la derecha está expresada en $[P]=N/m$. La salida está centrada en la posición $x = 20$ m e $y = 10$ m, son dos puertas de ancho $L = 1,2$ m con $g = 0$ m. El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. La gráfica corresponde a valores medios a lo largo de 30 procesos de evacuación. Se usó un grillado de $1m^2$ para promediar el campo de presiones (P). La velocidad deseada de los individuos fue de $v_d = 4$ m/s. Las barras rojas representan las paredes laterales.

Cuando la separación entre puertas equivale al gap crítico $g = 1,5$ m, la zona de más alta presión se extiende en superficie. Si $g = 5$ m los focos de máxima presión se separan ya que a esta distancia los bulks están suficientemente lejos como para que las interacciones entre éstos sean chicas. Estos fenómenos se muestran en las figuras de 4.12. Puede verse que cuando el gap es grande no existen zonas de presión alta (>7000 N/m). Separar las puertas una distancia considerable produce una disminución general de la presión.

Recordemos que en este trabajo la definición de presión usada es la que se desarrolla en [9] se expresa en la fórmula (2.6).

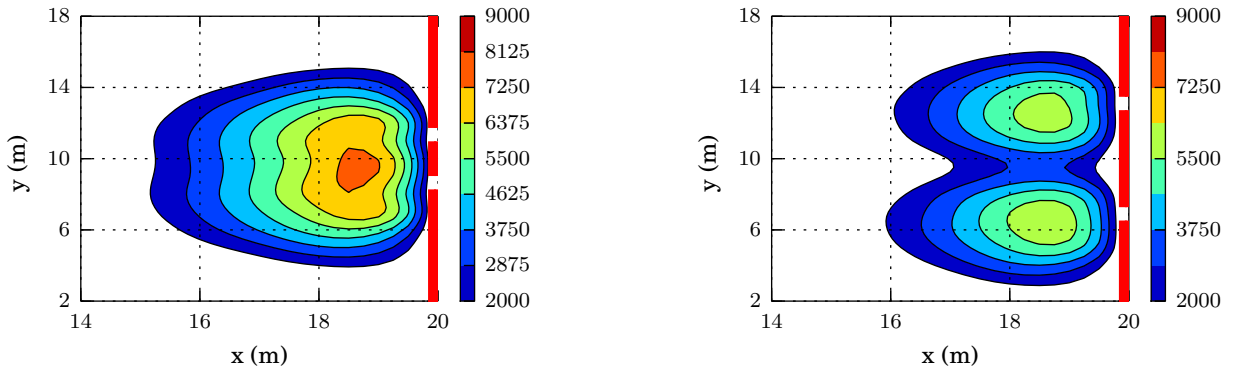


Figure 4.12: Isobaras cercanas a la puerta; la escala a la derecha está expresada en $[P]=N/m$. La salida consta de dos puertas de ancho $L = 1,2$ m separadas entre sí por una distancia de $g = 1,5$ m y $g = 5$ m (figuras de izquierda y derecha respectivamente), puertas centradas en $x = 20$ m e $y = 11,35$ m y $x = 20$ m e $y = 8,65$ m (izquierda) y $x = 20$ m e $y = 12,5$ m y $x = 20$ m e $y = 7,5$ m (derecha) . El recinto es de 20×20 (m) con 225 individuos. Las gráficas corresponde a valores medios a lo largo de 30 procesos de evacuación. Se usó un grillado de $1m^2$ para promediar el campo de presiones (P). La velocidad deseada de los individuos fue de $v_d = 4$ m/s. Las barras rojas representan las paredes laterales.

En esta sección se discutieron los resultados para recintos con dos puertas separadas por un gap. Se obtuvo que el efecto "faster is slower" vale para distintos grados de separación. Las curvas de tiempo de evacuación presentan un cambio en la pendiente luego del gap crítico ($g_c=1,5$ m). El comportamiento cualitativo de la probabilidad de formar blocking clusters es similar al del tiempo de evacuación. Por lo tanto el bloqueo de cada una de las puertas es un factor determinante en la evacuación. En cuanto a la presión, si las puertas están suficientemente alejadas se produce una disminución general de la misma ya que los bulks formados cuentan con menos individuos.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se implementaron códigos que permitieron realizar simulaciones de multitudes evacuando en estado de pánico según el modelo de fuerza social.

Para recintos con una única salida se obtuvieron dinámicas diferentes según el tamaño de la puerta. Si esta es ancha el flujo de evacuación es permanente (*i.e.* prácticamente no hay momentos en los que todos los peatones se encuentren sin poder moverse). Las zonas de mayor presión se dan a los costados de la puerta. Cuando la salida es angosta la evacuación es intermitente (*i.e.* por momentos algunos peatones logran salir y en otras ocasiones todos están quietos), este efecto de Stop-and-go hace que la zona de máxima presión se de en el medio del bulk (dos metros antes de la puerta). Para ambos recintos la mayor velocidad de los individuos se tiene en el medio.

En cuanto a los recintos con dos puertas en un mismo flanco, se obtuvo una separación crítica para la cual cambia la pendiente de la curva tiempo de evacuación vs gap. Este valor es $g_c = 1,5$ m y coincide aproximadamente con el ancho de dos peatones. Esta cantidad es independiente del número de individuos y el grado de apuro que tengan por salir. Esto permitió afirmar que el g_c afecta a los bloqueos que ocurren en las cercanías de la salida.

La forma funcional de la probabilidad de formar small blocking clusters es similar a la forma

funcional del tiempo de evacuación, esto denota que los bloqueos de cada una de las puertas son determinantes en la eficiencia de la evacuación.

Aumentar el grado de apuro de los individuos mediante la velocidad de deseo genera evacuaciones más lentas así como aumentar la cantidad de individuos en el recinto. Esto condice con los resultados obtenidos de la presión que soportan los individuos del blocking cluster. En todos los casos aumentar V_d o N genera un incremento de la presión y tiene como consecuencia evacuaciones menos eficientes.

El mejor rendimiento en las evacuaciones se dio cuando las puertas no tienen separación entre si ($g = 0$ m). Separar la salida en dos puertas empeora el rendimiento a pesar de que la apertura total tenga el mismo tamaño.

Apéndices

Apéndice A

Presión

Este apéndice está destinado a mostrar una definición alternativa de la "presión local". Se mostrará un ejemplo teórico (partículas en hilera) para aclarar algunos conceptos y por último se presentarán muestras de performance con el fin de evidenciar la similitud con la definición de presión de Helbing y el rendimiento que tiene el cálculo de la presión según esta definición alternativa.

A.1 Presión local

A pesar de que la fuerza de deseo es una fuerza unilateral (*i.e.* partícula auto-impulsada), la ecuación de movimiento continúa siendo válida, y por lo tanto, podemos derivar la relación del virial[15], para un conjunto de N peatones dentro del área \mathcal{A} .

$$\left\langle \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{m_i} + \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_i \right\rangle = -2\mathcal{P}\mathcal{A} \quad (\text{A.1})$$

p_i y \mathbf{f}_i son el momento y la fuerza total actuando sobre el individuo i . La fuerza \mathbf{f}_i no contempla la interacción con las paredes. $\langle \cdot \rangle$ corresponde al valor medio en el tiempo. El lado derecho de la ecuación $-2\mathcal{P}\mathcal{A}$ es la presión global en el perímetro del recinto \mathcal{A} . Este término es negativo porque el producto de $\mathbf{r}_{iW} \cdot \mathbf{f}_s^{(iW)}$ es positivo y pasa al lado derecho con

signo negativo (siendo $2\mathcal{PA} > 0$). En la bibliografía, el término $2\mathcal{PA}$ aparece con signo positivo ya que se considera la presión que se ejerce sobre la pared y no la presión que se ejerce sobre las partículas como en este caso.

La presión local para un peatón (i) está asociada a las fuerzas (por unidad de área) actuando sobre él debidas a los individuos que lo rodean. Según Ref. [15] se puede definir una "función de presión social" P_i como:

$$2P_i A_i = \frac{p_i^2}{m_i} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N-1} \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{f}_s^{(ij)} \quad (\text{A.2})$$

donde A_i es el área que encierra al peatón i y $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$ (la distancia entre dos peatones en la dirección desde j hacia i). Cabe destacar que el producto interno $\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{f}_s^{(ij)}$ siempre es positivo debido a la repulsión y es igual al producto escalar (positivo) $d_{ij} f_s^{(ij)}$. El factor $1/2$ evita el doble conteo de las interacciones cuando se hace la suma de todos los $2P_i A_i$. Esta función de presión local contempla un término cinético que la definición de presión Helbing ignora.

El segundo término en la ecuación (A.1) puede dividirse en la suma de productos internos $\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_d$ (deseo), $\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_s$ (social) y $\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_g$ (granular). De hecho, la suma del producto social depende de la distancia entre partículas $d_{ij} f_s^{(ij)}$, mientras que la parte granular no tiene ningún rol por su ortogonalidad ($\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{f}_g^{(ij)} = 0$). Por lo tanto, la relación del virial (A.1) se expresa

$$\sum_{i=1}^N \langle 2P_i A_i \rangle = -2\mathcal{PA} - \sum_{i=1}^N \langle \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_d^{(i)} \rangle \quad (\text{A.3})$$

Hay que destacar que la ecuación (A.3) se cumple si los peatones están en contacto o no. Esto significa que no se trata de una presión de contacto (habitual en los sistemas físicos tradicionales) sino de una presión que provoca un cambio en el patrón de movimiento del individuo.

La suma de fuerzas por unidad de circunferencia (*i.e.* medida de presión según la Ref. [9]) es similar a la definición dada en (A.2) y que, a su vez, se sigue de la Ref.[15]. Comprobamos durante la investigación que ambas son proporcionales. En la sección A.3 se verifica la relación (A.3) a través de ejemplos particulares simulados.

A.2 Individuos en hilera

La figura A.1 representa una hilera de individuos empujando a la derecha. La pared impide el movimiento de los peatones. Todos los individuos de la hilera están en su posición de equilibrio $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$, mientras que la pared está en la posición $x_0 = 0$.

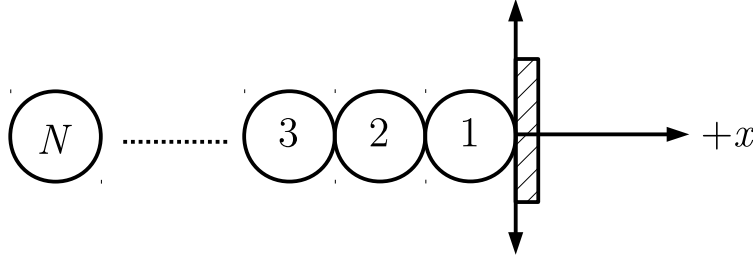


Figure A.1: Hilera de individuos empujando a la derecha. El eje horizontal indica la posición positiva.

Los peatones empujan a la derecha gracias a la fuerza de deseo $f_d^{(i)} = mv_d/\tau$, según la Ec. (2.2). La repulsión social balancea la fuerza de deseo, pero solo se tiene en cuenta la interacción de los individuos en contacto (se desprecia la interacción de segundos vecinos). La Ec A.4 muestra la ecuación de balance de cada individuo en la hilera.

$$f_s^{(i,i+1)} - f_s^{(i,i-1)} + \frac{mv_d}{\tau} = 0 \quad (\text{A.4})$$

con $f_s^{(i,j)}$ la fuerza repulsiva que siente el individuo i debido a la presencia del peatón j . Cabe destacar que la condición de contorno en la posición $x_0 = 0$ es condición de Dirichlet, mientras que la condición en el otro extremos es condición de Neumann $f_s^{(N,N+1)} = 0$. Las fuerzas en los peatones se obtienen de forma recursiva a partir de la expresión A.4, empezando

desde el extremo libre ($i = N$). El resultado es

$$f_s^{(i,i-1)} = (N - i + 1) \frac{mv_d}{\tau} \quad , \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{A.5})$$

con las correspondientes posiciones $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ obtenidas a partir de la sustitución de la fuerza social expresada en Ec. 2.3, comenzando en la posición de la pared.

$$x_i = x_{i-1} - (r_i + r_{i-1}) + B \ln \left[(N - i + 1) \frac{mv_d}{A\tau} \right] \quad (\text{A.6})$$

La intuición sugiere que la presión que siente un peatón P_i corresponde a las fuerzas actuando en él (por unidad de área) debido a los primeros vecinos. De la definición de "función de presión social" (A.2) se puede derivar

$$P_i = \frac{1}{2} \left[\frac{x_i - x_{i+1}}{2A_i} f_s^{(i,i+1)} + \frac{x_{i-1} - x_i}{2A_i} f_s^{(i,i-1)} \right] \quad (\text{A.7})$$

donde la magnitud $x_{ij}/2A_i$ corresponde a la inversa de la superficie efectiva del peatón. Para individuos modelados como esferas rígidas, la distancia entre peatones es $x_{ij} = 2r_i$ y el área $A_i = \pi r_i^2$. Por lo tanto,

$$P_i = \frac{1}{4\pi r_i} \left[f_s^{(i,i+1)} + f_s^{(i,i-1)} \right] \quad (\text{A.8})$$

como es de esperar para la presión del individuo. Notar que esta expresión, al igual que la definición de presión de Helbing tiene unidades de fuerza por unidad de longitud.

A.3 Muestras de performance

En esta sección se describirá el módulo creado para cuantificar la "presión social" según esta definición alternativa. Luego se compararán las dos definiciones de presión a través de un ejemplo particular. Por último se mostrarán dos ejemplos para comprobar que la definición

alternativa satisface la ecuación del virial.

compute_social_pressure

Calcula la función de presión social de la expresión (A.2) despreciando el término cinético y el factor $1/2$. Para cada timestep devuelve un vector con la presión que soporta cada peatón como consecuencia de la interacción con sus vecinos. Solo se tienen en cuenta las presiones producidas por la repulsión de fuerza social, es decir, se ignoran las interacciones con las paredes así como el rozamiento entre individuos. Se desprecia el término cinético porque solo cuando los individuos están amontonados (situación cuasi estática) el valor de presión es apreciable. En esta situación el término asociado a la repulsión social es al menos un orden de magnitud mayor que el término asociado a la energía cinética.

Con este módulo de presión se hicieron cálculos para comparar la "definición alternativa" con la definición de presión de Helbing. En la figura A.2 se muestra la presión en función de la distancia a la puerta para un recinto con 225 individuos a $v_d = 4$ m/s. Los triángulos representan la presión según la Ec. (2.6), mientras que los círculos la presión según Ec. (A.2). Puede verse que ambas definiciones generan resultados similares.

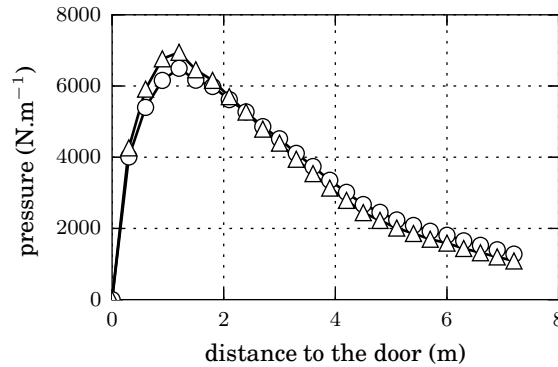


Figure A.2: Presión media en función de la distancia a la salida. El recinto era de $20\text{ m} \times 20\text{ m}$, con una puerta de 1.2 m de ancho. Se realizaron promedios sobre 30 procesos de evacuación, hasta que evacuaron 100 individuos. La velocidad de deseo era $v_d = 4\text{ m/s}$. La distancia a la puerta fue segmentada en intervalos de 0.3 m . El \bigcirc corresponde al valor medio de la presión según Ec. A.2, despreciando la parte cinética ($p_i = 0$) y $\mathcal{A}_i = \pi r_i^2$. El símbolo \triangle corresponde a la presión computada según 2.6.

A continuación se mostrarán los ejemplos que demuestran cómo el módulo `compute_social_pressure`

genera resultados que convalidan con las ecuaciones teóricas.

A.3.1 Partículas centradas

Se simuló un conjunto de 19 partículas cuyo target es el origen de coordenadas. Con una velocidad de deseo $v_d = 4$ m/s en módulo. En el estado estacionario la disposición de las partículas es tal como se muestra en la figura A.3 . Las partículas se encuentran casi estáticas (sus fuerzas de deseo se compensan con la repulsión social); pero aun así, poseen una pequeña oscilación en torno a la posición de equilibrio.

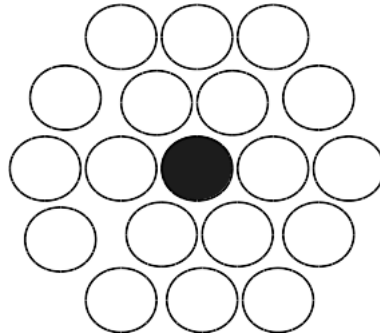


Figure A.3: Esquema de las partículas. Partícula central (coloreada de negro) rodeada por 6 primeros vecinos y doce segundos vecinos.

El resultado de esta simulación es el conjunto de valores que se exhiben en las tablas de abajo. Éstos son la distancia al origen y la presión social que siente cada individuo.

| Distancia (m) | Presión (N.m) |
|---------------|---------------|
| 1,48 | 664,0 |
| 1,26 | 999,9 |
| 1,49 | 653,3 |
| 1,48 | 664,0 |
| 1,27 | 988,7 |
| 0,7 | 1820,5 |
| 0,7 | 1820,9 |
| 0,0 | 2340,2 |
| 0,7 | 1829,9 |
| 0,7 | 1833,5 |

| Distancia (m) | Presión (N.m) |
|---------------|---------------|
| 1,26 | 989,8 |
| 1,49 | 655,2 |
| 1,26 | 991,9 |
| 1,49 | 653,7 |
| 0,7 | 1828,0 |
| 1,26 | 1004,1 |
| 0,7 | 1833,6 |
| 1,48 | 663,1 |
| 1,26 | 1002,1 |

Sumar todos los valores de presión social y dividir por dos da como resultado el lado izquierdo de la ecuación (A.3).

$$\sum_{i=1}^N \langle 2P_i A_i \rangle = 11618.6 \text{ N.m} \quad (\text{A.9})$$

La suma de todas las distancias multiplicada por la fuerza de deseo $f_d = mv_d/\tau$ da como resultado el lado derecho (despreciando el primer término porque no hay interacción con paredes):

$$-2\mathcal{PA} - \sum_{i=1}^N \langle \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{f}_d^{(i)} \rangle = 11580.8 \text{ N.m} \quad (\text{A.10})$$

Ambos valores son cercanos. Por lo tanto, el resultado de esta simulación verifica la relación del virial (A.3).

A.3.2 Partículas en hilera

Se creó un código que mide la presión que soportan los individuos dispuestos en hilera como muestra la figura A.4.

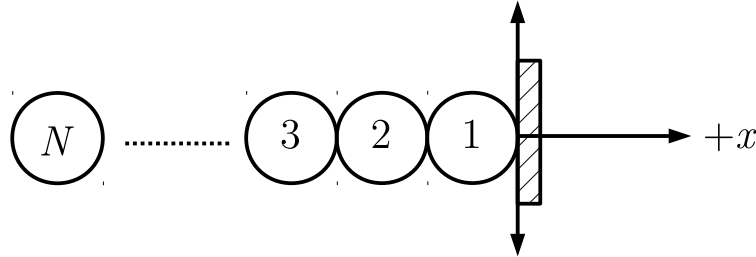


Figure A.4: Hilera de individuos empujando a la derecha. Situación estática donde las fuerzas de deseo de cada individuo se compensan con la repulsión social.

Los resultados se muestran en la tabla A.1. La misma está ordenada del individuo más cercano al más lejano de la pared. La presión disminuye conforme se alejan de la pared y el valor de presión aumenta con la cantidad de individuos.

En la tabla A.2 se muestran valores de presión teóricos (calculados a partir de las fórmulas A.5, A.6 y A.7). Las magnitudes de presión son comparables a las simuladas y el comportamiento a grandes rasgos es similar (las partículas más presionadas son las que se encuentran

más cerca de la pared y aumentar N aumenta la presión general)

Table A.1: Valores simulados de $4P_i A_i$ para $v_d = 4$ m/s.

| | N | | | | | |
|-----|-----|-------|--------|--------|--------|--------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | — | — | — | — | — | — |
| 2 | | 393.2 | 1116.7 | 1751.4 | 2362.2 | 2927.0 |
| 3 | | | 393.03 | 1113.8 | 1761.7 | 2355.1 |
| 4 | | | | 391.45 | 1120.3 | 1755.4 |
| 5 | | | | | 394.03 | 1117.0 |
| 6 | | | | | | 393.03 |

Table A.2: Valores teóricos de $4P_i A_i$ para $v_d = 4$ m/s.

| | N | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 225.03 | 780.98 | 1251.4 | 1683.1 | 2088.3 | 2473.2 |
| 2 | | 393.03 | 1117.0 | 1755.4 | 2355.1 | 2928.3 |
| 3 | | | 393.03 | 1117.0 | 1755.4 | 2355.1 |
| 4 | | | | 393.03 | 1117.0 | 1755.4 |
| 5 | | | | | 393.03 | 1117.0 |
| 6 | | | | | | 393.03 |

En esta sección se verificó que los resultados simulados satisfacen la relación del virial (partículas centradas) y a su vez concuerdan con los cálculos teóricos (partículas en hilera)

Apéndice B

Script básico de Lammmps

A modo de ejemplo se describirá un script de Lammmps que se hizo para simular 225 individuos en un recinto de 20×20 m con una puerta de 1,2 m. Este programa cuenta con dos ciclos **for**, uno recorre diferentes valores de velocidad de deseo y el otro (anidado) sirve para tener 30 simulaciones con diferentes velocidades iniciales.

El programa devuelve un video de la simulación en formato mpg y un archivo txt con una tabla que indica: v_d , número de iteración y el tiempo para el cual evacuaron más de 159 individuos. El script está dividido en cinco partes: condiciones iniciales, fuerzas, evacuados, visualización y ejecución del proceso.

En las condiciones iniciales se fija la dimensión del problema (2d), las condiciones de contorno (no periódicas en las coordenadas x e y), el sistema de unidades usado (sistema internacional), también se configuran los atributos de los individuos como el tamaño (60 cm diámetro) y su peso (70 kg). La velocidad inicial se fijó con la función **velocity**, la misma genera una distribución gaussiana de velocidades que es asignada de forma aleatoria a los individuos. El módulo de la velocidad es 1,7 m/s. La semilla que genera la distribución de velocidades es el número de iteración.

En cuanto al tamaño de la región de simulación, se crearon tres zonas: la zona 1 es la que

inicialmente posee a los individuos (ordenados tipo red cuadrada separados 1,3 m entre si), la zona 2 es la región de evacuación y la zona 3 es la conexión entre ambas regiones (la puerta por donde pasan).

En la parte de fuerzas se especifican las interacciones que sienten los individuos y sus respectivos parámetros. La repulsión entre individuos (pair style social) utiliza la expresión (2.3) con los parámetros: $A=2000$ N, $B=0,08$ m y se asignó un cutoff de 3,5 m. La fuerza granular (pair style gran/social) se basa en la fórmula (2.4) con $\kappa = 2,4 \times 10^5 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Se usaron los mismos parámetros para las expresiones análogas en la interacción individuo-pared (fix wall/region social y granular). La fuerza de deseo (fix social/self) tomó como parámetro a la velocidad de deseo, ésta varía según el loop del encabezado del programa.

En la parte de evacuación se cuenta a todos los individuos que salieron del recinto, es decir, a todos los peatones cuya posición en la coordenada x sea mayor a 20 m. Este cálculo queda almacenado en la variable **evacuados** que se utiliza para terminar la simulación cuando la cantidad de individuos evacuados sea superior a 159.

La visualización devuelve un video **in.evacuation.mpg** que permite observar la dinámica de la evacuación.

La última parte del programa está destinada a la ejecución del proceso. Calcula nuevas posiciones y velocidades usando el algoritmo de Verlet a través de la función **fix nve**. El timestep utilizado es 0,0001 s. La función **run 500** aplica 500 iteraciones de Verlet. En la variable **t** se calcula y guarda el tiempo. Una vez que se supera la cantidad de individuos requerida, la función **print** escribe en un txt las siguientes variables: velocidad de deseo, número de iteración y tiempo de evacuación (el tiempo que tardan evacuar más de 159 peatones).

En la sintaxis de Lammmps, todo texto seguido de un numeral es comentario. A continuación se muestra el código arriba descripto.

```

## 2D Panic Evacuation: 225 individuals, room 20x20

# Loop velocidad de deseo
variable vdmax equal 6
variable vd loop 1 ${vdmax}
label start_of_loop1

# Loop de iteracion
variable itermax equal 30
variable iter loop 1 ${itermax}
label start_of_loop2


#          INITIAL CONDITIONS
dimension      2
boundary       f f p
units          si
atom_style     sphere
lattice        sq 1.3 origin 0.5 0.5 0.0
region         zona1 block 0 20 0 20 -1 1 units box
region         zona2 block 20.12 40 0 20 -1 1 units box
region         zona3 block 19 21 9.4 10.6 -1 1 units box
region         todas union 3 zona1 zona2 zona3
create_box     1 todas
create_atoms   1 region zona1
set            atom * mass 70.0
set            atom * diameter 0.6
velocity       all create 1e23 ${iter} dist gaussian
comm_modify    vel yes


#          FORCES
pair_style     hybrid/overlay gran/social 0 0 0 240000 0 1 social 0.08 3.5
pair_coeff     * * social 2000 3.5 0.3
pair_coeff     * * gran/social

```

```

fix walls all wall/region todas social 2000 0.08 3.5
fix wallg all wall/region todas granular 240000 120000 0.001
fix target all social/self 70 ${vd} xy

```

```

#          EVACUATED
compute    1 all property/atom x
variable   out atom c_1>20.0
compute    mycompute all reduce sum v_out
variable   evacuados equal c_mycompute

```

```

#          VISUALIZE
dump 3 all movie 200 in.evacuation.mpg type type &
      axes yes 0.8 0.02 view 0 0 zoom 2 adiam 0.6

```

```

#          RUN THE PROCESS
atom_modify sort 0 0.0
timestep    0.0001
fix         1 all nve
thermo_style custom step c_mycompute

```

```

# Loop de proceso
variable nmax equal 20000
variable n loop ${nmax}
label    start_of_loop3
run      500
if       "${evacuados} > 159" then "jump SELF break"
variable t equal 0.05*$n
next n
jump SELF start_of_loop3
# Terminación del proceso
label break

```

```
print "${vd}  ${iter}  $t" append print.txt
clear
variable n delete
next iter
jump SELF start_of_loop2
# Terminacion loop de iteracion
clear
next vd
jump SELF start_of_loop1
# Terminación loop velocidad de deseo
```


Apéndice C

Características del cluster

En este apéndice se detallan las características de las computadoras utilizadas para llevar a cabo las simulaciones. Se usaron dos computadoras. Una de ellas compuesta por cuatro nodos (Head, node1, node2, node3) y otra por un único nodo.

Head

| | |
|----------------------|-----------------------------------|
| Architecture: | x86_64 |
| CPU op-mode(s): | 32-bit, 64-bit |
| Byte Order: | Little Endian |
| CPU(s): | 2 |
| On-line CPU(s) list: | 0,1 |
| Thread(s) per core: | 1 |
| Core(s) per socket: | 2 |
| Socket(s): | 1 |
| NUMA node(s): | 1 |
| Vendor ID: | GenuineIntel |
| CPU family: | 15 |
| Model: | 6 |
| Model name: | Intel(R) Pentium(R) D CPU 3.20GHz |

Stepping: 4
CPU MHz: 2400.000
BogoMIPS: 6400.33
Virtualization: VT-x
L1d cache: 16K
L2 cache: 2048K
NUMA node0 CPU(s): 0,1

Node1:

Architecture: x86_64
CPU op-mode(s): 32-bit, 64-bit
Byte Order: Little Endian
CPU(s): 8
On-line CPU(s) list: 0-7
Thread(s) per core: 2
Core(s) per socket: 4
Socket(s): 1
NUMA node(s): 1
Vendor ID: GenuineIntel
CPU family: 6
Model: 42
Model name: Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU @ 3.40GHz
Stepping: 7
CPU MHz: 2897.703
BogoMIPS: 6784.38
Virtualization: VT-x
L1d cache: 32K
L1i cache: 32K
L2 cache: 256K
L3 cache: 8192K

NUMA node0 CPU(s): 0-7

Node 2:

Architecture: x86_64
CPU op-mode(s): 32-bit, 64-bit
Byte Order: Little Endian
CPU(s): 8
On-line CPU(s) list: 0-7
Thread(s) per core: 2
Core(s) per socket: 4
Socket(s): 1
NUMA node(s): 1
Vendor ID: GenuineIntel
CPU family: 6
Model: 60
Model name: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz
Stepping: 3
CPU MHz: 3990.234
BogoMIPS: 7200.41
Virtualization: VT-x
L1d cache: 32K
L1i cache: 32K
L2 cache: 256K
L3 cache: 8192K
NUMA node0 CPU(s): 0-7

Node3:

Architecture: x86_64
CPU op-mode(s): 32-bit, 64-bit
Byte Order: Little Endian
CPU(s): 4
On-line CPU(s) list: 0-3
Thread(s) per core: 1
Core(s) per socket: 4
Socket(s): 1
NUMA node(s): 1
Vendor ID: GenuineIntel
CPU family: 6
Model: 42
Model name: Intel(R) Core(TM) i5-2500 CPU @ 3.30GHz
Stepping: 7
CPU MHz: 2758.851
BogoMIPS: 6584.92
Virtualization: VT-x
L1d cache: 32K
L1i cache: 32K
L2 cache: 256K
L3 cache: 6144K
NUMA node0 CPU(s): 0-3

Architecture: x86_64
CPU op-mode(s): 32-bit, 64-bit
Byte Order: Little Endian
CPU(s): 8
On-line CPU(s) list: 0-7
Thread(s) per core: 2

| | |
|---------------------|--------------|
| Core(s) per socket: | 4 |
| Socket(s): | 1 |
| NUMA node(s): | 1 |
| Vendor ID: | GenuineIntel |
| CPU family: | 6 |
| Model: | 58 |
| Stepping: | 9 |
| CPU MHz: | 1600.000 |
| BogoMIPS: | 6784.26 |
| Virtualization: | VT-x |
| L1d cache: | 32K |
| L1i cache: | 32K |
| L2 cache: | 256K |
| L3 cache: | 8192K |
| NUMA node0 CPU(s): | 0-7 |

Bibliografía

- [1] V. Blue and L. Adler. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata micro-simulation. *Transportation Research Record*, 1644:29–36, 1998.
- [2] W.G. Cheng, S. Lo, Z. Fang, and C. Cheng. A view on the means of fire prevention of ancient chinese buildings-from religious belief to practice. *Structural Survey*, 22:201–209, 2004.
- [3] Z. Daoliang, Y. Lizhong, and L. Jian. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physica A*, 363:501–511, 2006.
- [4] L. Bruno F. Venutti and N. Bellomo. Crowd dynamcis on a moving platform: mathematical modeling and application to lively footbridges. *Mathematical and Computer Modeling*, 45:252–269, 2007.
- [5] FBC2010. Doors, gates and turnstiles. *Florida Building Code Handbook*, 1008.1:81, 2010.
- [6] FBC2010. Exit and exit access doorways. *Florida Building Code Handbook*, 1015.1:90, 2010.
- [7] G. Frank and C. Dorso. Room evacuation in the presence of an obstacle. *Physica A*, 390:2135–2145, 2011.
- [8] G. Frank and C. Dorso. Evacuation under limited visibility. *International Journal of Modern Physics C*, 26:1–18, 2015.
- [9] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407:487–490, 2000.

- [10] Dirk Helbing, Anders Johansson, and Habib Zein Al-Abideen. Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Phys. Rev. E*, 75:046109, Apr 2007.
- [11] T. Huan-Huan, D. Li-Yun, and X. Yu. Influence of the exits' configuration on evacuation process in a room without obstacle. *Physica A*, 420:164–178, 2015.
- [12] Haile J.M. *Molecular Dynamics Simulation*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1997.
- [13] H.K. Bak K. To, P.Y. Lai. Jamming of granular ow in a two-dimensional hopper. *Phys. Rev. Lett*, 86:71–74, 2001.
- [14] A. Kirchner and A. Schadschneider. Simulating of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A*, 312:260–276, 2002.
- [15] Thomas W Lion and Rosalind J Allen. Computing the local pressure in molecular dynamics simulations. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 24(28):284133, 2012.
- [16] J.D. Low. ollowing the crowd. *Nature*, 407:465–466, 2000.
- [17] Mads Mysen, Sveinung Berntsen, Per Nafstad, and Peter G. Schild. Occupancy density and benefits of demand-controlled ventilation in norwegian primary schools. *Energy and Buildings*, 37(12):1234 – 1240, 2005.
- [18] OSHA. Design and construction requirements for exit routes. *Occupational Safety & Health Administration Standards 29-CFR*, 1910.36(b):1–3, 2015.
- [19] D. Parisi and C. Dorso. Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. *Physica A*, 354:606–618, 2005.
- [20] G. Perez, G. Tapang, M. Lim, and C. Saloma. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A*, 312:609–618, 2002.
- [21] Steve Plimpton. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. *Journal of Computational Physics*, 117(1):1 – 19, 1995.
- [22] W. Song y W. Lv S.J. Wang. Moving characteristics of “blind” people evacuating from a room. *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems*

(*ITSC*), 2014.