Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación
Maestría en Ciencias de la Computación

Sistema multiagente para caracterizar comportamientos colectivos en tráfico peatonal

Tesis que como requisito parcial para obtener el título de

Maestro en Ciencias

presenta

Gerardo Velázquez Solis

Director de tesis: Dr. José Alejandro Rangel Huerta
Dr. Guillermo de Ita Luna.
Puebla, Puebla, octubre de 2017.

Dedicado a
mi familia.

Agradecimientos

El trabajo de tesis que ahora leen fue posible no solo por mi esfuerzo, si no también gracias al apoyo de personas que me acompañaron en el proceso.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Rosa Guadalupe Solis Hernández y Gerardo Velázquez Palafox, ustedes han sido el pilar principal y la catapulta a futuros logros.

A mis asesores, los Doctores José Alejandro Rangel Huerta y Guillermo de Ita Luna. A mi comité evaluador, Doctores Fernando Zacarías Flores, Mario Mauricio Bustillo Díaz, Gerardo Martínez Guzman y Apolonio Ata Pérez. Gracias a todos por seguir la evolución del trabajo y por sus valiosos comentarios en cada evaluación.

Gracias Alejandra, es por tí que muchos proyectos ven fín. Gracias por empujarme en momentos inciertos y jalarme a reflecionar cuando todo es fácil. Ésta etapa de investigación fue mejor contigo a mi lado. Estoy seguro que las próximas serán aún mejores.

Resumen

En las últimas décadas el estudio en diversas áreas del desarrollo humano a aumentado junto con el desarrollo de nuevas tecnologías y avance de la ciencia. Los científicos copian conocimiento humano a ciertas áreas de la ingeniería y adaptan avances tecnológicos al día a día de la sociedad.

En particular, la investigación del fenómeno peatonal a tenido gran audiencia, pero aún no se ha podido desarrollar un esquema que abarque todas las características necesarias para replicar el movimiento e interacción peatonal.

Se ha buscado analizar grupos e individuos peatones mediante experimentos con peatones reales. Así como describirlos mediante modelos físicos, psicológicos, automatas celulares, agentes inteligentes o algún híbrido.

Estos estudios son de vital importancia para poder realizar investigaciones de forma acertada al simular situaciones probables en la naturaleza y al diseñar espacios públicos. En algunos casos, dichos trabajos se realizan para evaluar la eficiencia de espacios ya existentes y sus posibles riesgos.

El mejor aprovechamiento del ambiente y un movimiento dinámico es el objetivo en muchos casos. Y en algunos de éstos, al no comprender por completo la

interacción peatonal, se ha optado por adaptar sistemas de auto organización de otros sistemas biológicos como hormigas o enjambres para solucionar parcialmente algunos problemas.

Nosotros proponemos un modelo de agentes peatonales regido por un conjunto de reglas, que adapta una influencia browniana como parte de información del ambiente local de los agentes.

Tal propuesta resulta cualitativamente en comportamientos que replican a conglomerados peatonales reales. Cuantitativamente se presentan resultados que se esperarían de un correcto modelamiento del fenómeno.

También se lograron comportamientos de auto organización y patrones emergentes que surgen en el marco de conjuntos peatonales vistos como sistemas complejos.

De esta manera, el presente trabajo resulta en un modelo híbrido de agentes peatonales que incluyen una influencia browniana y logran replicar una gran cantidad de características peatonales. También se tiene como producto un Sistema Multiagente para realizar experimentos con simulaciones peatonales y poder medir lo que sucede.

Índice general

Índice de figuras xii

Índice de cuadros xiii

1. Introducción 1

1.1. Caso de estudio 2

1.2. Objetivos 4

1.2.1. Objetivo General 4

1.2.2. Objetivos Específicos 4

2. Estudio de peatones. Modelación y Simulación 7

2.1. Fuerza Social y Modelos Físicos 8

2.2. Autómatas Celulares 11

2.3. Sistemas Multiagente 13

2.4. Experimentación 15

3. Propuesta 19

3.1. Teoría del movimiento Browniano 20

3.2. Propuesta de Agente Peatón-Browniano 25

3.2.1. Módulo de percepción 27

3.2.2. Módulo de toma de decisiones 32

3.2.3. Módulo de actuación 55

4. Experimentos y Resultados **57**

4.1. Simulador peatonal 58

4.2. Simulaciones 61

4.2.1. Densidades fijas y posiciones aleatorias 69

4.2.2. Densidades fijas y AP separados 76

Conclusiones **83**

Referencias **90**

Índice de figuras

3.1. Sistema de particula browniana. 21
3.2. Diagrama fundamental del APB. 26
3.3. Variables de estado del APB. 27
3.4. Zonas **P** de Percepción. Todos los peatones tienen zonas de percepción en forma T. 27
3.5. Agente peatón con peatones que comparten dirección con él dentro de su área de interacción. 28
3.6. Agente peatón con peatones en flujo y contraflujo dentro de su área de interacción. 28
3.7. Las líneas punteadas son los vectores formados entre los agentes, y las flechas son los vectores de fuerza resultante. 30
3.8. Zona **P** de percepción vacía. En ambas figuras se visualiza que no existen pared o peatones que obstruyan el paso, por lo tanto se puede efectuar una caminata libre. 34
3.9. Distribución de probabilidad para giro desarrollando caminata libre. 35
3.10. Distribución de probabilidad para giro cuando los agentes se enfrentan a una situación de encuentro con peatones. 36
3.11. Diferentes configuraciones de encuentro con peatones. a), b) y c) en flujo. d), e) y f) en contraflujo. 37

3.12. Distribuciones de probabilidad para configuraciones de encuentro frontal y lateral a la izquierda o derecha. En este tipo de encuentro, el lado libre recibe el porcentaje de giro que corresponde al lado ocupado. 39

3.13. Configuraciones para las reglas de tipo Encuentros Frontales con 1 Lateral. En este grupo no importa la dirección de los peatones que ocupan un lugar lateral en **P**, ya que se ignora el espacio que no se puede ocupar. 40

3.14. Cuando se da un encuentro con peatones en el que están ocupadas las dos opciones laterales, toda posibilidad de avanzar queda con un giro $\omega = 0°$. 41

3.15. Posibles escenarios de encuentros con peatones de manera Frontal y Laterales. 41

3.16. Escenarios de encuentros con peatones sin encuentro frontal. 42

3.17. Distribuciones para escenarios en los que puede haber encuentro lateral a la izquierda, derecha o ambos, pero sin encuentro frontal. . 43

3.18. Distribuciones donde los agentes tienen bloqueado algún lado de su zona **P** con una pared. 45

3.19. APB que caminan de izquierda a derecha (rojos) y de derecha a izquierda (azules) en situación de camino obstruido por pared. . . . 46

3.20. APB en trayectoria de colisión con pared. 47

3.21. Distribuciones para encuentros combinados de pared y agentes. En la primera distribución, las disposiciones en la zona **P** tienen pared del lado izquierdo y el derecho libre. La segunda contempla situaciones en las que hay pared de algún lado y agente del otro. Y en la tercera distribución la pared está del lado derecho y el lado izquierdo no está ocupado. 48

3.22. Posibles distribuciones de peatones y pared en la zona de percepción **P**. Se muestran las configuraciones para agentes que caminan de izquierda a derecha con pared a la izquierda, pero los escenarios son análogos para cuando la pared está del lado derecho y de igual manera para agentes que caminan de derecha a izquierda. 50
3.23. Agente que funge como PB y los agentes que se encuentran dentro de su área de interacción. 51
3.24. Regiones que indican la dirección en que la fuerza browniana empuja un agente. Cualquier vector con ángulo dentro de la zona verde (entre 22.5 y 337.5) empuja hacia adelante (si el peatón es rojo), en la zona marrón (> 22.5 y <=90) hacia la izquierda y en la zona azul (>270 y <=337.5) hacia la derecha. 53
3.25. Distribución para una configuración de encuentro con peatones - lateral sin frontal, después de tomar en cuenta la influencia browniana. 54

4.1. Sistema Multi-Agente utilizado para las simulaciones de los APB. . 58
4.2. En a) se observa la formación de una pared peatonal. En b), se ha convertido en un atasco, el sistema evolucionó más rápido que la capacidad de los AP por resolver el problema. La simulación es del modelo de Ballinas et. al. 64
4.3. Comportamiento de la entropía en los diferentes simuladores. Se nota una visible mejora de rendimiento por parte de las simulaciones que implementan el modelo propuesto. 66
4.4. Evolución de la entropía a través del tiempo con aumento de AP. Cada 200 unidades de tiempo se agregan 10 agentes a la simulación y las posiciones se reasignan aleatoriamente. 68
4.5. Muestras de configuraciones de los pasillos durante las simulaciones con 50 AP. a) Ballinas et.al., b) APB de radio 0 y c) APB de radio 3. 70
4.6. Simulaciones con 50 AP por 1000 unidades de tiempo. Solamente se muestra el rango de 2 a 4 en el eje de la entropía para una mejor apreciación. 70

4.7. Simulaciones con 350 AP. Los estados se capturaron después de transcurridas las siguientes unidades de tiempo: a) Ballinas et.al. a las 72, b) APB de radio 0 a las 221 y c) APB de radio 3 a las 295. . 72
4.8. Simulaciones con 350 AP durante 1000 unidades de tiempo. 72
4.9. Tanto a) Ballinas et.al., b) APB de radio 0 y c) APB de radio 3, presentan atascos con 650 peatones. Los estados de las imágenes se alcanzaron en los tiempos 65, 120 y 212 para a), b) y c) respectivamente. 74
4.10. Simulaciones con 650 AP. 74
4.11. Comportamiento de la entropía en los diferentes simuladores. La configuración inicial separa los grupos de peatones a los extremos del corredor al inicio de cada etapa. 77
4.12. Gráficas de entropía en simulaciones con 50 y 100 AP. 78
4.13. Diferentes momentos de una simulación con 50 APB de radio 3 y grupos separados al inicio. a) configuración inicial, b) primer choque a 42 unidades de tiempo y c) situación promedio de una simulación con las características mencionadas (pantalla capturada en el momento 751). 78
4.14. Gráfica de entropía en simulaciones con 150 AP. 79
4.15. Gráficas de flujo para simulaciones con 50, 100, 150, 250 y 350 AP. Congruente con las gráficas de entropía, debido al pronto atasco de los agentes de Ballinas et. al. a partir de 150 AP, sufren una considerable caída en el flujo total de sus simulaciones, pasando súbitamente de ser el tipo de AP que más desaloja, a ser el que menos logra. 80
4.16. Gráficas de entropía en simulaciones con 250 y 350 AP. 82

Índice de cuadros

3.1. Tamaños de paso dependiendo del giro y flujo en encuentros frontales con peatones. Situaciones de la Figura 3.11. 38
3.2. Tamaños de paso dependiendo del giro y configuraciones peatonales de la Figura 3.13. 40
3.3. Tamaños de paso según las configuraciones peatonales de la Figura 3.15. Para éstas nunca se gira. 42
3.4. En estos encuentros con peatones, se eliminan el tipo de encuentro frontal ya que es inexistente, así como la distancia al encuentro. . . 44
3.5. Tamaños de paso para situaciones donde los agentes observan pared en algún lado de su zona **P**. 47
3.6. Tamaños de paso para situaciones donde un agente observa pared y también hay agentes dentro de su zona **P**. 49

Capítulo 1

Introducción

El estudio de sistemas complejos ha sido tema de interés para diversas áreas de la ciencia. Entender cómo y por qué ocurren ciertos fenómenos ha dado paso al desarrollo de metodologías y tecnologías que facilitan ciertas tareas científicas y del haber cotidiano en la sociedad.

A través de este texto estudiaremos, en el capítulo 2, las diferentes formas en que se ha modelado y simulado a los peatones para su estudio.

En este trabajo de tesis se propone un modelo de movimiento peatonal inspirado en el fenómeno de movimiento browniano. El modelo, procura describir el comportamiento de un peatón al moverse en un conglomerado. En 3.1 se presenta el sistema de movimiento browniano. En 3.2 se desarrolla el modelo y diseño de un agente al que llamanos *Agente Peatón-Browniano (PB)*, que bajo ciertas reglas y con inspiración en el movimiento browniano, describe el movimiento de peatones.

En la primera sección del capítulo 4 se describe el ambiente sobre el que interactúan los agentes *PB*, así como el sistema de simulación en el que muchos agentes *PB* interactúan y que se utiliza para el estudio de conglomerados peatonales.

Con las simulaciones como una forma de observar las acciones de agentes *PB*, se presenta en las secciones 4.1 y 4.2 una forma de caracterización con parámetros de entropía que brindan información macroscópica del fenómeno de interacción de peatones.

Posteriormente, se muestran resultados y observaciones particulares de las simulaciones y por último las conclusiones a las que llegamos.

Con este trabajo, se pretende aportar un parámetro entrópico capaz de describir un grupo de peatones por su heterogeneidad. En el transcurso, también se intruduce un modelo inspirado en el movimiento de una partícula browniana, así como un sistema de simulación "open source", disponible para quien lo necesite utilizar en su forma original o para realizar alguna modificación sobre él.

A continuación se introduce el fenómeno peatonal de interés.

1.1. Caso de estudio

Así como se ha hecho para otros grupos biológicos, la investigación sobre comportamiento humano ha sido de gran interés por la motivación de conocernos mejor. El ser humano sabe de las actividades que realiza por necesidad o gusto, pero si se le pregunta el por qué actúa de cierta manera, poco podrá responder sobre cómo es que se conduce.

Mucho se ha estudiado la parte psicológica de los humanos, cómo se comportan cuando se encuentran solos y cuando están en grupo. Su opinión acerca de un tema, tal vez antes y después de haber ocurrido cierto hecho que pueda remarcar el pensamiento o cambiarlo.

Antropológicamente se ha podido analizar cómo se desenvuelven las sociedades de acuerdo a la zona geográfica, tipo de sistema político, dogmas, situación socioeconómica, etcétera.

Para nuestro caso de interés, a diferencia de lo que se podría pensar, el estudiar peatones implica tomar en cuenta muchas variables, desde la cantidad de personas interactuando, las direcciones en las que caminan, el tiempo que les toma desplazarse cierta distancia, el número de diferentes orígenes y destinos, hasta el lugar en el que se lleva a cabo la observación, entre otras cosas.

Para el caso que se trabaja, se tienen las siguientes consideraciones y delimitaciones:

1. Zona de interés:
   - Corredor en línea recta;
   - Sin obstáculos más que la delimitación de las paredes.
2. Peatones:
   - Se considera a peatones estándar, esto es, no tienen discapacidades físicas o de percepción y no hay diferencia de sexo o edad;
   - Personas caminando de un extremo del corredor al otro;
   - Personas caminando en contraflujo.
3. Escenario:
   - Situación estándar de caminado. No situaciones de pánico como evacuaciones de emergencia en desastres provocados o naturales. No hay prisa y tampoco motivación para un caminado lento (una reducción en la velocidad de los peatones solo se influencía por una gran cantidad de personas en el ambiente o las direcciones que toman);

- Distintas densidades, es decir, diferente número de peatones en el corredor. La ocupación varía en los experimentos.

El estudio se llevó a cabo dentro del marco de las restricciones mencionadas, diseñando al agente *PB* para funcionar de acuerdo al ambiente y condiciones escritas.

1.2. Objetivos

Dentro del estudio de colectivos, la caracterización da paso a un mejor entendimiento del grupo estudiado. Si dicha caracterización se realiza con pocos parámetros, el estudio se hace con mayor facilidad, pudiendo representar de mejor manera ciertas situaciones o comportamientos.

1.2.1. Objetivo General

El propósito del trabajo es caracterizar colectivos en tráfico peatonal a través de la determinación de los procesos aleatorios subyacentes en el marco de los sistemas complejos.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo general, es necesario cumplir objetivos más específicos. Se consideran los siguientes como escenciales:

- Proponer un modelo matemático que refleje el movimiento de peatones;
- Definir reglas para el diseño de un agente peatón (agente de software);
- Programar agentes peatones y dejarlos actuar en un ambiente;
- Caracterizar conglomerados de agentes peatones mediante:

- Entropía;
- Estudio de patrones emergentes.

La propuesta y desarrollo de métodos y técnicas para cumplir los objetivos mencionados se introducen en los capítulos 3 y 4, presentando los resultados obtenidos en el capítulo 5.

Capítulo 2

Estudio de peatones. Modelación y Simulación

El estudio de peatones es un tema que ha ido creciendo en las últimas décadas por diversas razones. Las motivaciones y aplicaciones del estudio de conglomerados peatonales pueden ir desde el desalojo de lugares de entretenimiento como estadios o teatros, tráfico a través de corredores, en el abordaje o desalojo del metro o comportamiento en situaciones de evacuación.

La manera en que se ha intentado replicar el comportamiento de peatones al caminar solos o en conjunto tiene diferentes acercamientos. Algunos modelos están inspirados en la naturaleza, otros en comportamientos intrínsecos en la psicología del peatón, algunos trabajos realizan simulaciones con autómatas celulares o con ayuda de sistemas multiagentes.

Ahora presentamos cómo han sido utilizadas las técnicas mencionadas para el estudio de conglomerados peatonales.

2.1. Fuerza Social y Modelos Físicos

El modelo de fuerza social fue propuesto en [13] y está basado en la respuesta psicológica que un peatón pueda tener con el ambiente en el que se encuentra o con otros peatones. Las interacciones responden a las acciones individuales de los peatones al resolver encuentros, evadiendo de forma local y considerando cambios aleatorios en las trayectorias de caminado. Estas consideraciones obedecen a fuerzas de atracción y repulsión que actúan sobre cada peatón.

En este modelo se consideran áreas de repulsión y atracción entre peatones, al igual que fuerzas que no permiten que un peatón se acerque demasiado a paredes u obstáculos. Las fuerzas de atracción de las que se habla, son las que provocan que el peatón no pierda atención de su objetivo, o que por el contrario, cambie temporal o definitivamente su meta. Las de repulsión permiten principalmente conservar un área de respeto, con lo que se evitan choques o estancamientos.

Existen trabajos como [13] en donde se describen modelos de fuerza social, en el que se consideran factores como el ambiente y la motivación de un peatón para realizar ciertas acciones. Aquí se modelan ecuaciones que describen la dinámica peatonal en términos de fuerza, la cual genera la aceleración dada la velocidad deseada. Tales ecuaciones dinámicas resultan en ecuaciones acopladas no lineales de Langevin.

Como es de esperarse, las fuerzas sociales sobre un individuo se aplican de diferente manera dependiendo del lugar y situación. Un peatón no se comporta igual si hay una emergencia a como lo hace cuando da un paseo o decide apresurarse para llegar a una meta. De la misma manera tendrá comportamientos respecto al lugar en el que se encuentre.

En [14], se supone una gran cantidad de peatones desalojando un espacio, en

el cual hay solo una salida. Se modela la situación con base en la fuerza social que se verá afectada por la distancia del peatón a la salida y el tipo de individuo que represente ya sea paciente o impaciente. Los peatones se proponen como agentes y el espacio en que se mueven es una rejilla como en un autómata celular.

El objetivo de cada agente es el de salir del lugar y para esto se tienen que resolver pseudocolisiones que representan la lucha de dos agentes por un lugar más próximo a la salida que en el que se encuentran. La competencia por el espacio se resuelve con teoría de juegos, notando que siempre se jugarán el "Dilema del prisionero" o el caso de "Halcón-Paloma". En dicho trabajo se pueden notar fenómenos como atasco (clogging) causado especialmente por el efecto rápido-es-lento (faster-is-slower).

Se propuso también en [2], un modelo microscópico, donde los peatones toman decisiones a partir de teoría de juegos, a partir del cual anticipan los movimientos de otros peatones y previenen colisiones. Pero también, se diseñaron tácticas macroscópicas para determinar la ruta de grupos de peatones a una meta, con la finalidad de abarcar ambas escalas y acercar el desempeño al de peatones reales.

En [16] se hace una propuesta de ecuaciones de movimiento que se gobiernan por dos tipos de situaciones en las que los peatones se encuentran solos y en donde hay múltiples peatones. El estudio se basa en tres hipótesis principales: Primera, la velocidad de un peatón solo se determina por una función $f(p)$, p es la densidad total. Segunda, existen campos de potencial para cada peatón, es por esto que al realizar evasiones se mueven en ángulos rectos a líneas de potencial. Tercera, los peatones buscan minimizar el camino en función del tiempo pero moderan su comportamiento para evadir densidades extremadamente grandes, es decir, prefieren perder un poco de tiempo para no atravesar por un gran conjunto de peatones.

También se han desarrollado trabajos haciendo modelos que se basan en ecuaciones de Boltzmann. Una formulación de discos rígidos auto impulsados propuesta en [25], muestra cómo es que se forman veredas debido al potencial de repulsión social entre las partículas. Bajo este esquema se trabajan dos situaciones, el caminado libre que es modelado balísticamente, a lo que se denomina autodifusión y las soluciones de colisiones que se dan como encuentros binarios de disco rígido, después de las cuales se corrige la dirección de la partícula auto impulsada por sí misma.

En [12] se propone un acercamiento en el que se tienen en cuenta tres tipos de interacciones sociales binarias, procesos de evasión, promesa e imitación. Para el modelo, los patrones emergentes que describen auto organización, son causados en su mayoría por los procesos de imitación, para los que se compite con dos estrategias equivalentes. Las ecuaciones que se consideran son las que describen el comportamiento más probable que recae en ecuaciones tipo Boltzmann.

Se desarrolló un modelo y simulación para flujos peatonales y dinámicas de conglomerados en [21]. El modelo se basa en un conjunto de fuerzas, la fuerza de voluntad o deseo, fuerzas de evasión de colisiones y obstáculos/paredes y las fuerzas de contacto con peatones y obstáculos/paredes. De acuerdo a los resultados de sus simulaciones, con excepción de la fuerza de deseo, las demás se ven influenciadas por situaciones y peatones locales y no por peatones que se encuentran lejos. También se logró ver que se modeló de forma acertada el comportamiento de conglomerados, formación de veredas, evasión de obstáculos y rebasar a peatones.

Los modelos inspirados en fenómenos físicos buscan analogar de alguna manera la forma de caminar de un individuo o cómo se mueve el grupo completo de personas, con el fenómeno elegido.

2.2. Autómatas Celulares

Propuestos por Konrad Zuse y Stanislaw Ulam y desarrollados por John von Neumann, son un modelo matemático para sistemas dinámicos, los pasos o transiciones se realizan en unidades de tiempo discreto. Son útiles modelando sistemas que se componen de muchos objetos simples que se desenvuelven localmente.

En la teoría de autómatas celulares no existe una definición formal, pero al igual que a los autómatas finitos, los podemos identificar con una tupla $\langle \mathbb{Z}, \Sigma, \sigma, \upsilon, \delta \rangle$, donde:

- $\mathbb{Z}$, es un lattice o rejilla n-dimensional, cada celda de la rejilla se conoce como célula;
- Σ, alfabeto. Es el conjunto de estado posibles para las células;
- σ, configuración inicial del lattice;
- υ, tipo de vecindades;
- δ, función de transición.

En los autómatas celulares, el siguiente estado de cada célula se calcula en base al estado de los vecinos, así, dependiendo del tipo de vecindad, la dimensión de $\mathbb{Z}$ y las reglas de transición que se programa a las células, se pueden presentar comportamientos muy difíciles de predecir e incluso inesperados. Por ésta razón es que los autómatas celulares son una buena opción al buscar modelar comportamiento de peatones.

Un modelo de autómata celular es presentado en [32], en el cual existen dos tipo de peatones moviéndose en un corredor. Los tipos de peatones son peatones derechos (los que se dirigen a la derecha) e izquierdos (aquellos que van a la

izquierda). En el modelo se tiene restringido que se den pasos hacia atrás. Un parámetro llamado radio de interacción recolecta la información del ambiente próximo. De acuerdo con los resultados obtenidos, la interferencia o atascamientos no depende del tamaño del ambiente y hay menor probabilidad de que ocurra mientras más grande sea el radio de interacción.

Existen modelos de dinámica peatonal basados en el comportamiento de una retícula de gas como en [31]. Aquí se adopta el comportamiento de robots móviles y dividen las tareas de movimiento en: mover, esquivar y comportamientos básicos de remolino/vuelta ("swirl"). La forma de decisión de movimiento se hace sumando el producto de los vectores de cada movimiento multiplicado por el peso de la dirección correspondiente. En las simulaciones de los autores, se pudo observar que en general, el flujo promedio siempre es alto si la velocidad promedio es alta y sus fases cambian en la misma densidad total crítica.

Un modelo similar al de [31], es presentado en [33]. Se utilizaron cuatro tipos de peatones, peatones izquierdos, derechos, arriba y abajo. Los parámetros a medir son: parámetro-dirección, parámetro-vacío, parámetro-adelante y parámetro-categoría. A diferencia de su modelo similar, se encontró que a diferentes fases la relación velocidad-densidad y flujo-densidad son diferentes una de otra. Una extensión de los modelos presentados se encuentra en [17], que propone velocidades máximas de la forma vmax > 1. Sus resultados muestran que con el incremento de vmax el umbral de atascos en contraflujo disminuye.

Por su parte, en [5] se trabajaron microsimulaciones de peatones en contraflujo. Donde se notó que un grupo de reglas de operación puede capturar de buena manera el comportamiento de peatones individualmente. Aunque a nivel macroscópico no se alcance una representación completamente realista del sistema.

2.3. Sistemas Multiagente

Una forma más de simulación de peatones que resulta exitosa es utilizando "MAS"(Sistemas Multi-Agentes, por sus siglas en inglés). Con esta técnica se pretende cargar a un agente con reglas y comportamientos, o formas de deliveración, tales que funcionen como decisiones de un peatón. La idea es, cuando se ha carecterizado a un peatón y representado como agente, se pueda colocar más de uno de ellos en un ambiente de simulación y darles una meta que alcanzar, estudiar como se comportan en conjunto y determinar si la dinámica desarrollada se próxima a la esperada.

Aplicando ideas de teoría cinética presentadas en [26], en [3] desarrollan un sistema multiagente basado en un modelo para conglomerados de peatones. El modelo está formado por reglas simples de caminado que aplican los peatones que van de un extremo a otro en un corredor. En dicho trabajo se realizó una caracterización cuantitativa del desempeño de los agentes. Por el análisis de la caracterización se observó un resultado interesante ya que se manifestaron propiedades que se presentan en modelos de partículas auto impulsadas basadas en principios muy diferentes de diseño.

Dentro del modelado peatonal basado en agentes, es común utilizar como herramienta de apoyo un ambiente de autómatas celulares como lo hacen [15] [4] [8].

La propuesta de [15] toma la idea de [18] que se inspira en campos de partículas elementales. En el trabajo de [15] se incorpora el uso de fuerzas del tipo Helbing [13] en el conglomerado. La propuesta resulta en un modelo de Fuerza de Enjambre, que logra replicar efectos que facilitan la salida de conglomerados densos motivados por salir pronto de un lugar, tales comportamientos no se logran con modelos que no toman en cuenta la fuerza como pieza clave de su acción.

Por su parte en [8], los agentes se rigen por un conjunto de reglas que dictan su comportamiento en determinadas situaciones incluyendo factores de fuerza de atracción. Los agentes de [4] se gobiernan de forma parecida, con la diferencia de que pueden llegar a acuerdos, así como separarse de grupos que ya han acordado alguna acción.

La modelación de peatones se apoya en gran medida de acercamientos híbridos como los mencionados anteriormente. Dichos modelos combinan la modelación de agentes con algún tipo de fenómeno físico, analogía con otro grupo social o modelo matemático.

Siendo los peatones individuos sociales, es natural una propuesta de teorías psicológicas, como en [10]. Se añade a los agentes propiedades de *comparación/imitación*, de la teoría "SCT"(Teoría de Comparación Social). Estos agentes se comparan con otros en su entorno próximo y eligen a uno con características similares a las suyas para adoptarlas. El resultado, después de algún tiempo se logra cierto grado de homogeneidad en las acciones de los agentes.

Hasta ahora, los trabajos mencionados equipan a los agentes con reglas o reglas y algún modelo que analogue peatones. Otra forma de imitar peatones es dotando a los agentes de suficiente información sobre el ambiente, darles objetivos e intenciones.

En [27], se modelan agentes "BDI"(agentes con Creencias-Deseos-Intenciones), capaces de comunicarse entre ellos e intercambiar información. Se diseñaron para resolver problemas en estadios y ambientes donde hay atracciones visuales. El trabajo se centró en interpretaciones cualitativas, al igual que muchas simulaciones que buscan el modelado a nivel microscópico.

Al igual que éstos trabajos y tomando en cuenta los diferente modelos y

escalas a las que se puede modelar un peatón como agente, podemos diseñarlos con diferentes grados de inteligencia. Todo depende de lo complejo que querrámos diseñar el agente dotándolo de suficiente información o lo simple que se necesite para un comportamiento en grupo.

Hay que tomar en cuenta que, mientras más complejo sea el agente, más poder de cómputo se requiere para que se desenvuelva en un entorno con varios agentes. Y si se modela muy simple, habrá aspectos de caminado que no podrá replicar. Así que el modelado por medio de agentes, se hace tomando en cuenta a que nivel se realizarán las simulaciones y el punto concreto de estudio.

2.4. Experimentación

Al igual que se proponen modelos inspirados en fenómenos fisicos, modelos psicológicos, basados en teoría de agentes o apoyados por las bondades que ofrecen los autómatas celulares, también se crean modelos y exponen comportamientos basados en la observación del fenómeno real de peatones en cierto ambiente. La experimentación con peatones reales en situaciones controladas da paso a la propuesta de reglas y comportamientos para situaciónes específicas.

La metodología consiste en:

- El planteamiento del escenario, tomando en cuenta restricciones en el ambiente y las condiciones de caminado;
- Definir al tipo de peatones. Si tienen prisa, están explorando, solo van de paso (atraviesan el escenario solo como parte de un recorrido), si siguen a alguien, están en caminata libre y demás formas de caminado que puedan interesar. En algunos casos incluso será importante definir la nacionalidad de los peatones, ya que la formación cultural podría afectar la manera de

conducirse al caminar. Saber si hay hombres y mujeres en el experimento y sus características físicas también pueden ser factores de interés;

- La situación del experimento, esto es, si se estudia un pasillo en un aeropuerto, la salida y abordaje del metro, la salida de un teatro o estadio, la explanada de una escuela, evacuación de una sala al termino de la hora laboral, al ocurrir un sismo o incendio, etc.;

- Habiendo definido condiciones y restricciones, el siguiente paso es realizar el experimento. En esta etapa lo más común es grabar todo lo ocurrido para poder estudiar con detenimiento los sucesos que se llevaron a cabo, el orden en que ocurrieron y la posible causa. La observación se realiza con mucho detenimiento y en ocaciones apoyada por técnicas computacionales de visión por computadora.

- Posteriormente se cuantifica y cualifica lo observado, identificando tipos de movimientos, situaciones, momentos y todo lo que se identifique como necesario para una correcta caracterización;

- La interpretación de los datos recolectados lleva a la producción de reglas, proposición de tipos de peatones y posible delimitación de comportamientos o identificación de fenómenos no esperados durante el experimento.

- Al final se puede tener como resultado una serie de observaciones cuantificadas, reglas, reporte de fenómenos inesperados o hasta un modelo que represente el experimento de peatones reales bajo ciertas condiciones.

Algunos trabajos en los que se experimenta con peatones reales ocupan sus resultados para llevarlos a una simulación y verificar que los datos obtenidos se están interpretando de forma correcta.

El marco de referencia propuesto en el modelo de [1], por ejemplo, utiliza un espacio de discretización dinámico e individual, que representa el espacio físico en

el que se mueven los peatones.

Tal modelo se define por cuatro elementos: un conjunto de decisiones, una lista de atributos que describe las alternativas, una lista de características socio-económicas describiendo el motor de decisiones y un término aleatorio épsilon que incluye errores no observados. El aporte que podemos resaltar del trabajo, es que el modelo es ajustable, en el sentido de que se pueden introducir manualmente datos de movimientos tomados de videos de peatones reales.

Existen trabajos experimentales que han ayudado a comprender que a pesar de que se estudie a peatones de diferentes partes del mundo, con distintas preferencias de caminado y velocidad [22] [29] [28] [23], en ningún caso es posible capturar toda la esencia de los peatones con un único modelo o metodología [20].

También hay trabajos específicos que abordan situaciones en escenarios muy comunes y de mucho interés. Por ejemplo, en [19] [30] [7], el estudio de peatones en corredores es de vital importancia para la construcción de mejores espacios. Buscan conocer la relación entre velocidad, densidad, flujo, así como las configuraciones en que se presentan fenómenos de cuellos de botella y sus características.

A pesar de los muchos estudios a conductas peatonales, aún no se logra entender y mucho menos modelar por completo el comportamiento de peatones. Es por esto que algunas investigaciones se centran en aspectos muy específicos para un entendimiento más preciso de acciones concretas del caminado de peatones.

Un ejemplo de estudios concretos son los realizados en [24] acerca de tareas de evasión. Donde se encontró que la elección de un lado para evadir se ve afectada y amplificada por interacciones que ocurren en el momento de la elección y al momento de la evasión. Al realizar simulaciones con los datos obtenidos, se encontró formación de veredas asimétricas que concuerda con los videos que se

obtuvieron de experimentos con peatones reales.

Así, podemos observar que, a pesar de las numerosas investigaciones, tanto teóricas como experimentales, aún se tiene deficiencias en los modelos creados al día de hoy. Incluso delimitando el estudio a un sector muy concreto de población, no es posible atrapar por completo el comportamiento peatonal a un nivel microscópico.

Capítulo 3

Propuesta

La propuesta presentada para el estudio de conglomerados peatonales, es a través de un Sistema Multi-Agente, en el que cada agente se comporte como un PB (Peatón Browniano). El modelo del PB está inspirado en la forma de caminar de peatones estándar y un factor browniano que influye en las decisiones a cada momento de la caminata.

Un peatón estándar en condiciones normales de caminado, desarrolla trayectorias de caminata libre, en las cuales se observan perturbaciones en el camino que se traza desde un punto de inicio hasta llegar a una meta.

Las perturbaciones mencionadas ocurren por la naturaleza de los peatones de no observar hacia un solo punto, el giro de la cabeza se ve reflejado en pequeños cambios de dirección al caminar, que están siendo corregidos durante el recorrido. Estos aparentes movimientos aleatorios también están relacionados con la cinemática del peatón e incluso por la superficie del ambiente en el que se encuentra.

Algunas otras razones por las que ocurren alteraciones durante el caminado es el encuentro con algún tipo de obstáculo, dígase una pared, columna, anuncio

u otro peatón. A un peatón se le puede considerar obstáculo si se encuentra en reposo, esto es, esta parado, también si su dirección de caminado es en contraflujo o si va en la misma dirección pero a una velocidad menor.

Hay que tener en cuenta que si el encuentro con otros peatones produce cambios en las trayectorias de caminata, a mayor densidad se presentan más interacciones y las perturbaciones pueden aumentar. Ahora bien, si la densidad peatonal es muy grande, a pesar de ocurrir muchas interacciones, las variaciones de dirección irán disminuyendo ya que no habrá lugar a dónde moverse.

Tomando en cuenta lo recién mencionado, se considera la creación de reglas para el caminado libre y la evasión de obstáculos, dígase paredes u otros peatones, en las que se tiene cierta probabilidad de giro a derecha o izquierda o seguir de frente. La probabilidad se vería afectada dependiendo de la situación en la que se encuentre el PB en un determinado instante de tiempo, esto es, dependiendo de la configuración del sistema.

Aunado a las reglas de caminado se intruduce un factor de fuerza aleatoria que también está sujeto a la configuración del sistema en determinado momento y descrito por la posición de los demás peatones, actuando sobre el PB en cuestión.

A continuación se introducen los modelos del movimiento browniano y en seguida la propuesta de nuestro PB.

3.1. Teoría del movimiento Browniano

El movimiento Browniano es el movimiento errático que presentan partículas suspendidas en un fluido. El nombre del fenómeno es debido a Robert Brown, un botánico que presentó sus observaciones de partículas de polen en agua [6]. A pesar de que el fenómeno recibe el nombre en honor a Brown, no fue él quien

primero describió tal movimiento, si no Jan Ingenhousz.

Al igual que con la descripción, varios científicos propusieron explicaciones análiticas del fenómeno, pero fue hasta 1905 que Albert Einstein presentó un desarrollo matemático en [9] que demostraba la teoría atómica y describía el fenómeno correctamente.

Como se puede observar en la Figura 3.1, el fenómeno de movimiento Browniano consiste en una partícula que se encuentra en un fluido. Dicha partícula es de mayor tamaño que las partículas que conforman el fluido. El movimiento de la partícula browniana (la de mayor tamaño) está dado por la interacción con las partículas del fluido, que la golpean constantemente en diferentes direcciones con fuerzas distintas. Los golpes recibidos son los que provocan que la partícula browniana se mueva en una dirección en un momento t_i y en una posible dirección contraria en t_{i+1}, provocando un movimiento aleatorio.

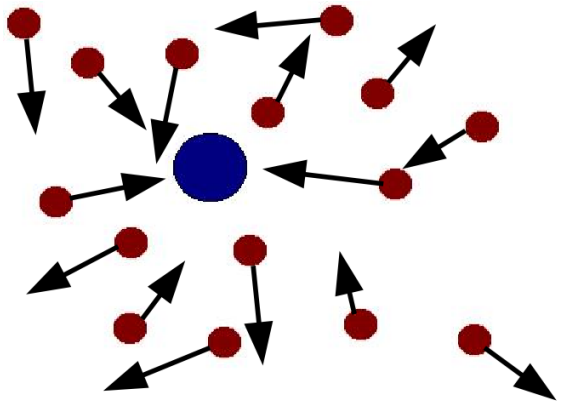


Figura 3.1: Sistema de particula browniana.

El movimiento browniano se ha estudiado ampliamente y podemos encontrar desarrollos análiticos en muchos textos, en particular se presenta un desarrollo tomado de [11].

Consideremos una partícula de masa M sumergida en un fluido compuesto por moléculas de masa m, tal que $M > m$. El fluido se encuentra en equilibrio térmico a cierta temperatura T. Es bien sabido que con dichas condiciones la partícula traza una trayectoria caótica cuya descripción no se puede hacer dadas las leyes de la mecánica clásica. La ecuación de Langevin resuelve el problema de descripción de este movimiento:

$$M\frac{dv}{dt} = -\gamma v + F(t) \tag{3.1}$$

donde $v(t)$ es la velocidad de la partícula al tiempo t, $-\gamma v$ es el término de la fricción dinámica entre la partícula pesada y el fluido y $F(t)$ es la fuerza fluctuante que representa la influencia de las colisiones que ocurren entre las moléculas del fluido y la partícula pesada.

El coeficiente γ del modelo macroscópico, debe ser determinado por las ecuaciones hidrodinámicas del sistema. Si suponemos a la partícula como una esfera de radio a moviéndose con velocidad constante en el fluido, entonces γ se da por la ley de Stokes:

$$\gamma = 6\pi a\eta \tag{3.2}$$

donde η es la viscosidad del fluido. Esta suposición requiere un análisis más detallado cuando se define un fluido específico.

Tomando en cuenta que 3.1 es una ecuación diferencial estocástica, no se puede resolver si no se realizan suposiciones sobre $F(t)$. En el modelo de Langevin se tienen dos suposiciones base, la primera:

$$< F(t) >= 0 \tag{3.3}$$

donde $<>$ es un promedio calculado de un conjunto adecuado de sistemas idénticos.

Y la segunda:

$$< F(t)v(0) >= 0, \quad t > 0 \tag{3.4}$$

que nos dice que existe un intervalo de tiempo δt en el que el cambio en v es despreciable tomando en cuenta que F a tenido muchas fluctuaciones. Éstas dos últimas expresiones nos dicen que para ciertos intervalos de tiempo no microscópicos, la fuerza y velocidad no están correlacionados. Así, con 3.3 y 3.4 se ha visto que el proceso estocástico involucrado en el movimiento de la partícula pesada es un proceso Gaussiano:

$$< F(t)F(t') >= B\delta(t - t') \tag{3.5}$$

donde B es una constante relacionada a la intensidad de la fuerza de fluctuación.

La solución formal a la ecuación 3.1 es:

$$v(t) = e^{(-\gamma t/M)}v(0) + M^{-1}\int_0^t dt' e^{[-\gamma(t-t')/M]}F(t) \tag{3.6}$$

Si ahora multiplicamos 3.6 por $v(0)$ usando 3.4 y por el principio de equipartición [1] $< v^2(0) >= \mathrm{k}_B T M^{-1}$, se tiene como resultado:

$$< v(t)v(0) >= \mathrm{k}_B T M^{-1} e^{(-\gamma t/M)} \tag{3.7}$$

que indica que las funciones de autocorrelación de velocidad decaen exponencialmente en el tiempo, con un tiempo característico $\tau = M/\gamma$ que depende de la masa de la partícula y las propiedades del fluido.

Como información adicional, con la suposición de que el proceso por el que se rige la partícula Browniana es Gaussiano y la función de correlación para $v(t)$

[1] El principio de equipartición es una fórmula en mecánica estadística que relaciona la temperatura de un sistema con su energía media. La equipartición dice que en un sistema en equilibrio térmico se reparte la energía de forma equivalente para sus diversas formas.

decae exponencialmente, es bien sabido que el proceso también es Markoviano. De esta manera, la probabilidad de encontrar una partícula (la partícula pesada o Browniana) con cierta velocidad v al tiempo t y tomando en cuenta que se le dio una velocidad inicial ($v(0)$) en un tiempo previo ($t = 0$), $P(v, t|v_0)$ satisface un ecuación de Fokker-Planck de la forma:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial v}(\gamma M^{-1} v P) + \gamma M^{-1} < v^2 > \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \tag{3.8}$$

A diferencia de la ecuación de Langevin, esta ecuación diferencial parcial se puede resolver por métodos estándar para condiciones iniciales específicas. Se puede observar también que, para tiempos $t \to \infty$:

$$\lim_{t\to\infty} P(v, t|v_0) \to P_{eq}(v) \tag{3.9}$$

donde $P_{eq}(v)$ es la distribución de Maxwell (una distribución Gaussiana) de las velocidades, para partículas con velocidad v y masa M en un fluido a temperatura T.

Con la formulación de la ecuación de Langevin que resuelve el problema de la descripción del movimiento browniano y su conversión a una ecuación de Fokker-Planck, se puede resolver el encontrar la velocidad de la partícula browniana en un tiempo t con cierta probabilidad.

Podemos notar que el planteamiento con la ecuación de Langevin es una solución de tipo mesoscópica, ya que no es microscópica pero si maneja la dinámica microscópica como parte de la fuerza fluctuante, que al promediar la interacción de las partículas del fluido trabaja como término macroscópico.

3.2. Propuesta de Agente Peatón-Browniano

El tipo de agente que se selecciona para cumplir una tarea específica tiene que ver directamente con la modelación realizada en el sistema real. La arquitectura elegida, enmarca el diseño y es responsable de gran parte del resultado a la hora de dejar al agente en un ambiente para que realice la tarea que le es encomendada.

De acuerdo a la modelación que se plantea, una selección adecuada para nuestro *APB* es la de uno reactivo. Las razones:

- El agente tiene que ser capaz de percibir su entorno próximo y reaccionar rapidamente;
- La actuación no depende solamente de lo que perciba, también está involucrado el objetivo o meta, pero no se toman decisiones en base a creencias o resolución de formas lógicas;
- El actuar lleva un factor probabilista;
- A pesar de que el ambiente que habita es acotado, no es necesario que lo conozca;
- No tiene forma de comunicarse con otros *APB*'s más que con sus acciones.

Nuestro Agente Peatón-Browniano es un agente cargado con tres módulos de operación principales que controlan lo que puede ver, decidir y llevar a cabo.

El diagrama fundamental de la arquitectura de nuestro agente es como se observa en la Figura3.2. Se puede notar que un *APB* se encuentra situado en el ambiente, del cual percibe su entorno, toma una decisión en función de la percepción y reacciona.

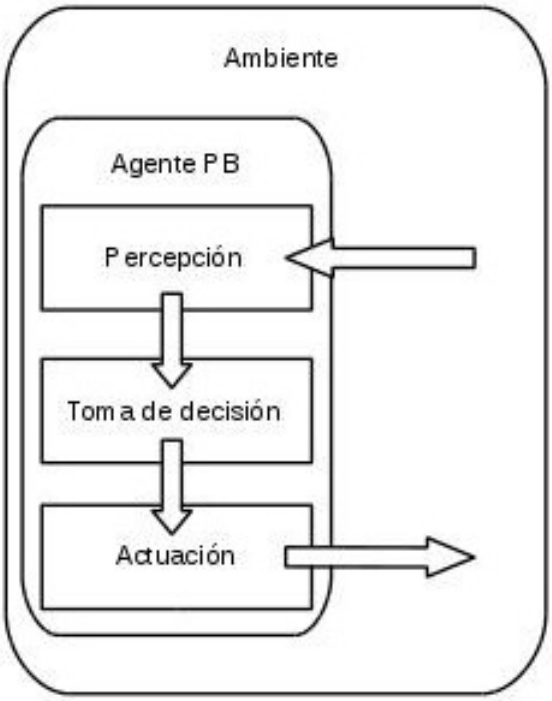


Figura 3.2: Diagrama fundamental del APB.

El APB lleva a cabo su proceso de caminado de la siguiente manera:

1. Percepción. Toma información de su zona de percepción. Toma información del medio próximo en la forma de propiocepción [2].

2. Toma de decisiones. Se decide cómo se verá afectada la velocidad del agente. Esto depende de las reglas de caminado que intervienen de acuerdo a lo percibido. El resultado obtenido a través de la propiocepción afecta la posibilidad de elegir un movimiento u otro, motivo por cual, el cambio en las velocidades no pueda ser determinado a priori.

3. Actuación. El agente lleva acabo las acciones de caminado dados los valores resultantes de la toma de decisiones.

[2]La palabra propiocepción deriva de sus raíces "propio-", que significa de uno mismo; y -cepción", que significa conciencia. Es decir, la consciencia de lo propio.
Percepción inconsciente de los movimientos y de la posición del cuerpo, independiente de la visión. (RAE)

Variables de Estado
Posición, r = (x, y, θ)
Dirección (θ)
Velocidad, v = (k, ω)
Longitud de paso (k)
Tamaño de giro (ω)
Zona de percepción (P)
Meta (a)
Fuerza, $\vec{F}_B$ = (x, y)

Figura 3.3: Variables de estado del APB.

Los módulos actúan modificando las variables de estado del agente, que se muestran en la Figura 3.3, mediante las cuáles se conoce la ubicación del APB en el ambiente, su dirección, la zona de percepción actual, los cambios en giro y longitud de paso.

3.2.1. Módulo de percepción

Este módulo tiene como objetivo, el poder ubicar espacialmente al agente, así como actualizar su información y la de su entorno inmediato.

Figura 3.4: Zonas **P** de Percepción. Todos los peatones tienen zonas de percepción en forma T.

En primer lugar, la capacidad de poder percibir que en su camino se encuentran otros peatones o paredes con las que pueda chocar al seguir transitando de frente,

es la que posibilita tomar una decisión sobre el siguiente paso. La información del campo visible es almacenada en **P** (Zona de percepción), Figura 3.4.

En segundo lugar se encuentra la capacidad de propiocepción. Tener conocimiento de su lugar en el espacio y cómo lo ocupa también es parte importante de las decisiones. Esto es, poder saber dónde se encuentra ($\vec{r} =$ **(x, y), posición**), qué tan rápido avanza (k, longitud de paso), cómo está orientado (θ, dirección) y en dónde se encuentra su meta (**a**), propiedades que todo peatón posee concientemente y que se encuentra en practicamente cualquier modelo peatonal. Algo que no todos los peatones tienen presente pero que realizan, es el evaluar su situación en el medio y cómo lo afectan, pero aún más importante, cómo los afecta.

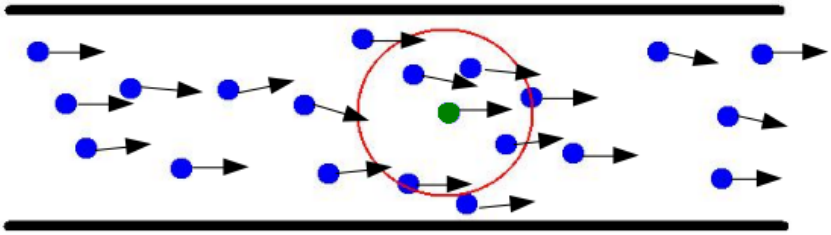


Figura 3.5: Agente peatón con peatones que comparten dirección con él dentro de su área de interacción.

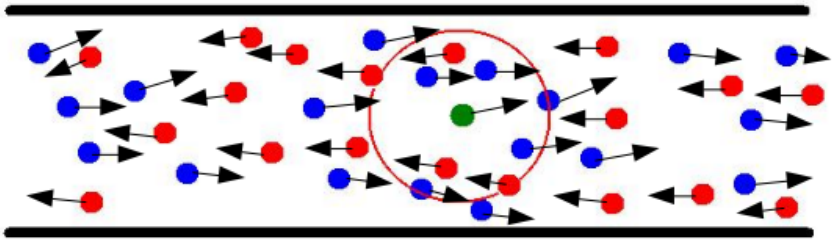


Figura 3.6: Agente peatón con peatones en flujo y contraflujo dentro de su área de interacción.

La tarea mencionada puede ser descrita como el cálculo aproximado que hace un peatón, de los peatones que lo rodean y la fuerza social [13] que aplican sobre

él, y cómo ésta provoca que se pueda elegir un próximo paso de forma lógica o de maneras no esperadas.

La manera en que se hace la aproximación de tal influencia, es revisando el área de interacción de los agentes. Por ejemplo, si el escenario se encuentra lleno de peatones que van en una sola dirección como en la Figura 3.5 y elegimos uno de ellos al azar, el cálculo de su zona de interacción nos dirá que la fuerza ejercida sobre él, lo empuja hacia adelante. Si por otro lado, lo que encontramos es una situación de contraflujo y de nuevo elegimos un peatón al azar, al calcular la fuerza sobre dicho peatón, veremos que lo empujará hacia su dirección u opondrá resistencia a que avance dependiendo de cuántos de los peatones dentro de su área de interacción vayan en su dirección, cuántos en contra de él y la magnitud de las fuerzas. En la Figura 3.6 se aprecia que los agentes peatones que van en la misma dirección que el agente de color verde, son más que los que van en contraflujo, entonces, en un caso así, es más probable que la fuerza existente en esa área de interacción empuje al peatón hacia adelante. La variable de estado que se ve afectada por el área de interacción de los agentes es el vector fuerza $\vec{F}_B$.

Al detenernos a analizar lo que sucede con el área de percepción y su función, se hace evidente que la fuerza ejercida sobre el agente peatón es análoga a la fuerza que actúa sobre una partícula browniana al ser golpeada por las partículas del fluido en el que se encuentra. Entonces, lo que se está proponiendo es un promedio local de las interacciones entre agentes peatones, de esta manera, tenemos Agentes Peatones-Brownianos.

Ahora bien, que tanto podemos decir que éstos agentes se comportan como partículas brownianas. De acuerdo al modelo que se está proponiendo, mientras menos agentes haya en el ambiente, menor es la probabilidad de que haya agentes dentro del área de interacción de algún otro, en éstos casos, el agente desarrollará en su mayoría, caminatas libres. Si por el contrario, la densidad de agentes aumenta,

habrá mayor número de peatones en las áreas de interacción y la influencia browniana aumentará.

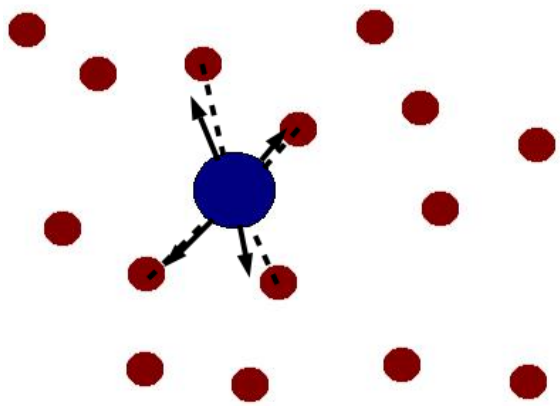


Figura 3.7: Las líneas punteadas son los vectores formados entre los agentes, y las flechas son los vectores de fuerza resultante.

Al tratarse de un modelo sobre peatones, la forma que tiene ésta influencia es de vectores que parten desde un agente hacia otro, como en la Figura 3.7, con una magnitud que decrece exponencialmente con la distancia. De nuevo, analizando detenidamente, lo que está ocurriendo es una influencia de tipo fuerza social, por la que cada peatón intenta mantener cierta distancia de los demás, tratando de conservar un área personal. Es por eso que se toma el modelo de decaimiento exponencial de [13], obteniendo el vector de la forma:

$$\vec{f_{ij}} = Ae^{-r_{ij}/B} \tag{3.10}$$

Para evaluar la fuerza resultante, se promedian las fuerzas, es decir, realizamos la suma de vectores de fuerza sobre un agente:

$$\vec{F_B} = \vec{f_{ib}} + \vec{f_{jb}} + ... + \vec{f_{nb}} \tag{3.11}$$

Con la suma de los vectores se computa el valor para el vector **Fuerza**. Al final lo que tenemos es la influencia browniana del medio hacia el agente en forma de

propiocepción sobre el área de interacción, en donde la fuerza de repulsión entre los agentes, responde a una función de decaimiento exponencial del mismo tipo que la fuerza de repulsión en el modelo de fuerza social.

Si bien, el modelo funciona, hay que hacer ciertos ajustes para que se representen peatones que interactúan no solo con otros peatones, sino también con un ambiente delimitado por paredes. En primer lugar, se retoma la idea de Helbing en [13], en donde se calcula la distancia r_{ij} de la siguiente manera, para interacción *peatón-peatón*:

$$2b = \sqrt{(\| \vec{r}_{\alpha\beta} \| + \| \vec{r}_{\alpha\beta} - v_\beta \Delta t \vec{e}_\beta \|)^2 - (v_\beta \Delta t)^2} \tag{3.12}$$

El valor de b en la ecuación 3.12, representa el eje semimenor de una elipse imaginaria trazada alrededor del peatón, dentro de la cual podría dar su siguiente paso. $\vec{r}_{\alpha\beta}$, es $\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta$. $v_\beta \Delta t$, es el tamaño de paso del peatón β. Y $\vec{e}_\beta$, es la dirección deseada del peatón β.

Para un peatón α, la dirección deseada se obtiene de la siguiente manera:

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\| \vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t) \|} \tag{3.13}$$

donde $\vec{r}_\alpha^k$, es el destino del peatón α, y $\vec{r}_\alpha(t)$, expresa la posición de α al tiempo t.

Se propone añadir al modelo [13], un factor que tome en cuenta el tipo de encuentro de acuerdo a las posiciones de los peatones en el corredor, esto es, si los peatones que rodean al *peatón browniano* en cuestión, se encuentran al frente o a su espalda, para que con una sola ecuación se simulen efecto de repulsión y

atracción, teniendo la siguiente ecuación:

$$\vec{f_{ij}} = \begin{cases} \text{agente browniano al frente,} & Ae^{-b/B} \cdot \cos \sphericalangle_{\alpha\beta} \\ \text{agente browniano a espaldas,} & Ae^{-b/B} \cdot -\cos \sphericalangle_{\alpha\beta} \end{cases}$$

(3.14)

Para el caso de interacción *peatón-pared*, el cálculo de distancia es solamente $\vec{r}_{ij}$, dejando la ecuación como en 3.10. Tampoco hay que hacer la consideración como en el caso *peatón-peatón* sobre como actuará la fuerza, ya que la interacción con paredes siempre tiene un efecto de repulsión.

Estas consideraciones de percepción tanto en **P**, como de la fuerza browniana representada por $\vec{F}_B$, dan paso a la elección de la mejor regla que el agente pueda efectuar y cómo la puede modificar respectivamente. Con tal información, la elección de regla y como la podría modificar, serán decisiones tomadas con la mejor información.

3.2.2. Módulo de toma de decisiones

El proceder a la toma de decisiones, tiene que ver directamente con la posición del agente en el ambiente, su orientación y los objetos que se encuentren dentro de su zona de percepción **P**.

Se han propuesto series de reglas que resuelven el caminado libre de peatones, que ha su vez buscan evitar colisiones con paredes y otros peatones. Aquí se trabaja tomando en cuenta el conjunto de reglas presentadas en [3].

Las reglas dan paso a poder elegir hacia dónde girar, $\omega = 45°$ si gira a la

izquierda o $\omega = -45°$ si gira a la derecha, y k, cuánto se avanzará . Se elige la regla que contempla el caso de la configuración actual del agente. La decisión de girar, avanzar, o girar y avanzar se realiza de manera probabilista pero dentro de las posibilidades que enmarca la regla seleccionada, repartiendo los pesos de probabilidad conforme estén libres las posiciones para avanzar.

La manera en que se afecta la preferencia de giro en la distribución de probabilidades se debe a dos factores. El primero, es la configuración específica de la zona de percepción del agente peatón, dígase la ocupación de **P**, ya que no basta con conocer el grupo de regla que se aplicará, sino también la regla precisa. El segundo factor, es dependiendo de la *influencia browniana* del medio cercano sobre el agente, esto es, calcular el efecto de la *fuerza browniana* en el agente peatón, que ahora es un APB (Agente Peatón-Browniano) o simplemente PB (Peatón-Browniano).

Los APB toman la decisión final para girar y avanzar de manera probabilista, por lo que de manera aleatoria se obtiene un número entre 1 y 100. La regla respetará un giro en dirección al rango de porcentaje al que pertenezca el número aleatorio, es decir, si el número cae en el rango perteneciente al giro a la izquierda, no girar o giro derecha, entonces, el giro será a la izquierda, nulo o derecha respectivamente.

Antes de revisar cómo la fuerza browniana $\vec{F}_B$ modifica las distribuciones de probabilidad, veamos cómo se pueden clasificar las reglas de caminado de los agentes peatones de acuerdo al tipo de encuentro que se registra en su zona de percepción **P**. Los posibles grupos de reglas son: *Caminado Libre* cuando no hay actividad dentro de la zona **P**, si se hallan peatones el tipo de regla es *Encuentro con Peatones*, pero si los obstáculos que se observan son paredes entonces se trata de *Camino Obstruido*, por último, si la situación involucra encuentro con peatones y pared, se toma alguna de las reglas en *Encuentros Combinados*.

Caminado Libre

Se conoce como *caminado libre* al tipo de caminata que desarrollan los peatones al transportarse en un ambiente donde tienen total libertad de movimiento y pueden efectuar giros por comodidad sin preocuparse por otros peatones. Éstas circunstancias se presentan cuando los peatones cuentan con suficiente espacio para caminar de forma tal que no es posible una colisión.

El grupo del tipo *Caminado Libre*, solo cuenta con una regla, que es seleccionada cuando ocurre la situación de la Figura 3.8.

Cuando se tiene la oportunidad de una caminata libre, no existen restricciones para seguir caminando ni efectuar algún giro. En dicho proceso siempre se optará por avanzar y solo queda resolver si el agente realizará un giro por comodidad.

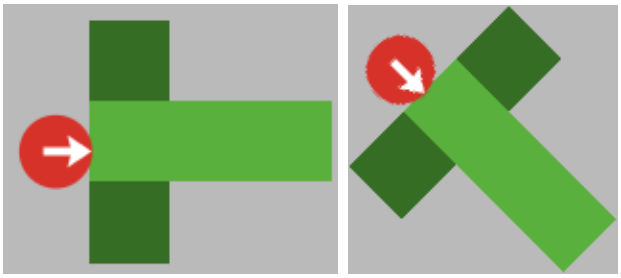


Figura 3.8: Zona **P** de percepción vacía. En ambas figuras se visualiza que no existen pared o peatones que obstruyan el paso, por lo tanto se puede efectuar una caminata libre.

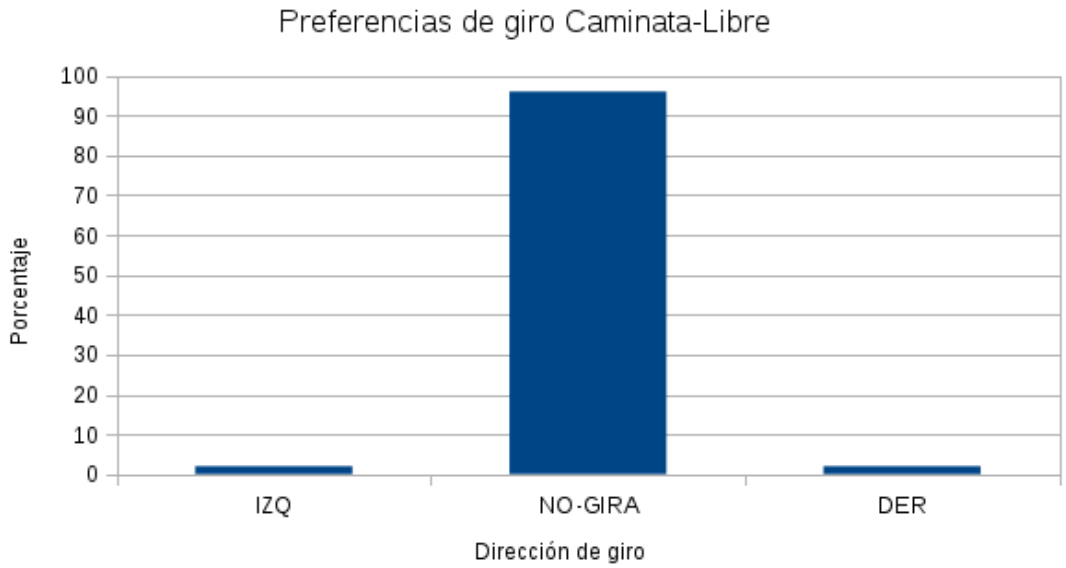


Figura 3.9: Distribución de probabilidad para giro desarrollando caminata libre.

Se propone la distribución de probabilidades de la Figura 3.9, en donde con 96 % se avanzará sin girar y hay posibilidad de giro de 2 % tanto a la izquierda como a la derecha. Así, un peatón en caminata libre tiende a dar pocos giros y avanza a su destino de forma más directa.

Si la desición de giro resulta en izquierda o derecha, se avanzará una unidad en la dirección electa. Por otro lado, un agente con un giro nulo $\omega = 0°$ o lo que es lo mismo, que no gira, avanzará $k = 1 + speed$, es decir, una unidad más una constante igual al tamaño de paso que se le asignó al agente al ser creado, ésta condición provocaría caminar a la máxima velocidad posible del agente.

La ejecución del *caminado* o *caminata libre* implica emplear la regla más simple de todas y tiene como consecuencia el mayor desplazamiento de los agentes peatones.

Encuentro con Peatones

En determinado momento de una caminata, ocurre que un peatón se encuentra con otro u otros. Se dice que hay *encuentros con peatones* en el instante que se tienen peatones dentro de la zona de percepción de otro, ya sea en flujo o contraflujo.

La distribución de probabilidades propuesta para estas situaciones, es la presentada en la Figura 3.10.

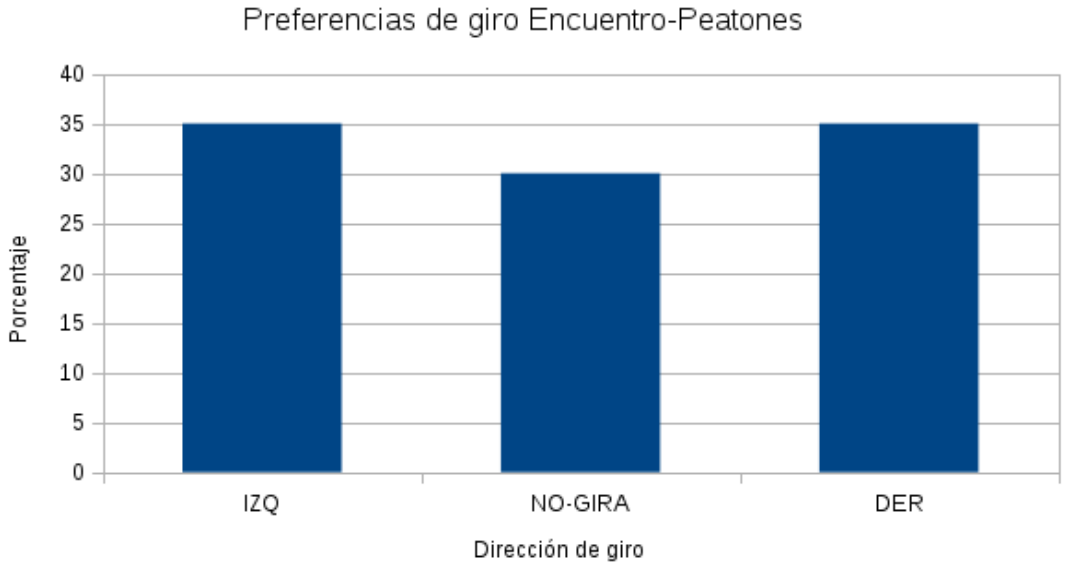


Figura 3.10: Distribución de probabilidad para giro cuando los agentes se enfrentan a una situación de encuentro con peatones.

Podemos listar diferentes configuraciones en las cuales existen encuentros con peatones, por ejemplo:

Encuentros frontales como en la Figura 3.11. Los escenarios pueden presentarse con peatones en flujo o contraflujo, pero lo más importante es la cercanía del encuentro.

Recordemos que los APB toman la decisión final de manera probabilista, de esta manera, si la distribución de probabilidades de la Figura 3.10 no se movió a causa de $\vec{F}_B$, el rango 1-35 pertenece a un giro a la izquierda, de 36-65 se mantiene la dirección actual ya que no hay giro y de 66-100 es un giro a la derecha.

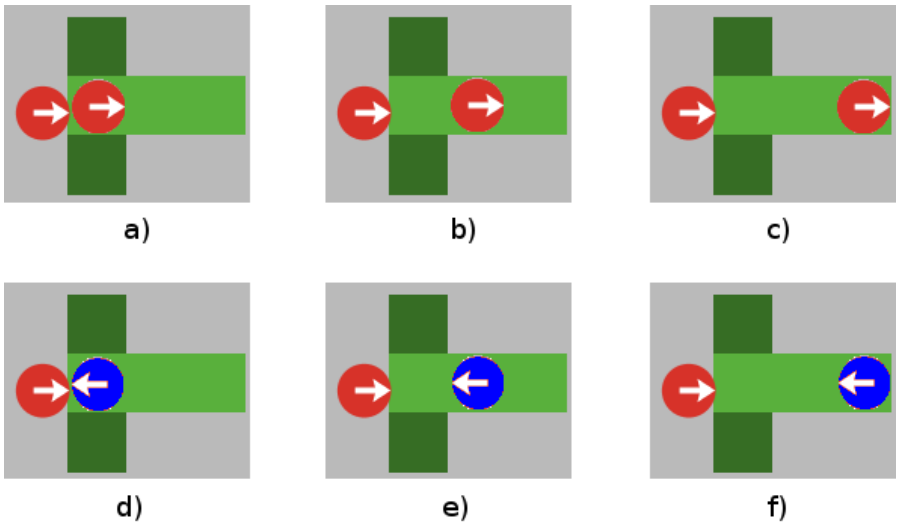


Figura 3.11: Diferentes configuraciones de encuentro con peatones. a), b) y c) en flujo. d), e) y f) en contraflujo.

Teniendo en cuenta la forma de selección final de regla, si se elige un giro a izquierda o derecha, éste será de 45° en esa dirección y un tamaño de paso k de 1. Por otro lado, cuando hay un giro nulo $\omega = 0°$, la dirección de los demás agentes es importante porque es un *encuentro frontal*. Si la situación es de flujo como en la Figura 3.11 *a)*, la regla dice que no se avanzará, pero si la configuración es *b)* o *c)*, el tamaño de paso es de $k = 1$.

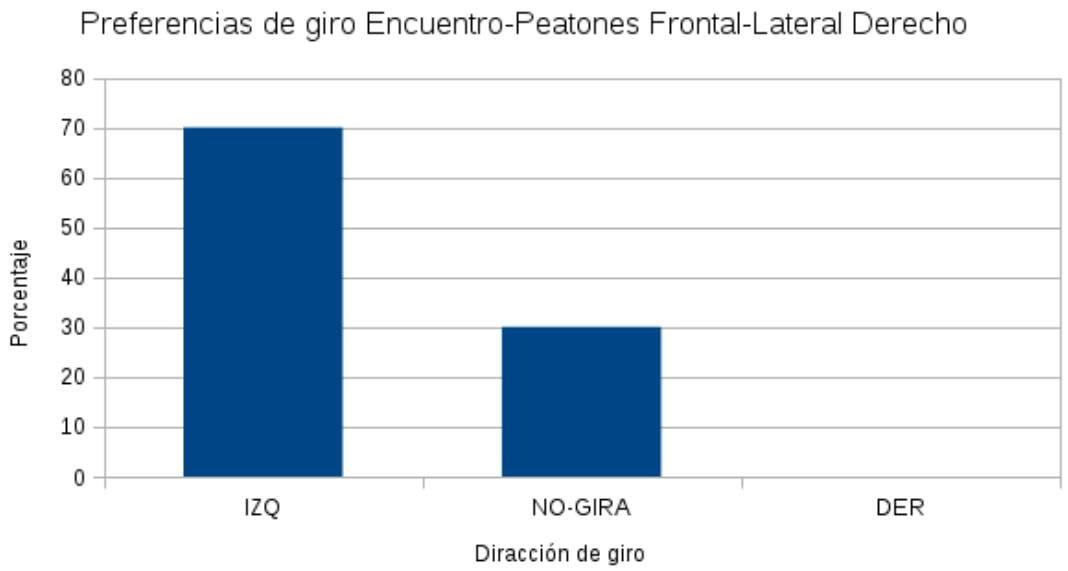
Tipo de encuentro	Giro izq	No giro	Giro der	Distancia del encuentro	Tamaño de paso
flujo	✓				1
flujo			✓		1
flujo		✓		> 1	1
flujo		✓		$= 1$	0
contraflujo	✓				1
contraflujo			✓		1
contraflujo		✓			0

Cuadro 3.1: Tamaños de paso dependiendo del giro y flujo en encuentros frontales con peatones. Situaciones de la Figura 3.11.

Por otro lado, las dispocisiones de agentes en contraflujo de la Figura 3.11 *d)*, *e)* y *f)* con decisión $\omega = 0°$ de no girar, resultan en una regla en la que no se avanza, el tamaño de paso es de $k = 0$, como se describe en el Cuadro 3.1, en la que se muestran los tamaños de paso dependiendo de la situación del agente en un *encuentro frontal*.

Los encuentros frontales con un lateral como los de la Figura 3.13 constan de un *encuentro frontal* a cualquier distancia dentro de **P** más un *encuentro lateral* con peaton al lado izquierdo o derecho. Dependiendo del lado en que se halle el peatón es cómo cambia la distribución de la Figura 3.10 en alguna de las distribuciones de la Figura 3.12.

De acuerdo al Cuadro 3.2 observamos que, si se toma la decisión de girar, no importa la configuración del *encuentro frontal-lateral*, la regla resulta en un giro $\omega = 45$ en dirección contraria al encuentro y un tamaño de paso $k = 1$. La situación cambia cuando se elige $\omega = 0°$, para que $k = 1$ se necesita que la distancia al encuentro frontal sea mayor a 1 y la configuración describa flujo, como en la Figura 3.13 *b)* y *c)*. Pero si $\omega = 0°$ y la configuración describe flujo a una distancia de 1 o contraflujo como en la Figura 3.13 *a)*, *d)*, *e)* y *f)*, entonces $k = 0$.



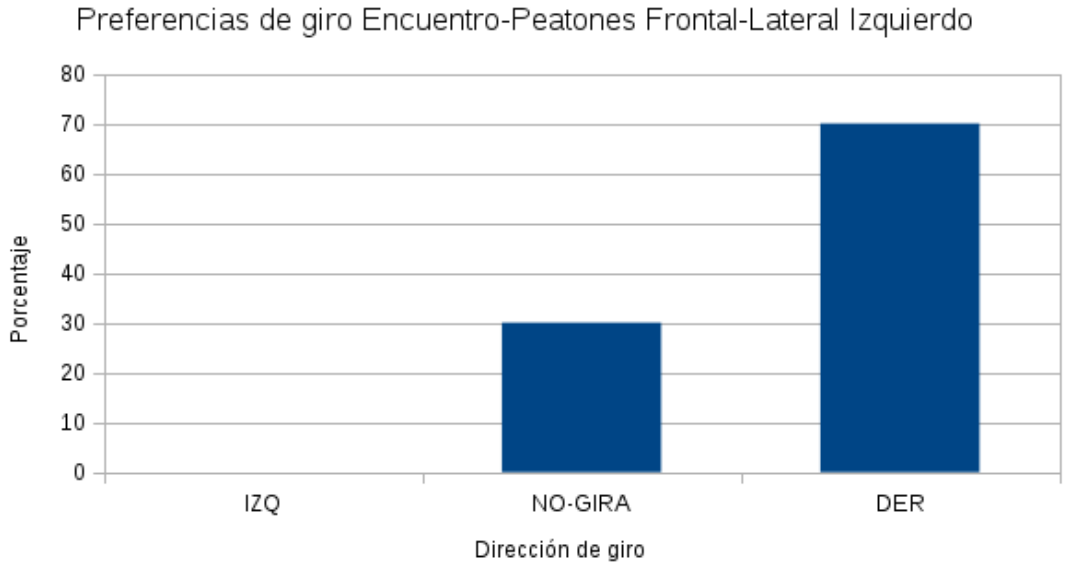


Figura 3.12: Distribuciones de probabilidad para configuraciones de encuentro frontal y lateral a la izquierda o derecha. En este tipo de encuentro, el lado libre recibe el porcentaje de giro que corresponde al lado ocupado.

Encuentro frontal	Girar	No girar	Dist. encuentro frontal	Tamaño de paso
flujo	✓			1
contraflujo	✓			1
flujo		✓	> 1	1
flujo		✓	$= 1$	0
contraflujo		✓		0

Cuadro 3.2: Tamaños de paso dependiendo del giro y configuraciones peatonales de la Figura 3.13.

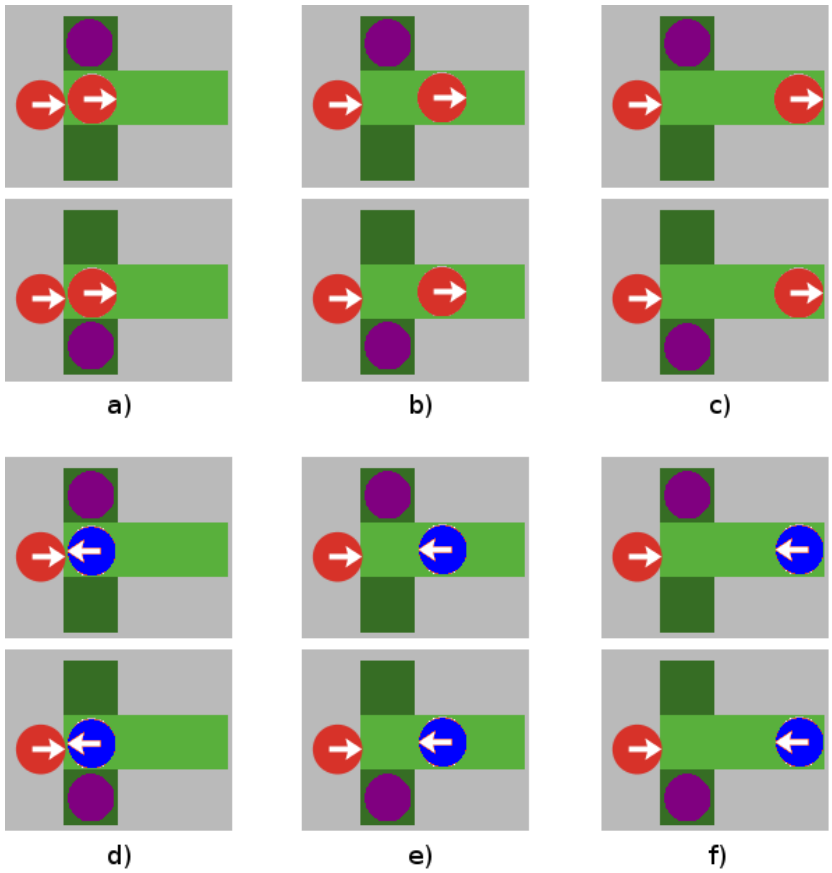


Figura 3.13: Configuraciones para las reglas de tipo Encuentros Frontales con 1 Lateral. En este grupo no importa la dirección de los peatones que ocupan un lugar lateral en **P**, ya que se ignora el espacio que no se puede ocupar.

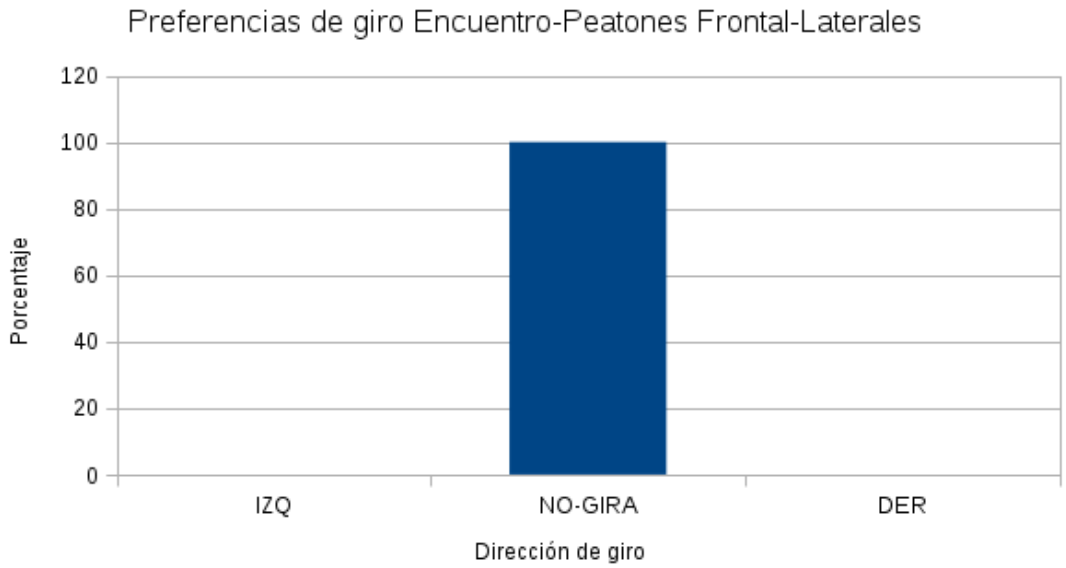


Figura 3.14: Cuando se da un encuentro con peatones en el que están ocupadas las dos opciones laterales, toda posibilidad de avanzar queda con un giro $\omega = 0°$.

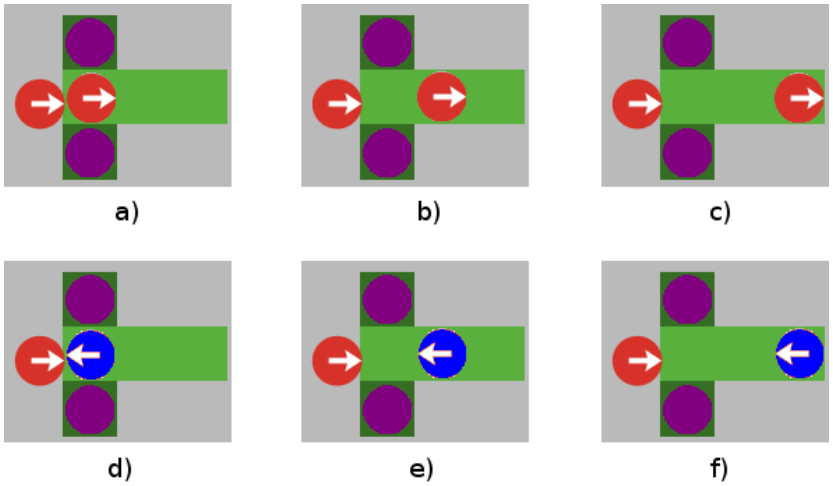


Figura 3.15: Posibles escenarios de encuentros con peatones de manera Frontal y Laterales.

Los encuentros frontal con laterales son el siguiente tipo de encuentro peatonal a considerar. Al revisar la distribución de la Figura 3.14 y la disposición de peatones en Figura 3.15 podemos notar que las únicas opciones para avanzar son cuando se presenta alguna de las situaciones de la Figura 3.15 *b)* o *c)*, en las cuáles se tiene espacio de al menos 1 unidad de separación del peatón en flujo más cercano, generando la regla de giro $\omega = 0°$ y tamaño de paso $k = 1$. Ahora bien, si el agente está a distancia 1 de otro agente peatón en flujo o a cualquier distancia en contraflujo como en la Figura 3.15 *a)*, *d)*, *e)* y *f)*, la regla es $\omega = 0°$ y $k = 0$, es decir, el agente no avanzará. El Cuadro 3.3 describe dichas reglas.

Encuentro frontal	No girar	Dist. encuentro frontal	Tamaño de paso
flujo	✓	> 1	1
flujo	✓	$= 1$	0
contraflujo	✓		0

Cuadro 3.3: Tamaños de paso según las configuraciones peatonales de la Figura 3.15. Para éstas nunca se gira.

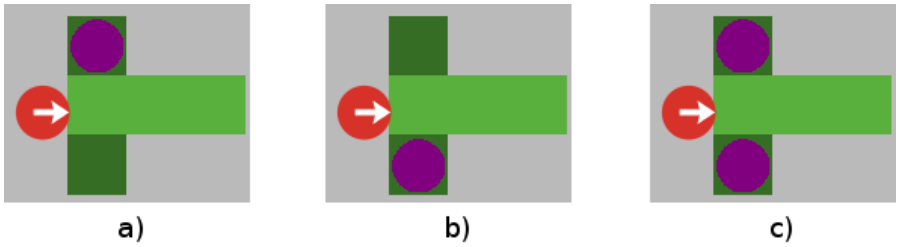


Figura 3.16: Escenarios de encuentros con peatones sin encuentro frontal.

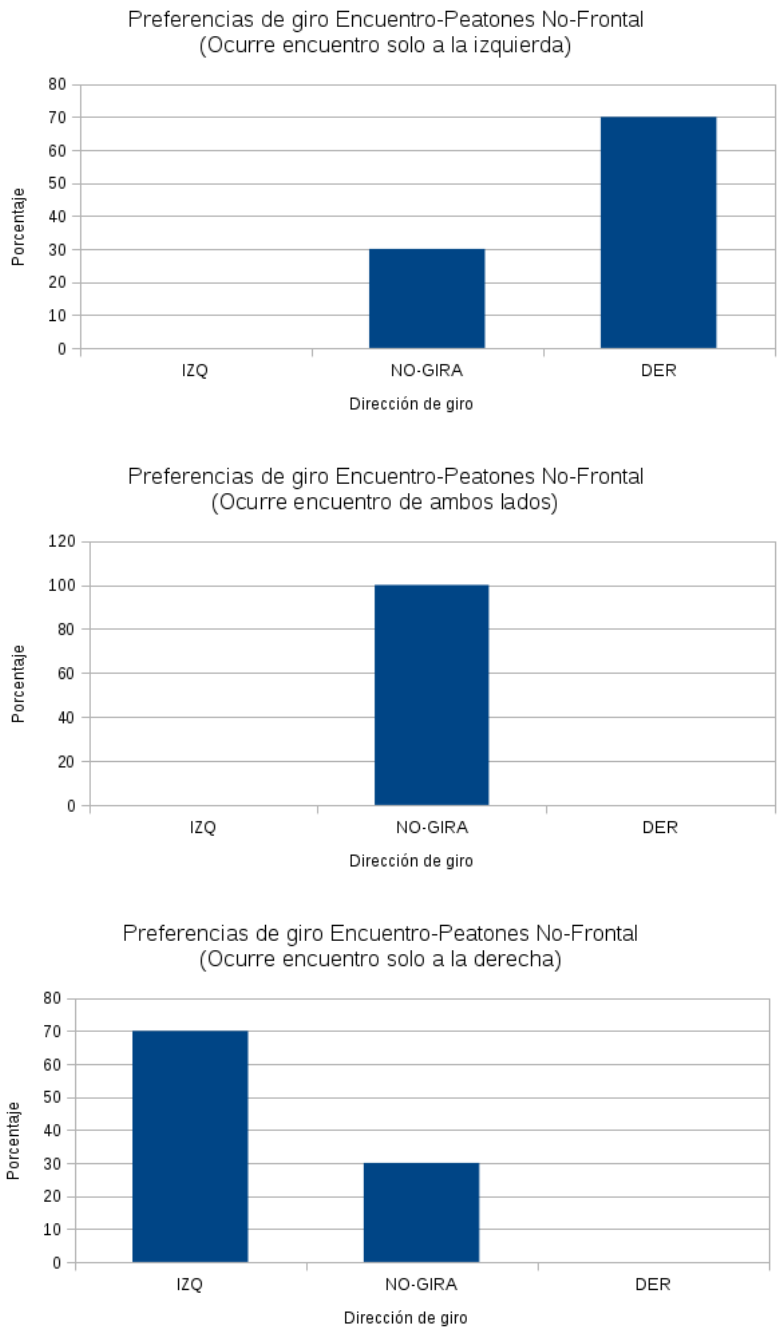


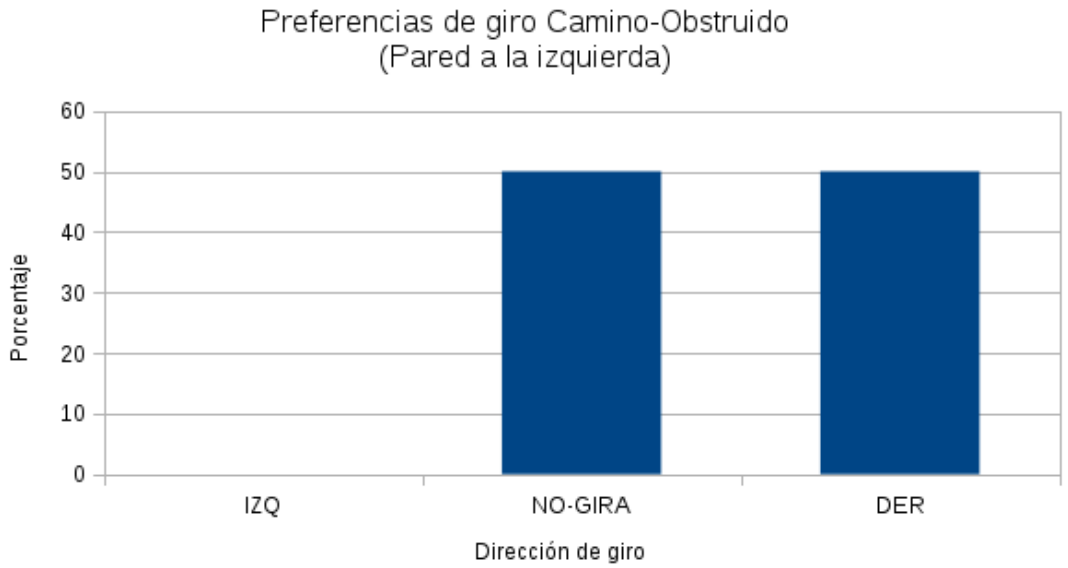
Figura 3.17: Distribuciones para escenarios en los que puede haber encuentro lateral a la izquierda, derecha o ambos, pero sin encuentro frontal.

Son los encuentros laterales sin frontal los últimos del grupo *encuentro con peatones*. Las reglas de este tipo son provocadas por situaciones con peatón a la izquierda, derecha o en ambos lados de la zona P de percepción, pero sin algún encuentro al frente. Los momentos en que se tiene un solo encuentro lateral como en la Figura 3.16 *a)* y *b)*, son los que pueden elegir girar, teniendo alta probabilidad de que se seleccione la acción, ya que adquieren todo el porcentaje de posible giro, dígase 70 %. Tal comportamiento se observa en la primera y tercera distribuciones de la Figura 3.17. En el Cuadro 3.4 notamos que al decidir efectuar un giro, se tiene una regla $\omega = 45°$ hacia el lado opuesto de encuentro lateral (ω para giro a la izquierda y $-\omega$ para giro a la derecha), con tamaño de paso $k = 1$. Si se tiene un solo encuentro lateral pero se eligió no girar o hay dos encuentros laterales como en la Figura 3.16 *c)*, la regla queda como $\omega = 0°$ y $k = 1 + speed$.

Girar	No girar	Tamaño de paso
✓		1
	✓	1 + speed

Cuadro 3.4: En estos encuentros con peatones, se eliminan el tipo de encuentro frontal ya que es inexistente, así como la distancia al encuentro.

Con la regla anterior terminamos de listar las posibles decisiones para *encuentros con peatones*. Las configuraciones anteriores muestran a los APB's orientados hacia la derecha y completamente rectos, pero las reglas funcionan también en APB's que caminan de derecha a izquierda, así como en situaciones en las que tienen una dirección de colisión contra paredes, como en la imagen derecha de la Figura 3.8. En ésta imagen no se percibe una pared en la zona **P**, pero de continuar con esa dirección se podría presentar. Son escenarios en los que agentes se encuentran con pared los que consideramos a continuación.



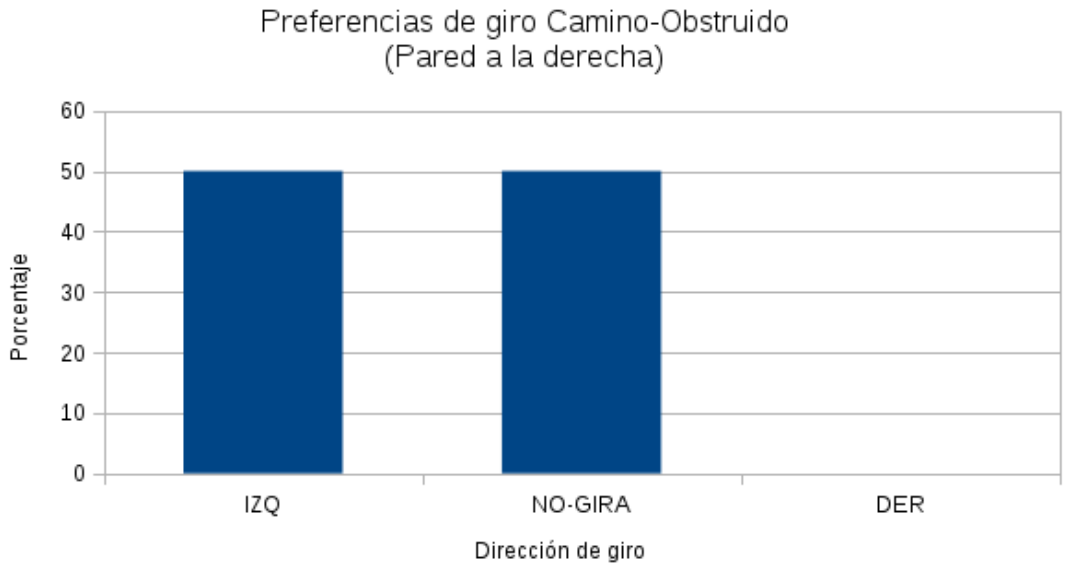


Figura 3.18: Distribuciones donde los agentes tienen bloqueado algún lado de su zona **P** con una pared.

Camino obstruido

La probabilidad de que un peatón efectúe un giro para evitar contacto con otro peatón, es diferente que para evitar contacto con una pared. Ya que una pared no se mueve, al encontrarse con una, se gira con una probabilidad menor que si se encuentra con otro peatón. Las distribuciones de la Figura 3.18 pertenecen a situaciones en que el agente peatón se encuentra con pared a la izquierda o a la derecha, respectivamente. Cuando ésto ocurre, un agente tiene la posibilidad de seguir caminando de frente o girar al lado contrario de la pared con un 50 % para cada decisión.

En el Cuadro 3.5 se describe el resultado en tamaño de paso para las decisiones de giro cuando un agente se encuentra en las situaciones de la Figura 3.19. Las decisiones de giro cuando se tiene pared a la izquierda provienen de los casos *a)* y *d)*, y *b)* y *c)* cuando la pared está a la derecha.

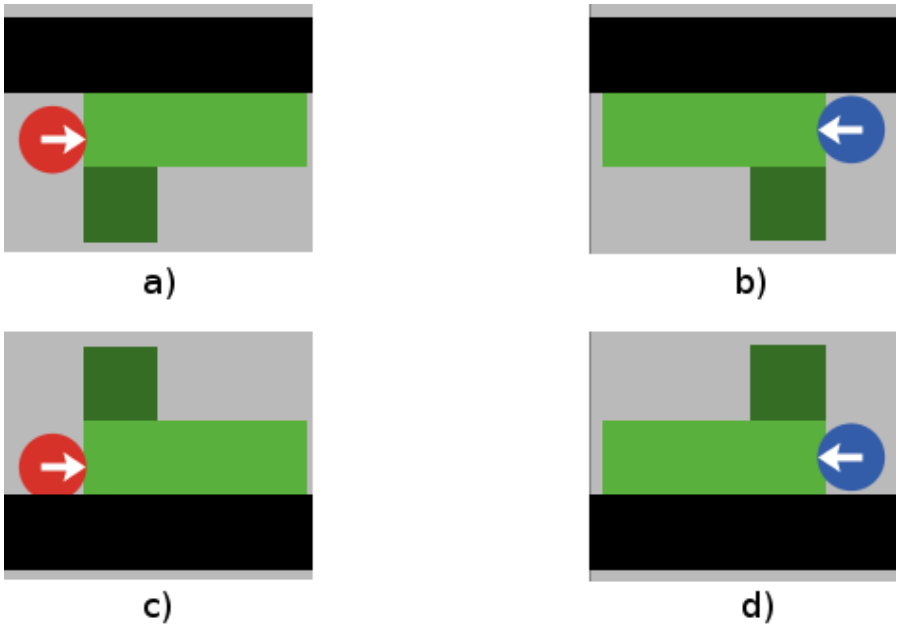


Figura 3.19: APB que caminan de izquierda a derecha (rojos) y de derecha a izquierda (azules) en situación de camino obstruido por pared.

Pared a la izquierda	Pared a la derecha	Girar	No girar	Tamaño de paso
✓		✓		1
	✓	✓		1
✓			✓	1 + speed
	✓		✓	1 + speed

Cuadro 3.5: Tamaños de paso para situaciones donde los agentes observan pared en algún lado de su zona **P**.

Una configuración a tomar en cuenta dentro del grupo *camino obstruido* es si el encuentro con pared es frontal. De ser así, y la desición seleccionada aleatoriamente es de no girar, un agente puede avanzar solo en los casos de la Figura 3.20 *a)* y *b)*, en los que la distancia a la pared es mayor a 1, y el agente avanzará solamente 1 unidad.

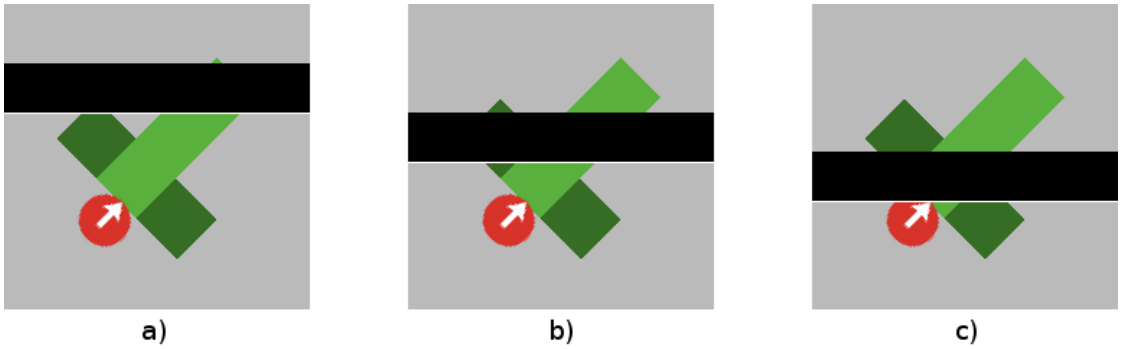


Figura 3.20: APB en trayectoria de colisión con pared.

Los mencionados casos son los únicos dentro del grupo *camino obstruido*, dando paso al último grupo de configuraciones que comparten preferencias en giro.

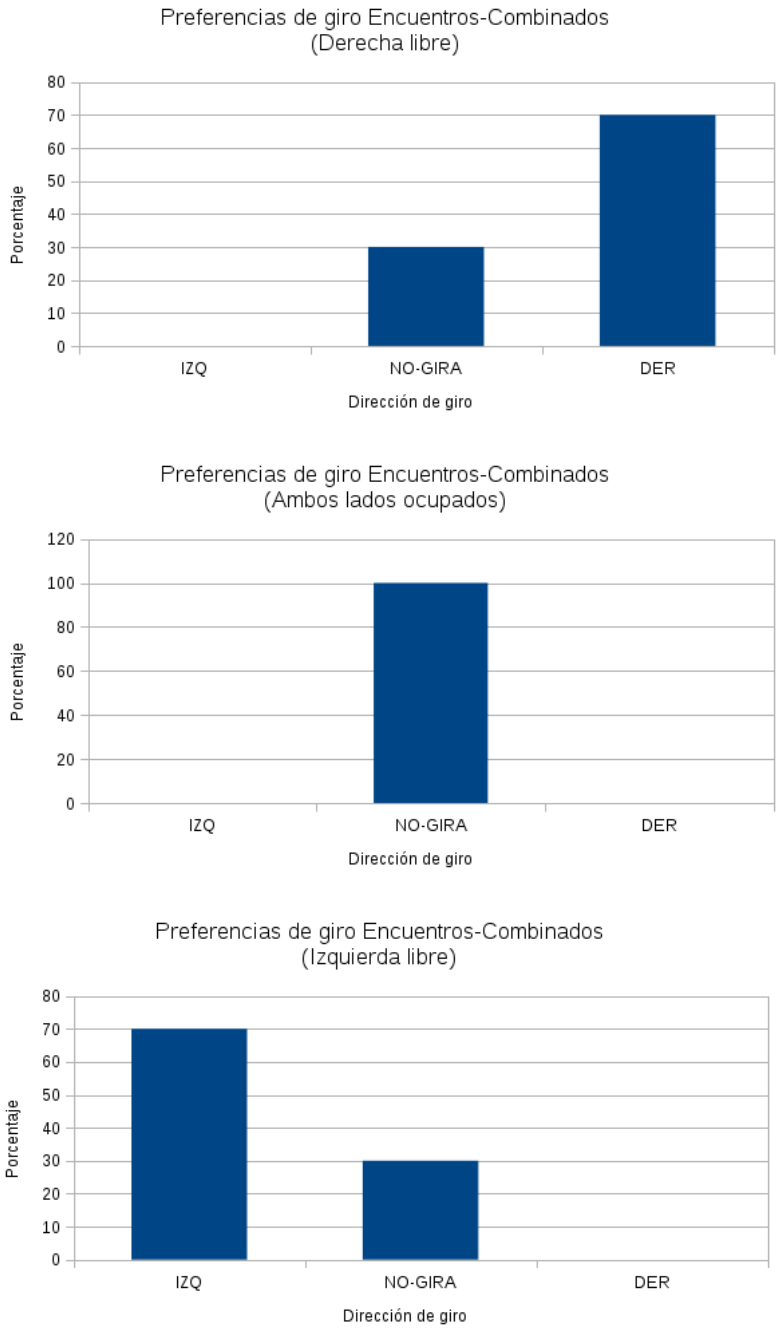


Figura 3.21: Distribuciones para encuentros combinados de pared y agentes. En la primera distribución, las disposiciones en la zona **P** tienen pared del lado izquierdo y el derecho libre. La segunda contempla situaciones en las que hay pared de algún lado y agente del otro. Y en la tercera distribución la pared está del lado derecho y el lado izquierdo no está ocupado.

Encuentros Combinados

La clase de configuraciones *encuentros combinados*, son escenarios en los que tanto peatones y pared están dispuestos dentro de la zona P de un agente.

Al llegar un APB a una disposición de tal estilo en su zona **P**, tiene que considerar primero si el encuentro con pared es frontal o lateral. Si se trata de un encuetro frontal, solamente puede dar un paso si es que la pared se está a una distancia de más de una unidad de él.

Si el agente se localiza junto a la pared, de manera que está orientado de forma paralela a ésta, entonces se tiene que tomar en cuenta si su otro lado está ocupado por algún agente o se encuentra libre, como los casos de las distribuciones de la Figura 3.21. Si el otro lado está libre, la decisión puede ser girar con 70 % o seguir adelante con 30 %. Pero si ambos lados están ocupados, uno por pared y otro por agente, solamente queda ir hacia adelante. Para poder avanzar al frente, la situación debe ser sin agentes al frente o con agentes al frente en flujo y que se encuentren a una distancia de más de 1 unidad.

Pared al frente	Pared a un lado	Lateral ocupado	Girar	No girar	Dist. encuentro frontal	Tamaño de paso
✓				✓	> 1	1
✓				✓	$= 1$	0
	✓		✓			1
	✓			✓	> 1	1
	✓			✓	$= 1$	0
	✓	✓		✓	> 1	1
	✓	✓		✓	$= 1$	0

Cuadro 3.6: Tamaños de paso para situaciones donde un agente observa pared y también hay agentes dentro de su zona **P**.

En todos los casos de *encuentros combinados*, de poder avanzar, es solo $k = 1$, y si la decisión incluye giro, este depende del espacio libre, $\omega = -45°$ en caso de

que la pared esté a la izquierda o $\omega = 45°$ si está a la derecha. Lo dicho, se puede analizar en el Cuadro 3.6, que resume las distintas distribuciones para los casos de *encuentros combinados* expuestos en la Figura 3.22.

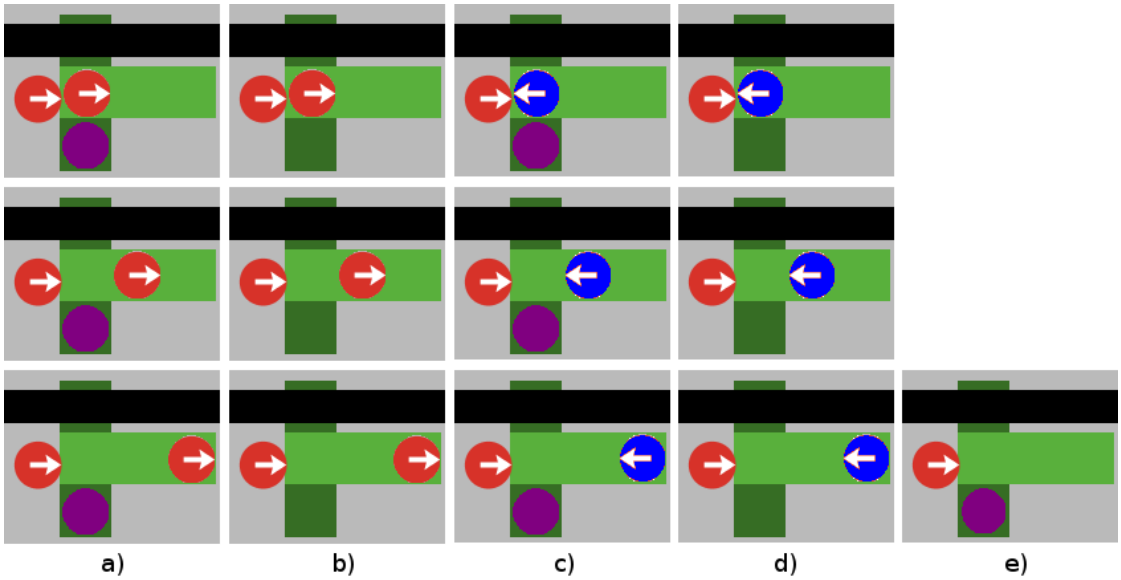


Figura 3.22: Posibles distribuciones de peatones y pared en la zona de percepción **P**. Se muestran las configuraciones para agentes que caminan de izquierda a derecha con pared a la izquierda, pero los escenarios son análogos para cuando la pared está del lado derecho y de igual manera para agentes que caminan de derecha a izquierda.

Con las reglas derivadas de las anteriores situaciones se termina de listar las posibles opciones de un agente al caminar. Tales reglas se han clasificado como *caminado libre*, *encuentro con peatones*, *camino obstruido* y *encuentros combinados*.

El proceso que sigue un agente para caminar comienza con la *percepción*, en la que identifica su ambiente próximo, en primer lugar la ocupación de la zona **P** y en segundo la capacidad de propiocepción que ubica al agente en el ambiente

y cómo lo afecta independientemente de **P**. Utilizamos **P** para seleccionar una regla con cierta distribución de probabilidad de acuerdo a la ocupación de su zona de percepción y alcance. A continuación se explica como es que la capacidad de propiocepción aporta una *influencia browniana* al modelo.

Influencia browniana

Hecha la elección de regla a aplicar, se realiza el cálculo de un factor browniano, producto de la posición de agentes dentro de un área de interacción, y él cuál modifica los pesos de probabilidad asignados a los posibles movimientos de la regla seleccionada. El cambio es indicado por el vector $\vec{F_b}$, por ejemplo, si tiene la misma dirección que el agente, entonces se beneficia con mayor probabilidad de avanzar hacia su meta. Si la dirección de $\vec{F_b}$ es contraria, provoca dar pasos cortos o posiblemente una pausa en la caminata.

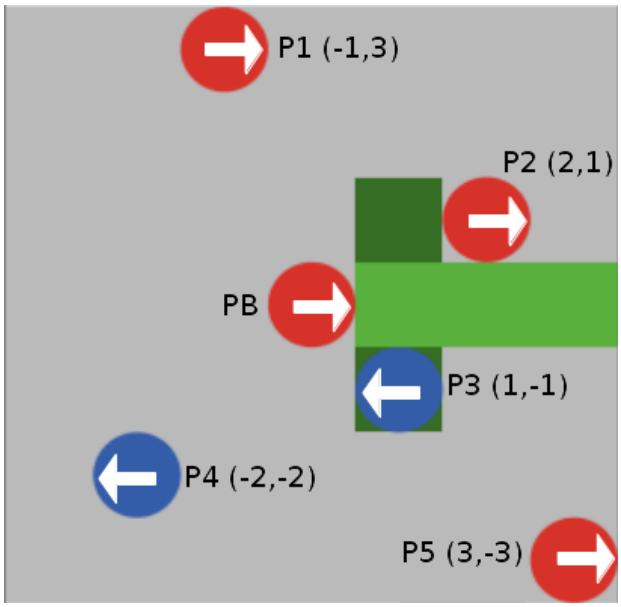


Figura 3.23: Agente que funge como PB y los agentes que se encuentran dentro de su área de interacción.

Para calcular la *influencia browniana*, primero se debe identificar el área de interacción del agente, supongamos una superficie de radio 3 para el siguiente ejemplo. Lo que interesa es medir la distancia que hay entre los agentes dentro del área de interacción y el agente al que se le calcula la *influencia browniana*.

Observemos a los agentes y sus posiciones relativas al agente PB de la Figura 3.23. Lo primero que se hace es calcular las distancias de cada agente al PB, en nuestro caso son:

$$dist.P1 - PB = 3{,}162277$$

$$dist.P2 - PB = 2{,}236067$$

$$dist.P3 - PB = 1{,}414213$$

$$dist.P4 - PB = 2{,}828427$$

$$dist.P5 - PB = 4{,}242640$$

Ahora, utilizando las ecuaciones 3.12 3.13 3.2.1, calculamos la dirección deseada de los agentes *P1*, *P2*, *P3*, *P4* y *P5*, suponiendo que el PB se ubica al la mitad del camino, habiendo metas a 17 y -17 unidades de distancia. Para A y B de la ecuación 3.2.1 se toman los valores 2,1 y 1,5 respectivamente, estos valores se fijaron para el ejemplo dadas diversas simulaciones. Para tener la fuerza con la que se empuja al PB se suman los vectores de las fuerzas de repulsión y atracción de cada par de interacciones:

$$\vec{F}_B = \vec{f}_{1b} + \vec{f}_{2b} + \vec{f}_{3b} + \vec{f}_{4b} + \vec{f}_{5b}$$

$$\vec{F}_B = (0{,}087490, -0{,}262472) + (0{,}320478, 0{,}160239) + (-0{,}713842, 0{,}713842)$$
$$+(-0{,}178488, -0{,}178488) + (0{,}069430, -0{,}069430)$$

$$\vec{F}_B = (-0{,}414931, 0{,}363691)$$

Una vez que tenemos la fuerza browniana, se calcula la magnitud, para el vector $\vec{F}_B$ que acabamos de obtener, la magnitud es de 0,551760.

Conociendo el $\vec{F}_B$ y su magnitud, se puede realizar un balance de pesos para las probabilidades de giro. El agente de interés en la Figura 3.23 tiene una ocupación en su zona **P** que pertenece al grupo de *encuentros con peatones - lateral sin frontal* en donde las preferencias de giro son 70 % para girar a la izquierda y 30 % para seguir de frente.

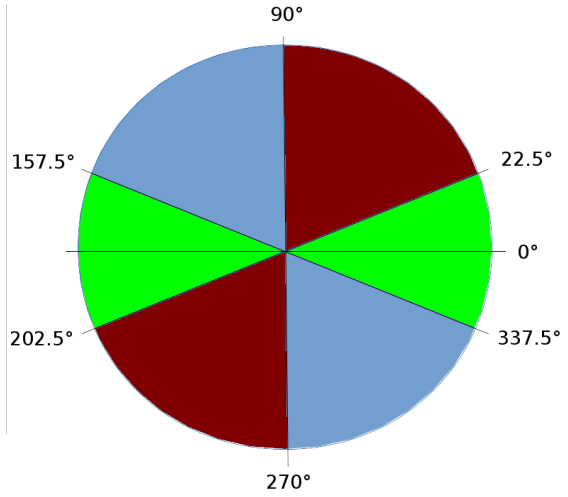


Figura 3.24: Regiones que indican la dirección en que la fuerza browniana empuja un agente. Cualquier vector con ángulo dentro de la zona verde (entre 22.5 y 337.5) empuja hacia adelante (si el peatón es rojo), en la zona marrón (> 22.5 y <=90) hacia la izquierda y en la zona azul (>270 y <=337.5) hacia la derecha.

La manera en que la *influencia browniana* afecta los pesos de preferencia de giro, depende de su magnitud y la dirección en la que empuja. El agente del caso

que tratamos es un peatón que camina de izquierda a derecha, la fuerza browniana empuja a nuestro agente hacia su parte trasera izquierda, invadiendo la parte azul izquierda del diagrama en la Figura 3.24, con un ángulo de 138.7651°. Ya que los AP no caminan hacia atrás ni regresan, se da beneficio al giro a la izquierda. La proporción en que se ve beneficiado el giro a la izquierda es por la magnitud, que corresponde a quitar un 60 % del total de las demás preferencias. La nueva distribución para la configuración del ejemplo de la Figura 3.23 es la mostrada en la Figura 3.25.

Figura 3.25: Distribución para una configuración de encuentro con peatones - lateral sin frontal, después de tomar en cuenta la influencia browniana.

Al realizar el cambio de distribuciones para la preferencia de giro tomando en cuenta la influencia browniana, el agente pasa de ser un AP a un APB. Es importante recordar que el modelo se realiza para un solo agente, funciona en todos y cada uno de los agentes que se generen en experimentos, por lo que no se tiene un solo AGP rodeado de agentes peatones que no toman en cuenta el factor

browniano, si no que todos y cada uno de los agentes toman el papel de APB al momento de tomar la desición de avanzar.

3.2.3. Módulo de actuación

Se trata del módulo que lleva a cabo las decisiones que se han tomado. El objetivo es, ya que el módulo de toma de decisiones haya dado nuevos valores a las variables de estado que controlan el tamaño de giro y largo del paso, díganse ω y k, y se tenga una nueva velocidad para el agente, entonces el módulo de actuación efectúe la actualización de su posición.

La posición se actualiza de la siguiente manera:

$$\vec{r}_b(t+\tau) = \vec{r}_b(t) + \vec{v}_b(t+\tau)\tau \tag{3.15}$$

en donde:

$$\vec{v}_b(t+\tau) = \vec{v}_t + k_b(t)|\Delta\theta_b(t)/\tau|\vec{u}_b(t) \tag{3.16}$$

donde $\vec{u}_b(t)$ es un vector unitario respecto a $d\theta_b/dt$.

Así, después de que los tres módulos han tomado lugar dentro de un lapso de tiempo τ, todos los agentes han dado un nuevo paso. Una simulación puede mostrar como los agentes efectúan su caminata.

Capítulo 4

Experimentos y Resultados

El objetivo principal del estudio de tráfico peatonal es poder identificar procesos aleatorios emergentes que se enmarquen dentro de los sistemas complejos.

Es muy bien sabido, que el estudio de sistemas biólogicos ha dado paso a la creación de algoritmos inspirados en conductas propias de dichos sistemas complejos, como es el caso de los algoritmos de colonia de hormigas o parvadas.

El representar peatones como agentes, en nuestro caso APB, y conseguir llevarlos a un ambiente de simulación, es lo que se necesita para poder realizar observaciones y mediciones que concedan información suficiente para dicernir si se ha alcanzado la correcta modelación del objeto de estudio. De ser así, el sistema se puede volver inspirador y obtener a partir de él un algoritmo bioinspirado, que podría entre otras cosas llevarse a la inteligencia artificial colaborativa. A continuación se presenta el sistema de simulación desarrollado.

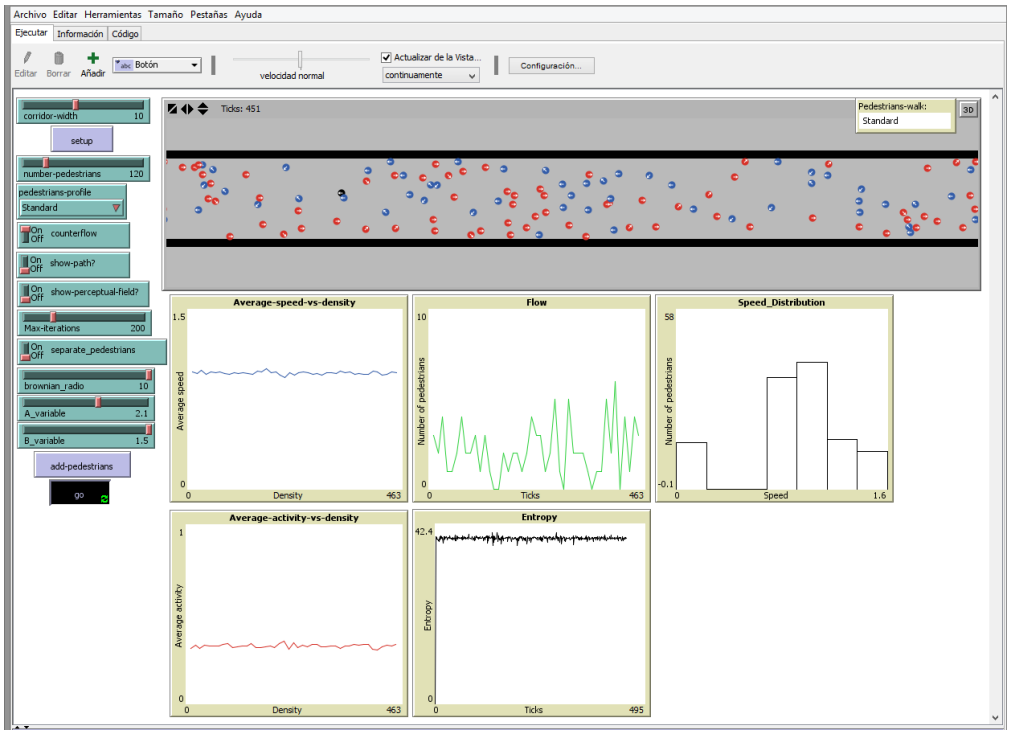


Figura 4.1: Sistema Multi-Agente utilizado para las simulaciones de los APB.

4.1. Simulador peatonal

La forma de llevar a cabo los experimentos, es a través de un Sistema Multi-Agente, MAS (por sus siglas en inglés). Ya que la modelación de peatones se elaboró pensando en agentes que tomarían tal condición, el colocar más de uno de ellos en el mismo ambiente para que realicen la tarea encomendada (caminar), implica la producción del fenómeno de tráfico peatonal.

El MAS que se desarrolló, es un entorno que cuenta con un pasillo, la opción de elegir la amplitud de éste, la cantidad de APB en la simulación, si los peatones estarán en contraflujo, mostrar las caminatas, zona de percepción, si los peatones en contraflujo comenzarán en grupos separados, el tamaño de radio browniano y los valores para las variables A y B de la ecuación de repulsión/atracción. Además

se pueden apreciar histogramas con la velocidad promedio alcanzada por los APB, de actividad, flujo, entropía y las distribuciones de velocidad, como se muestra en la Figura 4.1.

Los diagramas del simulador representan:

Diagrama fundamental. O diagrama de *velocidad vs densidad*, es una de las formas más directas de observar cómo evoluciona el sistema. Dependiendo de la velocidad promedio de los peatones, en uno de estos diagramas se puede observar si el grupo se mueve con fluidés o hay situaciones que frenan a los peatones. Cada registro se calcula como *vel.promedio/num.peatones*

Si el diagrama muestra incremento en la velocidad promedio, quiere decir que el sistema peatonal evoluciona para bien. Cuando las condiciones son idóneas para el caminado, en el diagrama se observa que en determinado momento la velocidad promedio no incrementa y tampoco disminuye; o bien, varía en un rango muy pequeño de velocidades.

Por otro lado, si se presenta un constante decremento en la velocidad promedio, quiere decir que el sistema está teniendo problemas para funcionar adecuadamente. Esto se debe principalmente a un aumento de densidad en el ambiente, es decir, incrementó el número de APB por unidad de espacio.

Diagrama de actividad. Junto con el *diagrama fundamental* son los gráficos más básicos para la observación de un sistema como el peatonal. Mientras el *diagrama fundamental* presenta datos extraídos por un observador externo, el *diagrama de actividad* se logra con información de cada uno de los APB, en éste caso, agentes que proveen información sobre la ocupación de su zona **P** de percepción. Para calcular la actividad promedio se hace,

act.promedio/num.peatones. La actividad representa el número de movimientos prohibidos debido a la ocupación de la zona **P**. Las gráficas de los *diagramas de actividad* son casi simétricos a los *fundamentales*.

Entropía. Se utiliza para medir la heterogeneidad con respecto a los movimientos de los APB. Tal heterogeneidad se vé reflejada en las diferentes velocidades de los agentes. Nos interesa la velocidad en la componente x del vector, que es la que indica cuánto se acerca el agente peatón a su meta.

Se vé a la *entropía* como efecto del ambiente sobre el caminado. Tomando como ambiente el escenario, paredes, ocupación de la zona de percepción **P** y distribución de otros APB en la zona de influencia browniana. Dicho ambiente es local, es decir, cada APB tiene uno diferente al de los demás.

En el caso de nuestro sistema peatonal, la *gráfica de entropía* sugiere, por una parte una medida de desorden en el sistema, díganse los giros por comodidad o evasión. Por otro lado, señala información sobre el estado de los APB.

Se calcula la entropía de la siguiente manera:

$$-\sum \ln(P(vel_x))P(vel_x)$$

La variación de la entropía en el tiempo también es útil para poder argumentar la formación de patrones espaciales emergentes.

Son las gráficas de *entropía* y *diagrama fundamental* en las que se reflejan mayormente las transiciones de fase y en las que se puede evaluar con mayor certeza que el sistema llega a estados críticos. Si se conoce a qué densidad se alcanza el estado crítico del sistema, se tiene una mejor concepción del desempeño del mismo.

Diagrama de flujo. Es una forma de conocer la calidad del tráfico en función de la cantidad de APB's que salen del pasillo por unidad de tiempo, $peatonessalientes/\tau$.

Distribución de velocidades. Es un histograma de clases de velocidades. Cada clase abarca un rango de velocidades. Describe cómo se comportan los APB y en él se aprecia qué velocidades son las más probables en cada instante de tiempo.

En el MAS se tiene implementado el sistema de reglas que le permite a los APB caminar y evadir colisiones, así como la evaluación del factor browniano.

Para la simulación se tomaron consideraciones respecto a las variables A y B. En el simulador se pueden manipular los valores de las variables para el caso exclusivo de interacción con peatones. Cuando la interacción a evaluar es con un pared, A y B tienen los valores fijos de 10 y 0.2 respectivamente, como se propone en [13].

4.2. Simulaciones

Los experimentos que se llevaron a cabo fueron diseñados para conocer el desempeño de los APB y su evolución como conglomerado peatonal. El sistema multiagente se trabajó a diferentes densidades y con diferentes configuraciones iniciales. El objetivo de realizar simulaciones con distintas preferencias iniciales, fue detectar los comportamientos emergentes que se pueden presentar para distintas situaciones.

El primer tipo de experimentos consta de simulaciones realizadas con dos modelos. Uno es el desarrollado en este trabajo y el otro es el propuesto en [3], al

que nos referiremos como Ballinas et.al. El trabajo citado cuenta con las reglas de caminado en las que se basan las reglas que tienen implementados nuestros APB. Al igual que nuestro sistema, la desición final de los agentes de dicho modelo, se toma en base a distribuciones de probabilidad para casos específicos. En su caso, las reglas de caminado están dadas solamente por lo que los agentes puedan observar en su zona de percepción.

Ambos sistemas se trabajaron con configuraciones idénticas en sus parámetros, tomando lo propuesto por el sitema anterior para iniciar los experimentos.

Ambos sistemas multiagentes se configuraron de la siguiente manera al iniciar las simulaciones:

- Ancho del corredor de 11 unidades;
- Largo del corredor de 100 unidades;
- Corredor cíclico;
- Los peatones a representar son peatones estándar;
- La situación es en contraflujo (por lo que hay dos tipos de peatones, los que caminan de izquierda a derecha y los que van de derecha a izquierda);
- Se comienza la simulación con un total de 10 agentes peatones (no necesariamente la mitad para cada tipo);
- Los agentes peatones inician en una posición aleatoria en el corredor;
- Cada 200 lapsos de tiempo o iteraciones, se reinicia la simulación con 10 agentes más, las posiciones también se reasignan de manera aleatoria.

Las configuraciones extra en el simulador con nuestro modelo son:

- Radio browniano igual a 3;

- Variable A de la ecuación de repulsión/atracción con valor de 2.1;
- Variable B de la ecuación de repulsión/atracción con valor de 1.5.

En las ejecuciones, para el simulador con el modelo puramente de agentes, en donde se mueven de manera discreta basados en su sistema de reglas con desición final de forma probabilista, se observa:

1. A densidades bajas los agentes se mueven de forma muy ordenada, casi balística, por lo que la fluidés es buena;
2. A densidades medias y altas, la velocidad de los agentes reduce en gran medida y se crean zonas en donde tienen que esperar a que se abra un espacio para poder seguir avanzando;
3. Igualmente a densidades medias y altas, aparece una forma de caminado grupal creando paredes de agentes, perpendiculares a las paredes del ambiente. Esta formación interrumpe el caminado de otros agentes, que al toparse con el grupo tienen que detenerse, buscan poder avanzar a los lados y de no poder se integran al grupo, haciendo más grande la pared hasta que atraviesa el pasillo y se convierte por completo en una barrera, como en la Figura 4.2;
4. Las paredes peatonales se forman por el encuentro de grupos de peatones en contraflujo;
5. No se identifica la creación de patrones emergentes, solo los de atasco;
6. El diagrama fundamental muestra un constante decremento en la velocidad promedio de los agentes respecto al aumento en la densidad;
7. Los diagramas fundamental y de actividad muestran transiciones de fase fluctuantes en la región de densidad crítica.

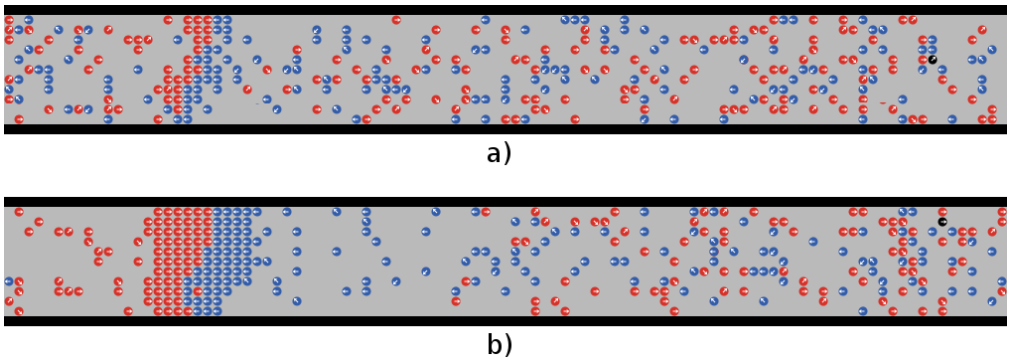


Figura 4.2: En a) se observa la formación de una pared peatonal. En b), se ha convertido en un atasco, el sistema evolucionó más rápido que la capacidad de los AP por resolver el problema. La simulación es del modelo de Ballinas et. al.

Por otro lado, en las ejecuciones con el simulador que implementa el modelo propuestro en éste documento, las observaciones son:

1. A densidades bajas los agentes caminan de forma fluida y directa, pero no balística o casí balística;

2. Igualmente, en densidades bajas, llegan a aparecen APB *monitores* temporales. Un agente o grupo de agentes se convierte en *monitor* cuando comienzan a ser seguidos por otros que caminan en su misma dirección, formando corrientes de APB;

3. En densidades medias se aprecia la creación de formaciones peatonales como parte de un comportamiento colectivo. La aparición de *monitores* aún es vigente;

4. A densidades medias y altas la velocidad promedio de los APB va disminuyendo y comienzan a verse grupos de peatones en contraflujo que al encontrarse, detienen su avance hasta que sucede alguno de los siguientes casos:

   a) Los APB del frente de cada grupo resuelven la colisión y los demás los siguen;

   b) Los APB que se encuentran atrás de los grupos comienzan a desviarse, haciendo más pequeño el grupo y creando una nueva ruta, o;

   c) En densidades altas, a pesar de desarrollarse las dos posibilidades anteriores, se acumulan muchos peatones y acontecen atascos en el pasillo.

5. La velocidad promedio observada en el diagrama fundamental decrece hasta llegar a la región de densidad crítica, dónde fluctúa con tendencia a disminuir;

6. Por su parte el diagrama de actividad incrementa con la densidad y también fluctúa en la región crítica;

7. En el diagrama de flujo peatonal se nota un comportamiento interesante. Es natural que conforme aumenta la densidad, también aumente el flujo, aunque no de forma constante, sino fluctuante. Pero al comenzar la región de densidad crítica, la manera en que decrece son fluctuaciones muy violentas. Esto se debe a que llegado el punto en que el número de APB en el pasillo es alto, la configuración inicial en el corredor es determinante para que exista un desalojo inicial grande o pequeño, provocando que el flujo final del periodo sea igualmente alto o bajo;

Adicionalmente, simulaciones con nuestro modelo peatonal de APB, fueron realizadas con una configuración en la que el radio browniano de los agentes peatones se establecio en 0. Un APB con influencia browniana de radio 0 es solamente un AP. Esto quiere decir, que una simulación con configuraciones iniciales iguales a las mencionadas anteriormente pero con la consideración recién mencionada, compite en el mismo paradigma de modelación contra el modelo puramente de agentes.

De forma cualitativa, el comportamiento de APB con radio de influencia browniana 0, es parecido a los agentes del modelo contra el cual nos comparamos. No se haya formación de patrones emergentes, el único tipo de patrón espacial es

la formación de paredes peatonales cuando se llega a la región de densidad crítica del sistema.

Los diagramas para monitorear al sistema también tienen comportamiento similar, pero más cercano a los generados por los APB. Ésto se atribuye a la modelación misma de los agentes y principalmente a que el tamaño de paso no es precisamente el mismo para todos. En primer lugar, que tengan distintas velocidades da paso a que algunos avancen más rápido que otros y puedan rebasar. Otra consecuencia de sus distintos tamaños de paso, es que hacen un mejor uso del espacio y a pesar de que no ocurren patrones emergentes de caminado, se abren espacios que los agentes ocupan para transitar.

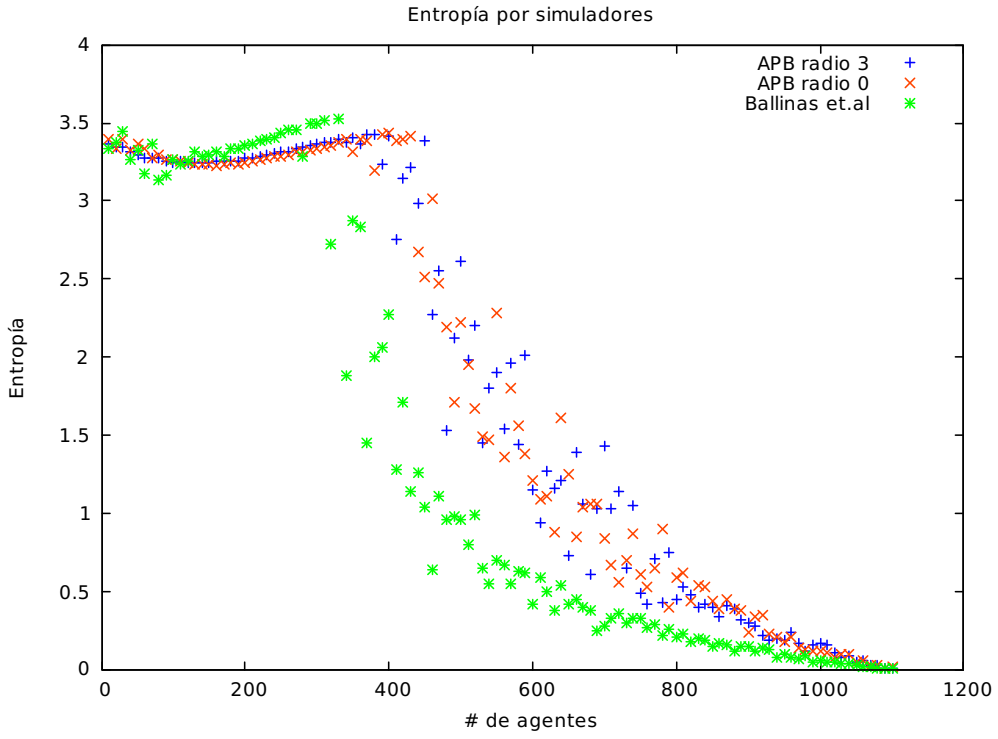


Figura 4.3: Comportamiento de la entropía en los diferentes simuladores. Se nota una visible mejora de rendimiento por parte de las simulaciones que implementan el modelo propuesto.

Se observó que los AP de nuestro modelo se desempeñan mejor que los del modelo de comparación y cuantitativamente se acercan mucho a los APB, pero no cualitativamente. Lo dicho indica que los APB le deben su desempeño global y emergencia de patrones de caminado a la influencia browniana local. En nuestro modelo, AP y APB son muy parecidos, pero hay una diferencia cualitativa visible. Cuantitativamente podemos observar el desempeño en la Figura 4.3, en donde tenemos las entropías en función de la densidad (número de agentes en el pasillo). Se distingue una clara diferencia en el comienzo de la región crítica para las simulaciones con el modelo de comparación y el nuestro. Por otro lado, nuestro modelo con influencia browniana muestra un desempeño por encima de las simulaciones sin influencia browniana en los rangos de densidad crítica.

En la Figura 4.4 se muestra como varía la entropía en dos direcciones, en el tiempo y en densidad. En los 3 casos se reinician las simulaciones cada 200 unidades de tiempo, distribuyendo a los agentes de manera aleatoria y agregando 10 de ellos. En las gráficas se observa que todos los sistemas se mantienen estables hasta antes de llegar a su región de densidad crítica. Es en ésta región donde la producción de entropía tiene comportamiento altamente fluctuante.

Tal comportamiento es característico en los Sistemas Complejos biológicos. Cuando los sistemas se encuentran a bajas densidades, menos de 370 APB para nuestra propuesta por ejemplo; se encuentran en una *fase de incordinación* en la que hay pocas interacciones y no existe orden o algún tipo de *coordinación*. Al incrementar la cantidad de individuos en un sistema complejo biológico, comienzan a aparecer *patrones*[1], resultado de la creciente interacción entre individuos.

[1]En el marco de los sistemas complejos biológicos, un patrón es una especie de orden espacio/temporal del colectivo. Un grupo formado por unidades vivas, presenta *patrones emergentes auto-organizativos* solo por la interacción de las unidades constituyentes que funcionan de manera descentralizada.

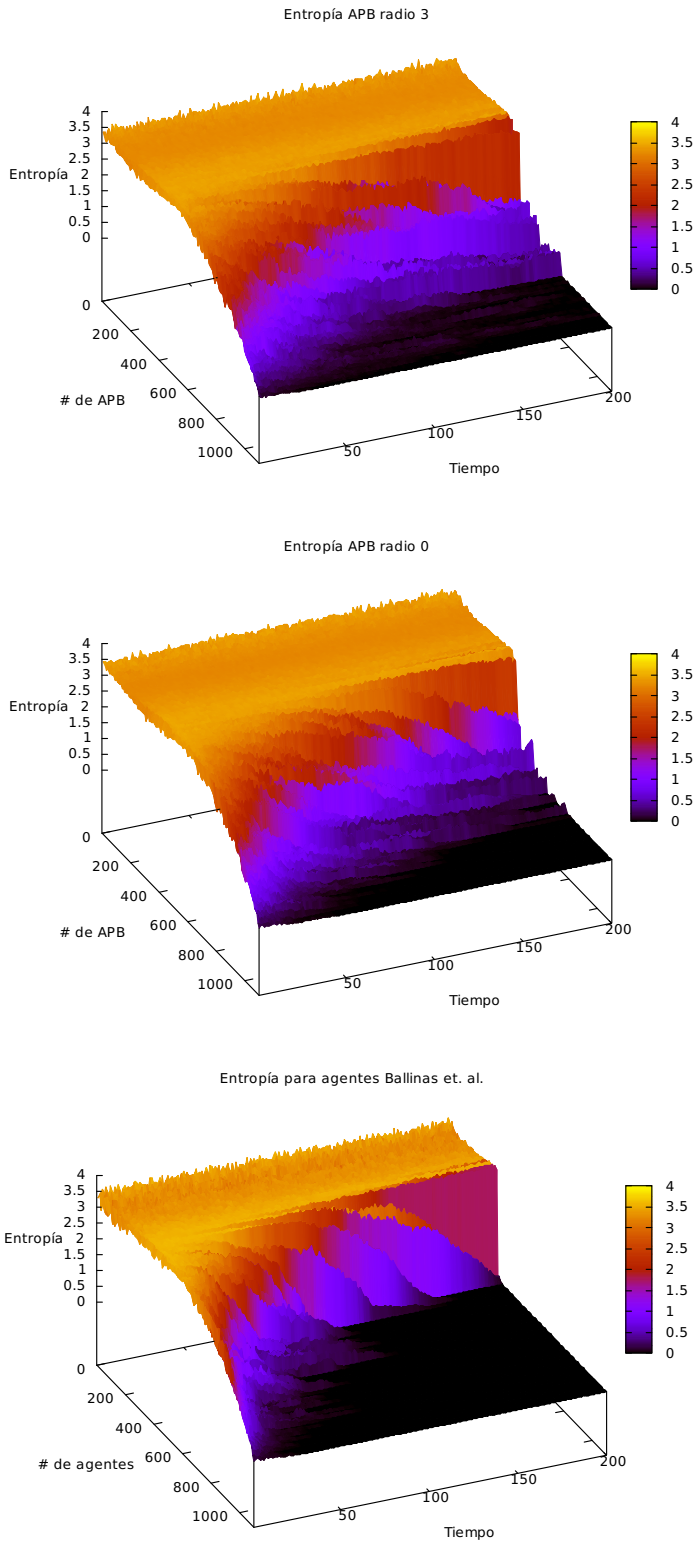


Figura 4.4: Evolución de la entropía a través del tiempo con aumento de AP. Cada 200 unidades de tiempo se agregan 10 agentes a la simulación y las posiciones se reasignan aleatoriamente.

A diferencia de otros tipos, los sistemas complejos biológicos no tienen una caída súbita en la entropía al alcanzar un punto crítico, ya sea respecto al tiempo, densidad, temperatura o alguna otra variable determinante. Con grupos biológicos, al alcanzar un alto número de individuos se entra a una *zona* o *región crítica*. Dicha zona es altamente fluctuante, como se puede ver por ejemplo en las diferentes gráficas de la Figura 4.4. La razón del ambiente tan fluctuante es debido a la sinergia de los fenómenos de "feedback" positivo y negativo.

El "feedback" positivo es actuación local que emerge en creación de patrones. Tanto en Ballinas et. al. como en los APB de radio 0, falta la detección visual de aparición de formas espaciales creadas por el conglomerado peatonal para que se pueda hablar de "feedback" positivo. Para el caso de los APB con radio 3, es la influencia browniana la que parece permitir el fenómeno. El "feedback" negativo se encarga de eliminar fluctuaciones (que visualmente podemos traducir a patrones emergentes) en el sistema y actúa globalmente.

Algunos de los experimentos que se llevaron a cabo están divididos por la cantidad de AP interactuando en el ambiente, con la intención de identificar en qué fase de evolución de los sistemas se presenta una mayor diferencia en el comportamiento y resultado de sus acciones. A continuación estudiamos tales situaciones.

4.2.1. Densidades fijas y posiciones aleatorias

Después de observar la variación de entropías durante un aumento progresivo en la cantidad de AP sobre el corredor, otros experimentos se llevaron a cabo. En dichos experimentos, el número de peatones fue fijo durante toda la simulación y el número de unidades de tiempo que trabajó el simulador fue de 1000.

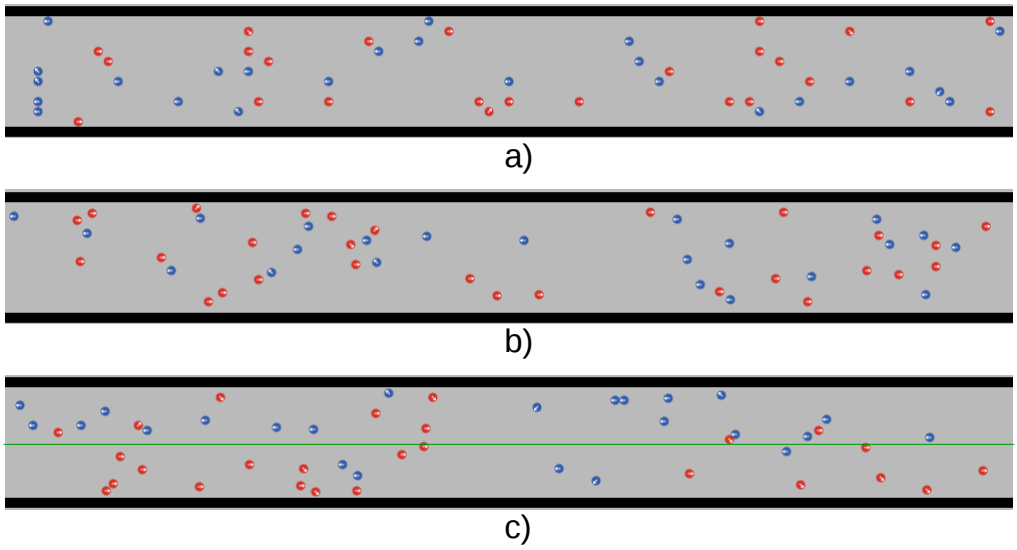


Figura 4.5: Muestras de configuraciones de los pasillos durante las simulaciones con 50 AP. a) Ballinas et.al., b) APB de radio 0 y c) APB de radio 3.

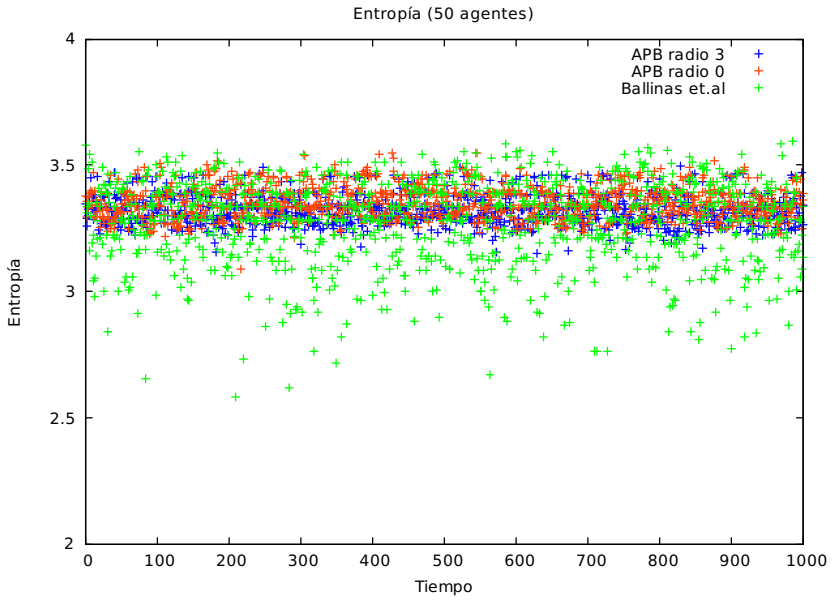


Figura 4.6: Simulaciones con 50 AP por 1000 unidades de tiempo. Solamente se muestra el rango de 2 a 4 en el eje de la entropía para una mejor apreciación.

Primeramente se trabajó con una densidad de 50 AP. A lo largo de las simulaciones, el corredor tiene configuraciones similares a las mostradas en la Figura 4.5. En el corredor c) de la Figura 4.5 hay una línea que lo divide casi por la mitad, la intensión es mostrar un patrón espacial que se formó pocos instantes antes de ser capturada la configuración y se destruyó pocos instantes después.

Las simulaciones con APB de radio 3 presentan aparición de patrones similares, donde se separan los dos tipos de AP para agilizar el tránsito. El comportamiento de APB y AP de nuestro modelo y el de Ballinas et. al. tiene diferencias no solo visuales, en la gráfica de la Figura 4.6 se nota una región más acotada para la producción entrópica del sistema. Esto indica que nuestra propuesta con o sin influencia browniana, presenta un mayor orden en la ejecución de movimientos por parte de los agentes.

Al repetir los experimentos con más AP, las simulaciones del modelo propuesto que trabaja con un radio browniano 3, comienzan a presentar patrones espaciales con mayor frecuencia. Pero una vez que se llega a una ocupación crítica del corredor por parte de los agentes, se vuelve complicado que aparezcan patrones emergentes o que gracias a ellos ocurra un mejor flujo de agentes.

Los casos presentados en los estados de la Figura 4.7, tienen una ocupación del pasillo de 0.3182, dado por 350 AP en el escenario. Para el caso del modelo de Ballinas et. al., representado en la Figura 4.7a), los agentes se comienzan a aglomerar pasados pocos instantes de tiempo de haber comenzado la simulación, provocando que esa cantidad de agentes entre en situación crítica y tenga un comportamiento en entropía que cae muy rápido como se expone en la Figura 4.8. Dicho comportamiento corresponde a lo que podemos observar en la gráfica de la Figura 4.3.

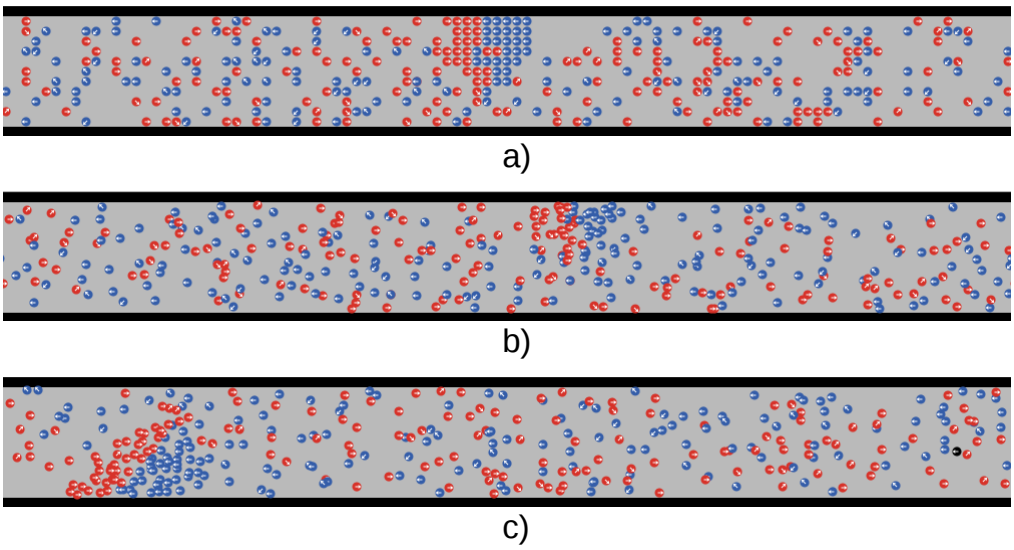


Figura 4.7: Simulaciones con 350 AP. Los estados se capturaron después de transcurridas las siguientes unidades de tiempo: a) Ballinas et.al. a las 72, b) APB de radio 0 a las 221 y c) APB de radio 3 a las 295.

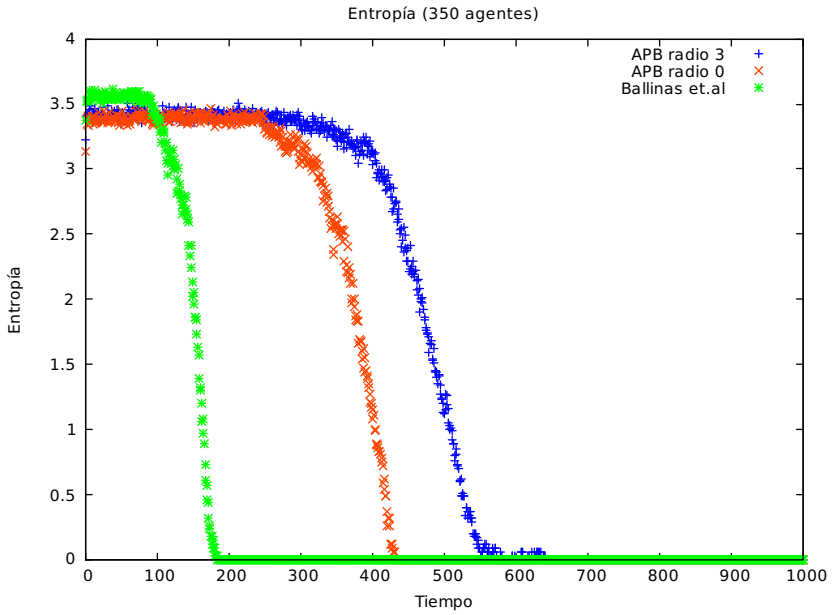


Figura 4.8: Simulaciones con 350 AP durante 1000 unidades de tiempo.

Por otro lado, contrario a lo que encontramos en la misma Figura 4.3, las simulaciones con APB de radio 0 y 3, alcanzan situaciones críticas y llegan a estados en los que ya no les es posible resolver atascos y el sistema queda en un *orden total* no deseado, ya que es un sistema ordenado a causa de inactividad.

La razón por la que en la gráfica de la Figura 4.3 no parece ser que los modelos con APB de radio 0 y 3 tengan un cambio de fase a crítica, es porque, para dicha cantidad de agentes, se necesita trabajar por más de 200 unidades de tiempo, que es el límite de trabajo para cada densidad en el experimento que representa tal gráfica. En la gráfica de la Figura 4.8 se distingue que nuestro modelo de APB comienza a tener un descenso en entropía después de las 200 y 290 unidades de tiempo para radio 0 y 3 respectivamente.

Ahora bien, consideremos revisar el desempeño de los AP cuando es un hecho que el sistema está dentro de su región crítica. Por ejemplo, cuando interactúan 650 AP, se tiene una ocupación del 0.5909 del total del corredor. Simulaciones con tal característica tienen como resultado atasco de los AP para Ballinas et. al. y APB con radio 0 y 3, la diferencia es cuándo y cómo sucede.

Es bien sabido que la forma en que se desenvuelve y llega a fin un escenario de Sistemas Complejos depende en gran medida de su configuración inicial. Pero también se tiene que tomar en cuenta la capacidad o nivel de sofisticación de los individuos que llevan a cabo alguna tarea dentro del SC, como es el caso del modelo de AP de Ballinas et. al. y los APB.

Pongamos especial atención a los ejemplos de estados finales de la Figura 4.9 de simulaciones con 650 AP. Como se mencionó, a pesar de que las simulaciones con los tres tipos de AP terminaron en atasco, lo importante es cómo y cuándo sucedió.

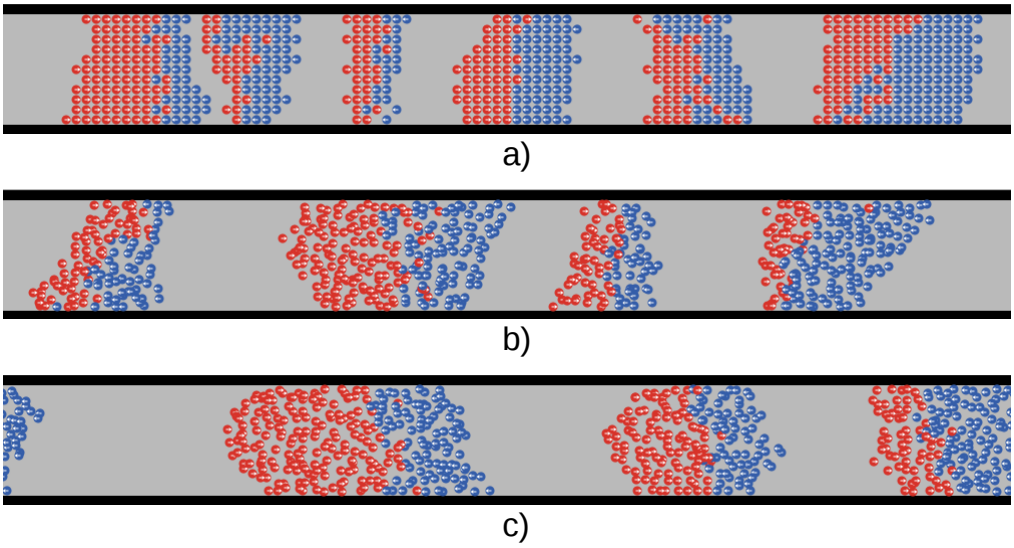


Figura 4.9: Tanto a) Ballinas et.al., b) APB de radio 0 y c) APB de radio 3, presentan atascos con 650 peatones. Los estados de las imágenes se alcanzaron en los tiempos 65, 120 y 212 para a), b) y c) respectivamente.

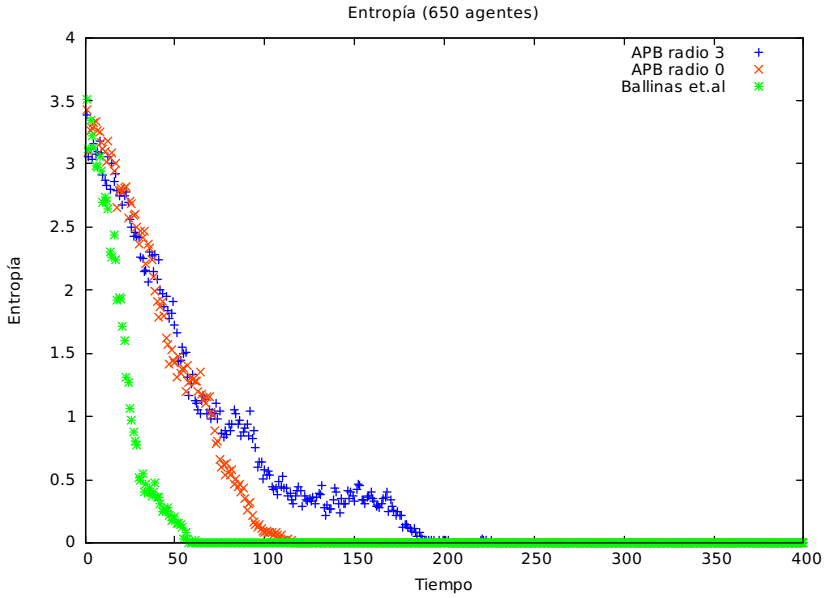


Figura 4.10: Simulaciones con 650 AP.

La primera diferencia notable entre los AP de Ballinas et. al. y los APB, es que se aglomeran de una manera muy ordenada, como si estuvieran formados. Esto se atribuye a la modelación tan restringida de los agentes. Una segunda característica es la cantidad de paredes peatonales que se formaron, en el caso de los agentes de Ballinas et. al. son 6, para los APB de radio 0 son 4 y los APB de radio 3 terminaron con 3. El tercer punto es consecuencia del segundo, entre más formación de paredes peatonales, es menor la distancia que un agente puede recorrer antes de no poder seguir avanzando, por lo tanto, el total de agentes se detendrá más pronto entre más paredes peatonales se formen.

Lo que podemos resaltar es:

1. Independientemente del estado inicial de los sistemas, los APB tienen un mejor desempeño porque están dotados de recursos que les permiten caminar de una mejor manera, dígase la influencia browniana;

2. Además, la propiedad que se les programó para poder avanzar en unidades no enteras es una ventaja ya que hacen mejor uso de su espacio;

3. Dados los dos puntos anteriores, los APB deciden y resuelven un siguiente paso dada más información, que resulta en la solución de atascos;

4. Ya que los APB solucionan problemas locales más eficientemente que los AP simples, se presentan menos paredes peatonales, beneficiando el tránsito por más tiempo;

5. Todo ésto termina en la mejor ejecución de los APB, formando menos paredes peatonales, trabajando por más tiempo y con mayor orden.

El resultado lo podemos analizar fácilmente con la gráfica de la Figura 4.10. Vemos que para los APB de radio 0 la entropía cae por completo el doble de tiempo después que para los AP de Ballinas et. al. y en el caso de los APB de radio 3, casi el doble de tiempo después que para los de radio 0.

En la misma Figura 4.10 es visible que a pesar de que la entropía va en descenso para los 3 casos, los agentes del sistema de APB de radio 3 logran ordenarse entre los tiempos 75-100 y 125-170.

Hasta ahora, los AP de los experimentos comienzan en un estado inicial en el que su posición es totalmente aleatoria, pudiendo encontrarse en la entrada, a la mitad o en la salida del pasillo. A continuación veremos casos en donde los agentes están separados dependiendo de su dirección.

4.2.2. Densidades fijas y AP separados

Los siguientes experimentos fueron pensados para simular las situaciones en que dos grupos de peatones que caminan en contraflujo tienen un primer encuentro frontal en masa y cómo evoluciona el sistema a partir de ese momento.

Al igual que en la etapa anterior, primero se llevaron a cabo experimentos incrementales en cuanto al número de AP cada 200 unidades de tiempo. Los resultados mostrados en la Figura 4.11 indican un cambio de fase más marcado cuando se separan los AP en dos grupos al iniciar las simulaciones.

Dicho cambio de fase, ocurre con la mitad de agentes que cuando se asignan posiciones totalmente aleatorias. La razón, la elevada cantidad de actividad entre agentes, provocada por un primer encuentro que involucra un gran número de ellos caminando en contraflujo.

En la Figura 4.11 podemos observar que el modelo más afectado por el cambio de configuración inicial es el de APB de radio 3, ya que su caída en entropía es gradual cuando las posiciones de los AP son aleatorias al inicio y para estos casos es menos pronunciada.

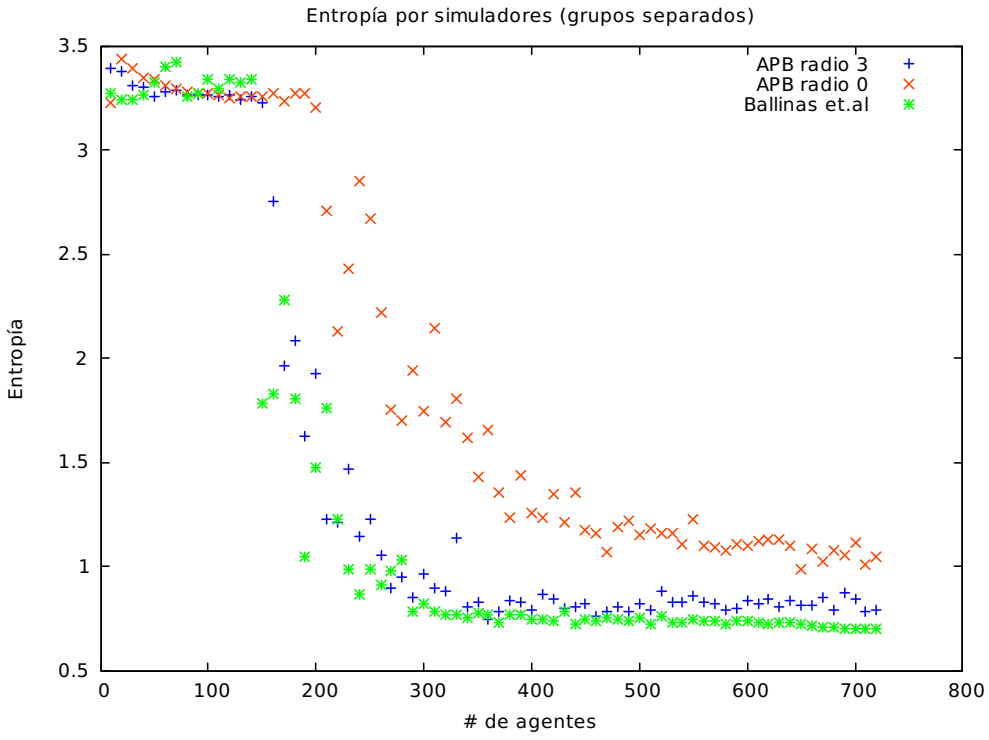


Figura 4.11: Comportamiento de la entropía en los diferentes simuladores. La configuración inicial separa los grupos de peatones a los extremos del corredor al inicio de cada etapa.

Si bien, las interacciones son escasas cuando hay pocos AP ocupando el espacio del corredor, separarlos por su dirección desde un inicio, provoca que se desarrollen ciertas conductas que no se aprecian o son casi inexistentes con la configuración anterior.

Éstos patrones emergentes se presentan por ejemplo con ocupaciones del pasillo de 0.0455 y 0.0909, correspondientes a 50 y 100 AP. Con una ocupación tan baja del corredor, los agentes tienen libertad de moverse casi sin interactuar. En el caso de APB de radio 3, desarrollan caminata libre casi todo el tiempo. Pero cuando se encuentra cerca de otros con la misma dirección, por efecto browniano puede comenzar a seguirlos o convertirse en *monitor* si es a él a quien siguen.

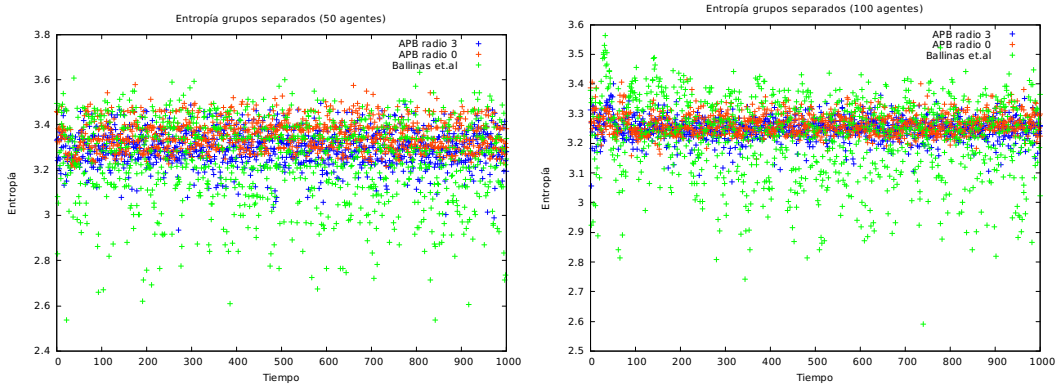


Figura 4.12: Gráficas de entropía en simulaciones con 50 y 100 AP.

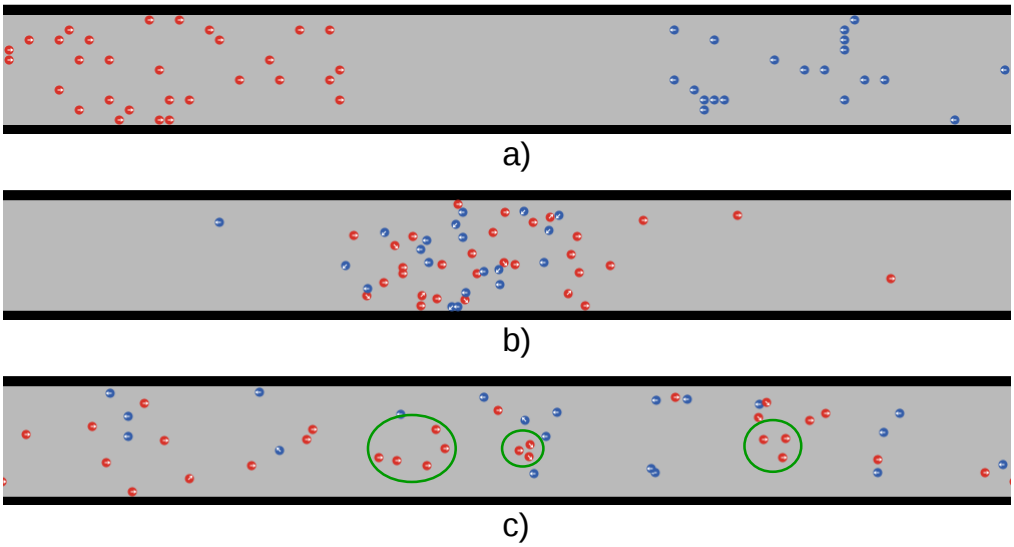


Figura 4.13: Diferentes momentos de una simulación con 50 APB de radio 3 y grupos separados al inicio. a) configuración inicial, b) primer choque a 42 unidades de tiempo y c) situación promedio de una simulación con las características mencionadas (pantalla capturada en el momento 751).

La emergencia de agentes *monitores* es mucho más común con la configuración inicial de grupos de AP separados. Así como también, se presentan con mayor frecuencia a tempranos momentos de las simulaciones con pocos agentes, o después

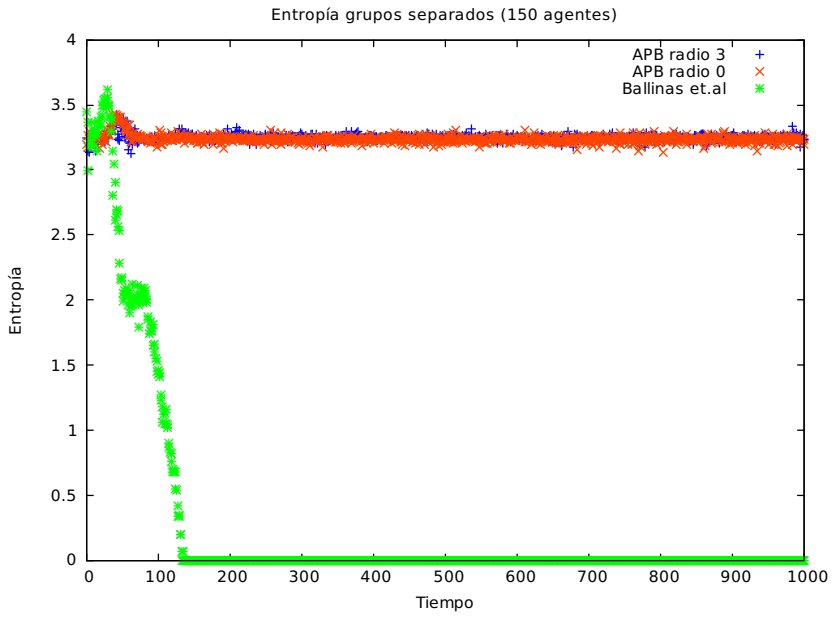


Figura 4.14: Gráfica de entropía en simulaciones con 150 AP.

de resolver los primeros encuentros cuando el número de agentes comienza a alcanzar niveles críticos para el sistema.

Continuando con el ejemplo de 50 APB, en la Figura 4.13c), se resaltan tres grupos de agentes que permanecieron juntos por cierto periodo de tiempo. Los dos grupos de tres agentes, mantienen una formación de dos APB al frente y uno atrás, muy común en peatones reales que caminan en grupos de tres. A pesar de la emergencia de patrones, si nos fijamos en la Figura 4.12, no se llega a establecer algún orden que marque diferencia a lo visto en los experimentos con pocos agentes, donde su posición inicial es totalmente aleatoria.

Ahora bien, cuando incrementamos el número de agentes a 150, tanto APB's y agentes de Ballinas et. al. alcanzan a ordenar el sistema. En la Figura 4.14, observamos que el problema es cómo se ordenan. La simulación con los agentes de Ballinas et. al. logran un orden con entropía mínima por un estado indeseable

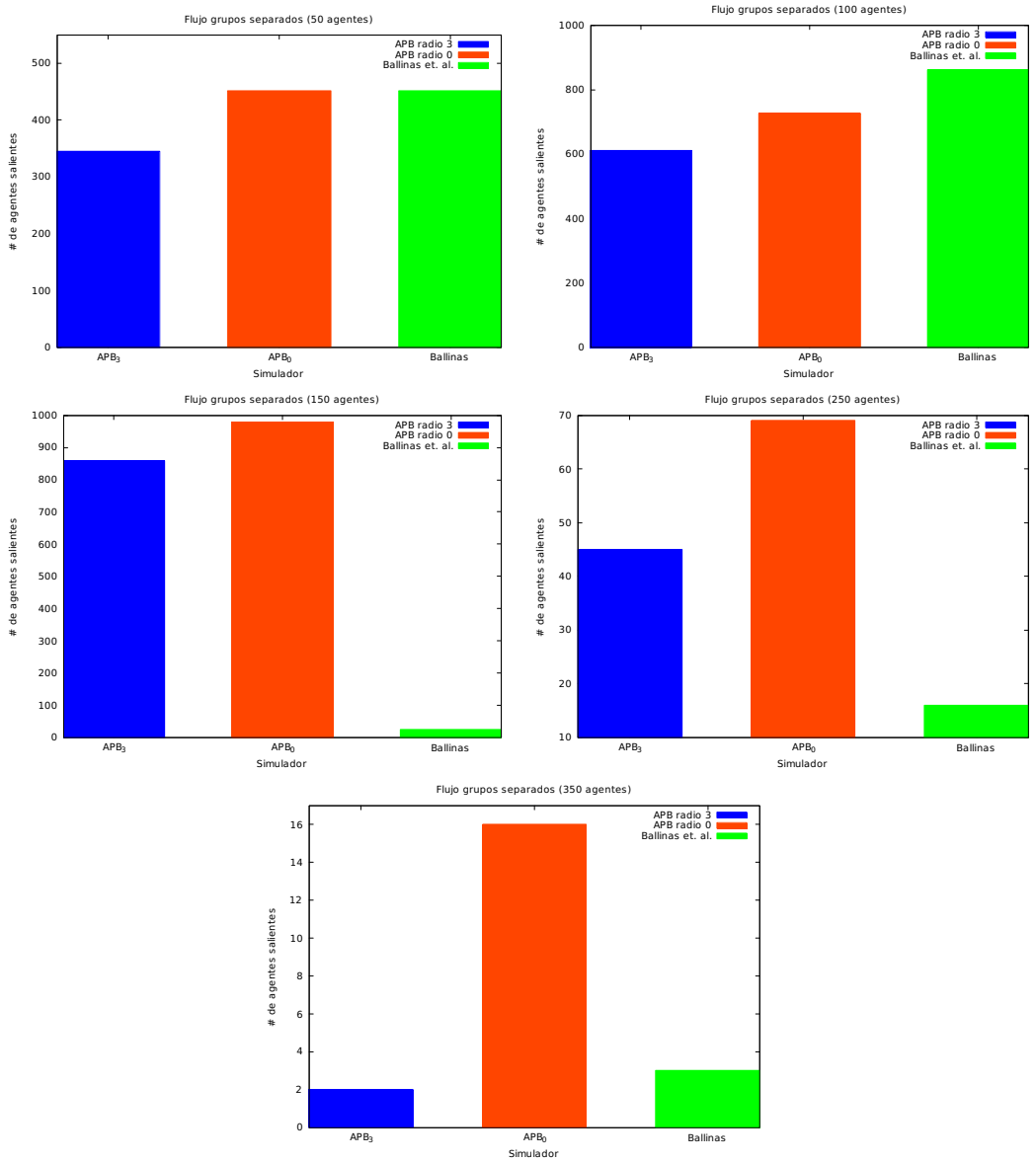


Figura 4.15: Gráficas de flujo para simulaciones con 50, 100, 150, 250 y 350 AP. Congruente con las gráficas de entropía, debido al pronto atasco de los agentes de Ballinas et. al. a partir de 150 AP, sufren una considerable caída en el flujo total de sus simulaciones, pasando súbitamente de ser el tipo de AP que más desaloja, a ser el que menos logra.

de inactividad, provocada por un primer encuentro de los grupos de agentes en contraflujo que no se pudo resolver.

En el caso de los APB de radio 0 y 3, el sistema se ordena y mantiene estable después del primer encuetro que, en el caso de sus análogos fue la causa de su inactividad. Para los APB, la interacción de 150 agentes logra un equilibrio entre "feedback" positivo y negativo que saca al sistema de una fase de *incordinación*, pero no lo lleva a un estado crítico.

La consecuencia más grande del atasco para los agentes de Ballinas et. al. en simulaciones con 150 AP, es el cambio en el flujo respecto a simulaciones con una menor ocupación del pasillo. Tal como se presenta en las gráficas de la Figura 4.15, dichos agentes logran salir del pasillo en mayor cantidad que los APB con densidades bajas. Pero a partir de los 150, son solo unos cuantos agentes los que logran atravesar el pasillo.

El comportamiento en caída continúa para los agentes de Ballinas et. al. y se comienza a notar en ABP cuando se alcanzan los 200 agentes en el pasillo. En la gráfica de la izquierda de la Figura 4.16, vemos que con 250 agentes, los sistemas de AP tienen distinto comportamiento en su región crítica, pero los tres muestran un cambio de fase que los lleva a un estado de inactividad.

Como se ha mencionado hasta ahora, la forma en que se presentan patrones emergentes, ocurren atascos o aparecen agentes monitores y grupos, describe más del sistema que solo el momento en que sucedieron los fenómenos. Pero, por ejemplo, cuando se realizan simulaciones con 350 AP, podemos notar que no hay gran diferencia entre un modelo de AP y otro. Tal y como expone la gráfica de la derecha de la Figura 4.16, todos evolucionan de forma casi idéntica, con excepción del tiempo que le toma a cada uno comenzar el cambio de fase.

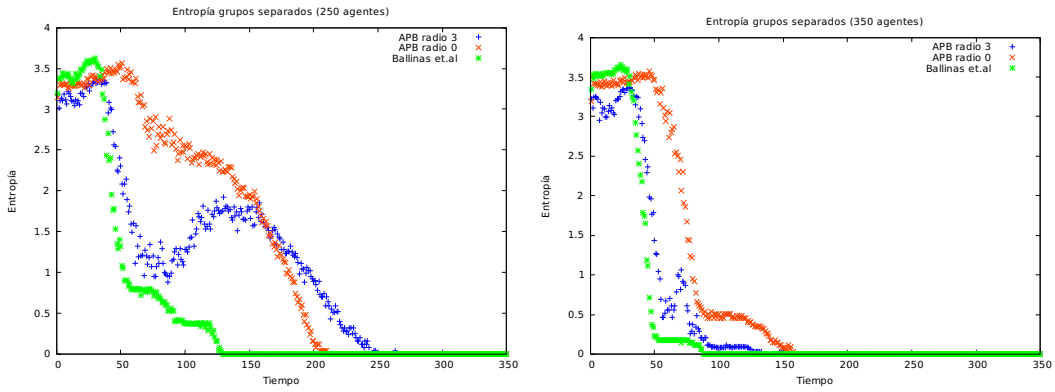


Figura 4.16: Gráficas de entropía en simulaciones con 250 y 350 AP.

En estos casos, la diferencia cuantitativa se refleja en el flujo de los agentes durante las simulaciones. Así, por la gráfica que presenta los flujos para simulaciones con 350 AP de la Figura 4.15, podemos distinguir a los APB de radio 0 de los de radio 1 y los de Ballinas et. al. por la gran ventaja que tiene sobre el flujo total de AP que logran salir del corredor.

Para poder diferenciar entre APB de radio 3 y AP, no podemos hacerlo solo con los datos de flujo, pero para éste caso, es una característica discriminante el cuándo cae a 0 la entropía del sistema. Es decir, contrario a lo que se explica anteriormente, para densidades altas, el tiempo en que ocurren los sucesos es suficiente y determinante para clasificar el tipo de AP en cuestión.

Con los experimentos realizados de AP inicializados en posiciones aleatorias, se simularon escenarios en donde se observa el sistema a partir de un tiempo desconocido después de un primer contacto de grupos en contraflujo. AP inicializados en grupos separados respecto a su dirección de caminado, representaron situaciones en las que el sistema arranca de un estado de control inicial. Se consideran las situaciones probables en cuanto a los tipos de encuentros e interacciones.

Así, tenemos datos y observaciones para poder determinar y describir comportamientos propios de AP, cuyo desempeño es afín al de peatones reales.

Conclusiones

En la presente tesis se trabajó el problema de modelado y simulación de conglomerados peatonales en la forma de agentes peatones, así como la caracterización de dichos agentes.

Se escogió el fenómeno de movimiento browniano como base inspiradora para el modelo de un agente peatón. Esto, por el gran parecido que tienen tanto partícula browniana como peatón por la influencia de su ambiente próximo. La diferencia es la persistencia del peatón por alcanzar un objetivo.

La descripción browniana del modelado peatonal, cabe perfecto dentro de uno de los sistemas de percepción que han desarrollado los seres humanos y utilizan no solo cuando son peatones. Nos referimos a la propiocepción, cualidad que permite, en nuestro caso a peatones, conocer su lugar en un espacio, cómo lo ocupa y qué hay a su alrededor sin tener la necesidad de ver todo el entorno.

Los agentes peatones se diseñaron con reglas simples pero suficientes para poder resolver encuentros frontales y laterales con otros peatones y también obstáculos como las paredes de un corredor. Los agentes peatones siguen un proceso de *percepción - decisión - actuación*, en donde la decisión se lleva a cabo tomando en cuenta distribuciones de probabilidad para cada situación que puedan enfrentar.

Al dotar a los agentes con una descripción browniana de su entorno, nos fue posible modificar las distribuciones de probabilidad tomando un panorama más amplio del medio próximo del agente, dígase información local, logrando que los ahora agentes peatones brownianos, se condujeran de una forma más parecida a como lo hacen los peatones reales.

Llevando el modelo propuesto a un entorno multiagente, se identificaron ciertos comportamientos que apoyan el conocimiento de que los conglomerados peatonales son sistemas complejos, brindando evidencia de que el modelo presentado, representa de muy buena forma al sistema real de peatones.

El sistema multiagente, se comporta como sistema complejo en la medida que se generan patrones colectivos de caminado en el corredor, considerando que cada agente peatón browniano funciona iterativamente con los procesos de *percepción*, *decisión* y *actuación*. Comprendiendo también que no existen moderadores o directores orquestando el comportamiento de los agentes.

El sistema multiagente peatonal browniano muestra comportamientos de auto-organización dependiendo de las configuraciones del sistema. Por ejemplo, se encontró que cuando se separa a los agentes en dos grupos de acuerdo a su dirección, es común encontrar grupos de agentes peatones brownianos que visualmente parecieran seguir a uno o varios de ellos. A dichos agentes se les denominó *monitores* por su aparente ejemplo de camino a seguir.

Hay que aclarar que estos *monitores* no son líderes de grupo, coordinadores o algún tipo de agente centralizador. Simplemente, son el ejemplo de agentes peatones brownianos que se enfrentan a una situación antes que otros y dicha situación o estado del sistema, se repite de manera local para agentes peatones brownianos que caminan muy juntos. Dando la impresión de que el agente al frente

les indica hacia donde moverse.

Otro hecho a tomar en cuenta, es que los agentes, a pesar de tener ciertas reglas e influencias concretas, la decisión final la toman de forma aleatoria con cierta distribución de probabilidad. Por lo que jamás se puede decir con certeza que tomarán una u otra decisión, mucho menos seguir órdenes de otros agentes.

Gracias a las simulaciones pudimos comprobar que la evolución del sistema depende en gran medida de su configuración inicial. Si en lugar de separar a los agentes por su dirección de caminado, se distribuyen a lo largo del pasillo, tendrán un gran desempeño desde comenzada la simulación.

Ésto no quiere decir que una vez formado un patrón, dicha forma espacial se conservará para siempre. Al contrario, se identificó que, ya que los patrones no son una propiedad intrínseca de los agentes, su aparición es espontánea y temporal. Concluyendo que su construcción y desaparición se debe a dualidades existentes desde el modelo de agentes peatones brownianos hasta algunas propias del sistema multiagente visto como sistema complejo.

Acciones como realizar giros por comodidad como los cabeceos propios de peatones, pero tener un punto como meta son dualidades de las que hablamos. Intentar caminar lo más rectos posible, pero girar para evadir peatones o alejarse de una pared; caminar en grupo por comodidad y evitar choques con agentes en contraflujo pero también separarse para avanzar más de prisa. Son actividades que en conjunto, permiten un trabajo de "feedback" positivo y negativo. Creando patrones espaciales en diferentes zonas del pasillo, y luego destruyéndolas a lo largo de él.

Por otro lado, para caracterizar cuantitativamente el desempeño del sistema, se escogió a la entropía como herramienta fundamental. Vista como los efectos

del ambiente sobre el caminado, tomando en cuenta ambiente y grupo. Es decir, paredes, posición y orientación de agentes dentro de la zona de percepción T, la zona de influencia browniana y su fuerza $\vec{F}_B$ resultante, forman el ambiente para un agente peatón browniano particular.

En los experimentos podemos observar que el sistema multiagente que trabaja con el modelo peatonal propuesto, con y sin influencia browniana mantiene una producción entrópica estable, incluso incrementando el número de agentes peatones para el primer encuentro.

Es observado que al iniciar las simulaciones se presenta una etapa de incremento en la entropía. La interacción inicial provoca un gran número de cambios en la dirección de los AP, permitiendo dicho crecimiento en la entropía, pera bajando cuando el sistema se comienza a estabilizar.

Tal estabilización, si bien no tiene una apariencia espacial definida, cuantitativamente se puede ver como la más básica forma de auto-organización que puede presentar un conglomerado peatonal.

Se observó que al separar a los agentes peatones de acuerdo a su dirección de caminado, el comportamiento en entropía cae con fluctuaciones que crecen al entrar a regiones de densidad crítica. Pero las fluctuaciones disminuyen y la caida en entropía se vuelve súbita al alcanzar un alto punto de densidad crítica. Además, se muestra evidencia de una mejor práctica por parte de nuestros agentes en comparación con otros en la literatura.

Para las configuraciones recién mencionadas, nuestro modelo entra a una región crítica a partir de una ocupación del pasillo de 0.1818, mientras que los agentes en comparación lo hacen en 0.1363, correspondientes a 200 y 150 agentes respectivamente. Y a pesar de que cuando son 250 agentes peatones interactuando

en el pasillo, todos los modelos caen hasta llegan a un estado de inactividad, nuestros agentes peatones brownianos muestran un mejor rendimiento, trabajando el doble del tiempo que sus análogos.

Por otro lado, al revisar las simulaciones en donde los agentes se encuentran distribuidos a lo largo del pasillo desde el inicio del experimento, los descensos en la entropía se vuelven menos fluctuantes, disminuyendo de modo casi constante. También los agentes contra los que nos comparamos exponen un mejor desempeño entrando a su región crítica con una ocupación de 0.2727 correspondiente a 300 agentes. Igualmente nuestro modelo mejora, y entra en situación crítica ocupando 0.3636 del total del pasillo con 400 agentes.

Aún así, una muestra de que la configuración inicial con agentes repartidos aleatoriamente favorece la actuación de los agentes en los experimentos, es que ningún modelo cae por completo a la inactividad total antes de que el pasillo se ocupe al 0.9 de su total.

En general, podemos concluir que el modelo de agentes peatones con influencia browniana, representa de buena manera el comportamiento de peatones reales para situaciones estándar de caminado a través de un pasillo.

Se comprobó, que a medida que el conglomerado crece, también lo hace la organización de los APB y entran a fases de coordinación, llegando a un punto de coordinación total en forma de inactividad cuando la densidad en el sistema sobrepasa la capacidad de organización.

Por medio de las zonas de percepción e influencia del medio y las reglas de agentes, se le dotó a nuestros APB de las suficientes herramientas para que ocurriera una sinergía tal en el sistema, que fueran posibles fenómenos emergentes como la creación de diferentes patrones espaciales presentes en el fenómeno mismo

de caminado en grupo.

De esta manera, por medio de la observación y medición, podemos decir que se logró el diseño e implementación de agentes peatones, que con ayuda de un modelo inspirado en la influencia browniana, capturó la escencia de un peatón y es capaz de replicarla en simulaciones.

Referencias

[1] Antonini, G., Bierlaire, M., and Weber, M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological 40*, 8 (2006), 667–687.

[2] Asano, M., Iryo, T., and Kuwahara, M. Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behaviour. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies 18*, 6 (2010), 842–855.

[3] Ballinas-Hernández, A. L., Muñoz-Meléndez, A., and Rangel-Huerta, A. Multiagent system applied to the modeling and simulation of pedestrian traffic in counterflow. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation 14*, 3 (2011), 2.

[4] Bandini, S., Manzoni, S., and Vizzari, G. Situated cellular agents: a model to simulate crowding dynamics. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems 87*, 3 (2004), 669–676.

[5] Blue, V. J., and Adler, J. L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological 35*, 3 (2001), 293–312.

[6] Brown, R. A brief account of microscopical observations made in the months of june, july and august, 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. *Philosophical Magazine Series 2 4*, 21 (1828), 161–173.

[7] Daamen, W., and Hoogendoorn, S. Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*

Research Board, 1828 (2003), 20–30.

[8] Dijkstra, J., Timmermans, H. J. P., and Jessurun, A. J. A multi-agent cellular automata system for visualising simulated pedestrian activity. In *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata-Proceedings on the 4th International Conference on Cellular Automata for research and Industry* (2000), Citeseer.

[9] Einstein, A. Über die von der molekularkinetischen theorie der wärme geforderte bewegung von in ruhenden flüssigkeiten suspendierten teilchen. *Annalen der physik 322*, 8 (1905), 549–560.

[10] Fridman, N., and Kaminka, G. A. Comparing human and synthetic group behaviors: A model based on social psychology. In *International conference on cognitive modeling ICCM-09* (2009).

[11] García-Colín, L. S. Brownian motion and its implication in non-equilibrium statistical mechanics. *Kinam 1* (1979), 107–127.

[12] Helbing, D. Stochastic and boltzmann-like models for behavioral changes, and their relation to game theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 193*, 2 (1993), 241–258.

[13] Helbing, D., and Molnar, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E 51*, 5 (1995), 4282.

[14] Heliövaara, S., Ehtamo, H., Helbing, D., and Korhonen, T. Patient and impatient pedestrians in a spatial game for egress congestion. *Physical Review E 87*, 1 (2013), 012802.

[15] Henein, C. M., and White, T. Macroscopic effects of microscopic forces between agents in crowd models. *Physica A: statistical mechanics and its applications 373* (2007), 694–712.

[16] Hughes, R. L. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological 36*, 6 (2002), 507–535.

[17] Jiang, R., and Wu, Q. S. Pedestrian behaviors in a lattice gas model with large maximum velocity. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 373683-693* (2007), 683–693.

[18] Kirchner, A., and Schadschneider, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica*

A: Statistical Mechanics and its Applications 312, 1 (2002), 260–276.

[19] Kretz, T., Grünebohm, A., Kaufman, M., Mazur, F., and Schreckenberg, M. Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor. *arXiv preprint cond-mat/0609691* (2008).

[20] Lam, W. H., Morrall, J. F., and Ho, H. Pedestrian flow characteristics in hong kong. *Transportation Research Record*, 1487 (1995).

[21] Löhner, R. On the modeling of pedestrian motion. *Applied Mathematical Modelling* (2010).

[22] Ma, J., Song, W., Fang, Z., Lo, S., and Liao, G. Experimental study on microscopic moving characteristics of pedestrians in built corridor based on digital image processing. *Building and Environment 45*, 10 (2010), 2160–2169.

[23] Morrall, J. F., Ratnayake, L. L., and Seneviratne, P. N. Comparison of central business district pedestrian characteristics in canada and sri lanka. *Transportation Research Record* (1991).

[24] Moussaïd, M., Helbing, D., Garnier, S., Johansson, A., Combe, M., and Theraulaz, G. Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 276*, 1668 (2009), 2755–2762.

[25] Rangel-Huerta, A. Ecuación de boltzmann de discos rígidos auto-impulsados para peatones en contraflujo. *Revista mexicana de física 59*, 2 (2013), 153–159.

[26] Rangel-Huerta, A., and Muñoz-Meléndez, A. Kinetic theory of situated agents applied to pedestrian flow in a corridor. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (2010).

[27] Ronald, N., Sterling, L., and Kirley, M. An agent-based approach to modelling pedestrian behaviour. *International Journal of Simulation 8*, 1 (2007), 25–38.

[28] Tanaboriboon, Y., and Guyano, J. A. Analysis of pedestrian movements in bangkok. *Transportation Research Record 1294* (1991), 52–56.

[29] Tanaboriboon, Y., Hwa, S. S., and Chor, C. H. Pedestrian characteristics study in singapore. *Journal of transportation engineering 112*, 3 (1986), 229–235.

[30] Tian, W., Song, W., Ma, J., Fang, Z., Seyfried, A., and Liddle, J.

Experimental study of pedestrian behaviors in a corridor based on digital image processing. *Fire Safety Journal 47* (2012), 8–15.

[31] Weng, W. G., Shen, S. F., Yuan, H. Y., and Fan, W. C. A behavior-based model for pedestrian counter flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 375*, 2 (2007), 668–678.

[32] Yu, Y. F., and Song, W. G. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow considering the surrounding environment. *Physical Review E 75*, 4 (2007), 046112.

[33] Yue, H., Hao, H., Chen, X., and Shao, C. Simulation of pedestrian flow on square lattice based on cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (2007).