

## 6. Experimentos en TestBed

Para poder validar completamente el Algoritmo de Evitación Reactivo se han realizado a una serie de experimentos reales sobre el Integrated TestBed.

Dichos experimentos han sido diseñados para aprovechar al máximo las características de la sala a la vez que para someter a los robots a escenarios en los que se ponga de manifiesto la necesidad de un algoritmo de estas características.

### 6.1 Ajuste del Simulador

La principal finalidad del experimento que se muestra a continuación es la búsqueda de unos parámetros que permitan realizar un ajuste preciso de las constantes que rigen el comportamiento de los agentes dentro del Simulador, de forma que sus actuaciones se asemejen al máximo a la realidad.

#### 6.1.1 Evita Columnas

Para poder realizar una caracterización de los parámetros del sistema se ha diseñado un escenario en el que la simplicidad de la solución permite la búsqueda de una réplica precisa de la trayectoria por parte del Simulador.

Para ello se ha emplazado un único agente en el extremo derecho de la sala sobre la línea que la separa horizontalmente. El objetivo a alcanzar ha sido un punto en el extremo opuesto de dicha línea, de forma que durante el recorrido el agente encuentre por defecto las tres columnas como obstáculos.

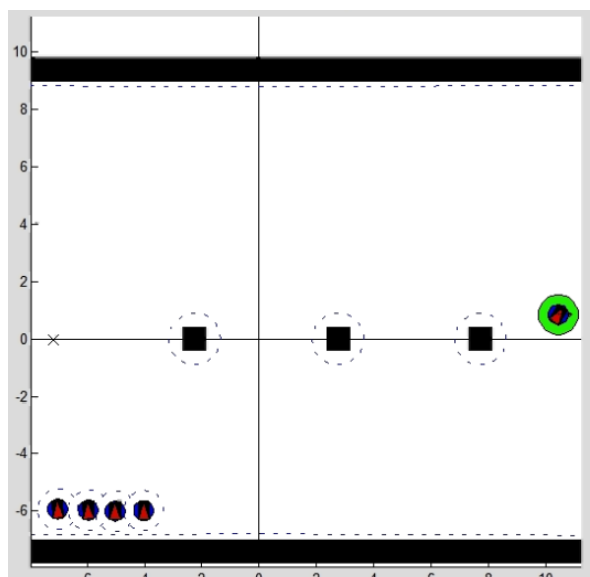


Figura 6.1: Escenario inicial del Sortea Columnas

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

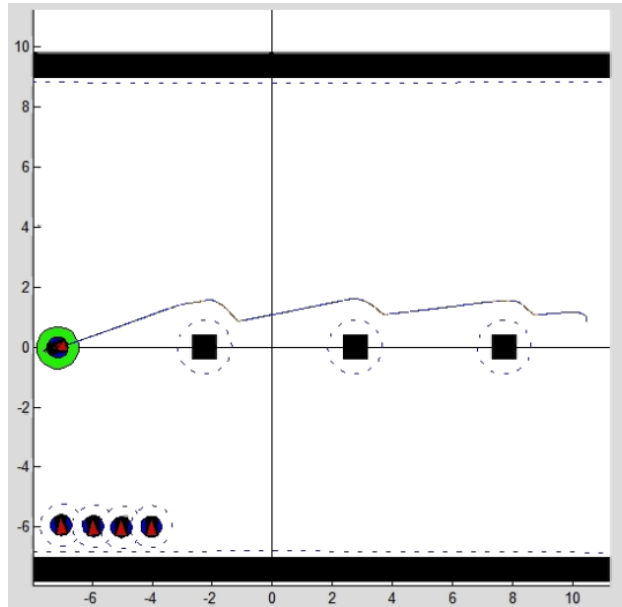


Figura 6.2: Escenario final del Sortea Columnas

El experimento demuestra que el Sistema de Esquiva Reactivo es capaz de sortear las columnas sin causar colisiones bajo las condiciones impuestas.

A partir de dicho resultado se han configurado los valores del simulador para que refleje un comportamiento acorde a la realidad. Los valores resultantes han sido los siguientes:

$K^{Speed}$	0.9	$K^{\varphi}$	1
$\tau^{Speed}$	0.5	$\tau^{\varphi}$	0.09

Tabla 6.1: Parámetros de configuración de los sistemas de primer orden

$K_P^{Speed}$	0.5	$K_P^{\varphi}$	0.5	$R_S$	0.4m
$K_I^{Speed}$	0	$K_I^{\varphi}$	0	$R_R$	0.6m
$K_D^{Speed}$	0	$K_D^{\varphi}$	0	$d_{llegada}$	0.25m

Tabla 6.2: Parámetros de configuración del sistema

Nótese que el radio del Reserved Disk ( $R_d$ ) con el que se ha configurado el sistema es 0.1 metros más pequeño que el que consta en la configuración de los Pioneer. Esto es debido a que el Simulador tiene unos tiempos de reacción carentes de la problemática asociada a los tiempos de transmisión y a los periodos de evaluación de la posición propia que caracterizan al sistema real.

Dicho valor, en media, será el que mejor consiga modelar los tiempos de respuesta del Pioneer, sin embargo, como se verá posteriormente, los valores

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

de pico de dicha variable serán los mayores responsables de que el Simulador diste de la realidad.

Al hacer una gráfica comparativa entre el recorrido del agente real (línea continua) y el del agente simulado (línea discontinua), obtenemos las siguientes trayectorias:

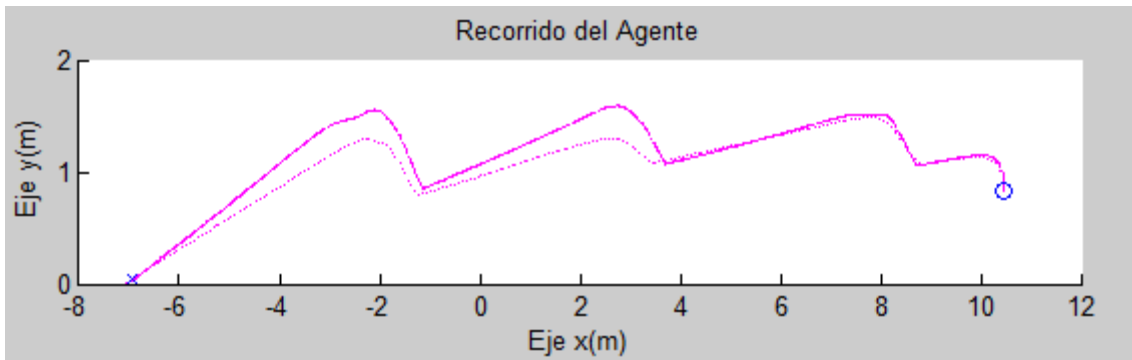


Figura 6.3: Recorrido real y virtual del sistema

En ella se observa cómo el comportamiento del agente desde el origen se asemeja mucho a la realidad y cómo la primera esquiva realizada por el simulador conserva una gran simetría con respecto a la realizada por el Pioneer.

Sin embargo, se puede apreciar en la esquiva de la segunda columna, cómo debido a errores en la localización del robot, el sistema real realiza una acción más potente de esquiva, traducido en un mayor alejamiento de la columna por parte del mismo.

El alejamiento también se ve incrementado por el hecho de que el sistema real tiene un  $R_d$  mayor configurado, lo que le hace permanecer más tiempo en el estado Rendezvous. Además de ello, el sistema continúa alejándose durante el intervalo que tarda el computador en descubrir y procesar el cambio de estado.

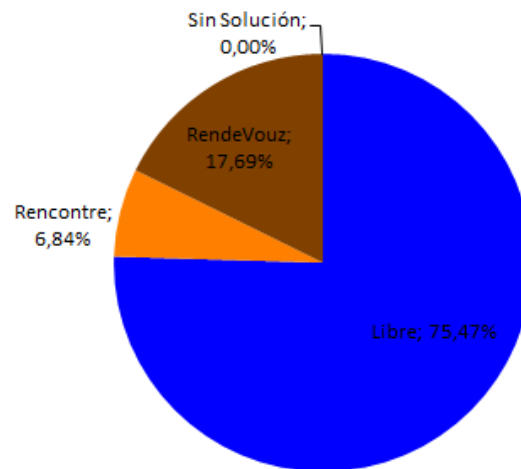
El comportamiento sobre la tercera columna es similar al dado en el obstáculo anterior; sin embargo, en la esquiva se puede apreciar cómo un tiempo de procesamiento del obstáculo menor por parte del sistema genera una respuesta más afín a la del Simulador.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

Los datos concernientes al experimento real son los siguientes:

	x (m)	y (m)
Origen	10.44	0.84
Destino	-7.17	-0.02

Tabla 6.3: Parámetros de configuración del sistema



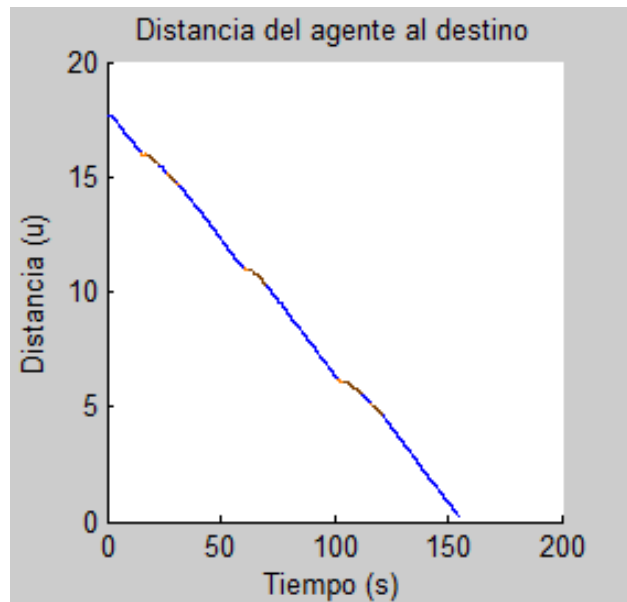
Gráfica 6.1: Porcentajes de tiempo en los diferentes estados del sistema

Distancia directa (m)	17.6416
Distancia recorrida (m)	19.0574
Distancia recorrida (%)	108.025

Tabla 6.4: Relación de distancias recorridas

Debido a la simplicidad del experimento, el sistema alcanza rápidamente el objetivo sin necesidad de realizar acciones que conlleven una gran pérdida de tiempo para el mismo.

Esto puede observarse en la gráfica 6.2, donde se pone de manifiesto que todas las acciones de esquiva realizadas son favorables para el acercamiento al objetivo<sup>66</sup>.



Gráfica 6.2: Representación de la distancia al objetivo con respecto al tiempo

<sup>66</sup> En adelante, denominaremos como Recorridos Pseudodirectos a aquellas trayectorias que por su predisposición sorteen fácilmente los conflictos a los que se enfrenten.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

### 6.2 Experimentos Simples

En ésta ocasión se ha sometido al algoritmo a la resolución de dos tipos de conflictos generados por cinco agentes en los que no existía ningún obstáculo fijo cercano.

#### 6.2.1 Cinco Agentes en Círculo

Para la realización de éste experimento se ha seleccionado una parte de la sala carente de columnas. En ella, se han emplazado los cinco Pioneer 3-AT formando un pentágono y programados para alcanzar las posiciones de un pentágono invertido de similares características.

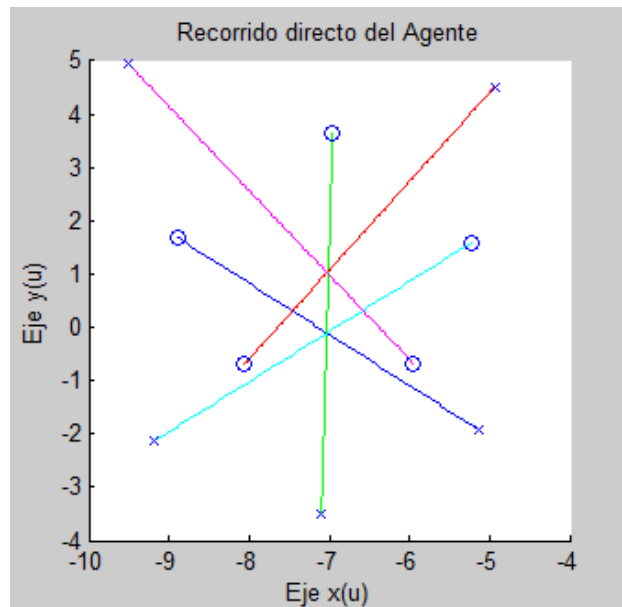


Figura 6.4: Recorridos de los agentes de no existir conflictos

Como puede verse en la figura 6.4, dicha distribución asegura la necesidad por parte de todos los agentes de contribuir a alcanzar una solución común, debido a que ninguno de ellos tiene una opción pseudo-directa<sup>67</sup> que le permita alcanzar el objetivo sin realizar grandes acciones de esquivas.

<sup>67</sup> Véase Apartado 6.1.1: Sorteando Columnas

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

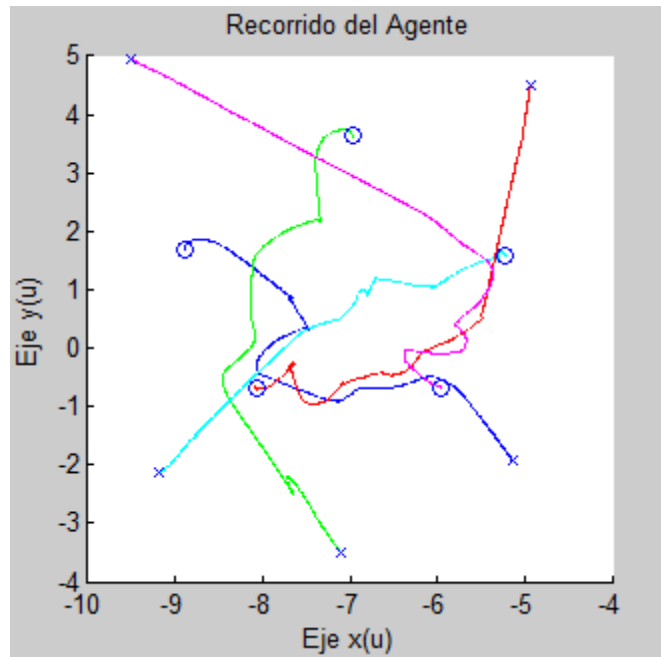
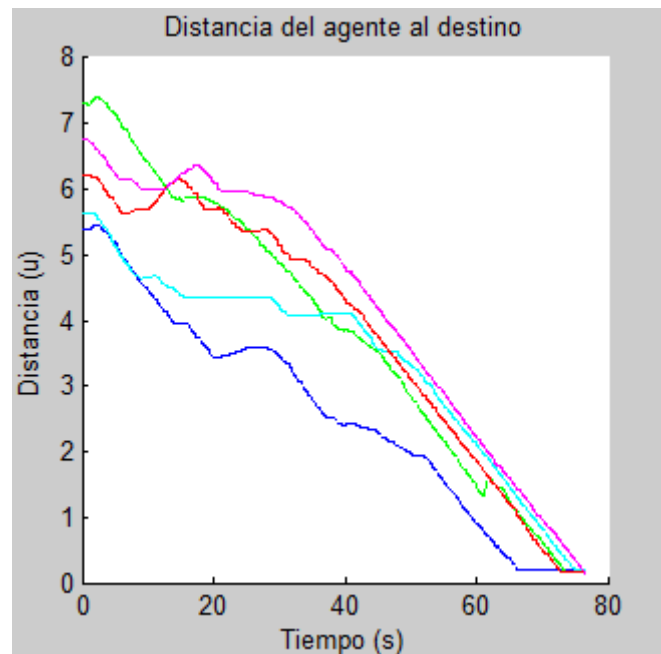


Figura 6.5: Resultado del Experimento

En la figura 6.5 se observa cómo los agentes al iniciar el experimento, han creado un sistema de intercambio de posiciones rotacional en sentido antihorario que ha derivado en una distribución sobre la que existe un camino directo para todos ellos hacia sus respectivos objetivos.



Gráfica 6.3: Representación de las distancias a los objetivos de los agentes con respecto al tiempo

En la gráfica 6.3 se pone de manifiesto cómo los agentes al realizar la acción de esquivar apenas se han visto obligados a alejarse de su objetivo.

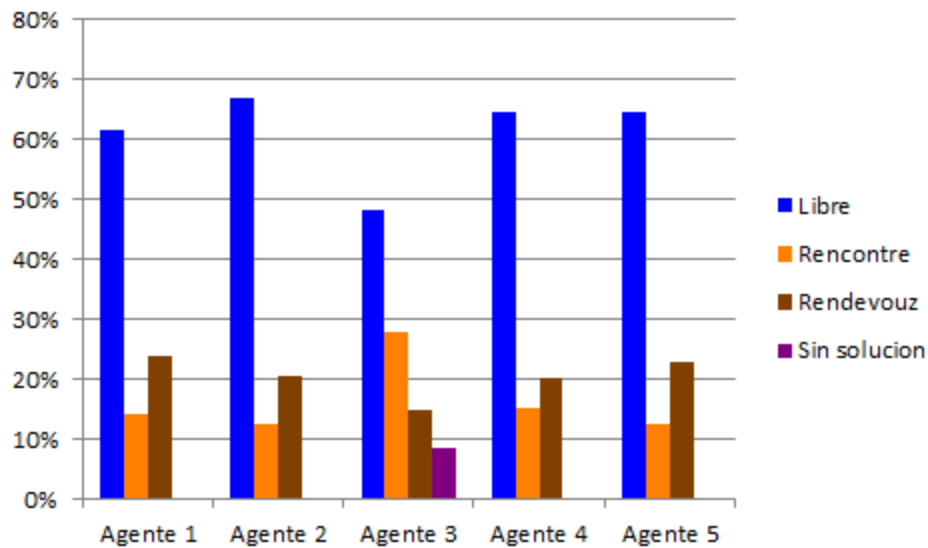
## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

	Pioneer I	Pioneer II	Pioneer III	Pioneer IV	Pioneer V
Distancia Directa (m)	5.39 m	7.29 m	5.65 m	6.21 m	6.76 m
Distancia Recorrida (m)	7.60 m	9.32 m	6.50 m	8.32 m	8.64 m
Distancia Recorrida (%)	140.99%	127.71%	115.19%	133.97%	127.87%

Tabla 6.5: Relación de Distancias Recorridas

Tanto en la tabla 6.5 como en la gráfica 6.3 se puede apreciar que la rotación sólo ha supuesto una forma de acercamiento menos directa, que ha permitido salvar el conflicto sin sacrificar demasiado la eficiencia del recorrido.

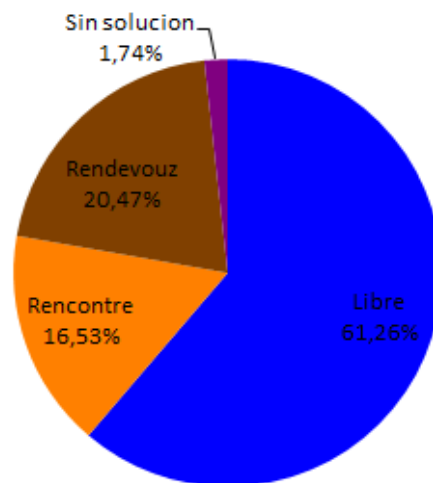
Los porcentajes del tiempo activo que los agentes han permanecido en cada estado han sido los siguientes:



Gráfica 6.4: Porcentajes de tiempo de los agentes en cada estado

	Media	Desviación
Libre	61,19%	7,49
Rencontre	16,51%	6,52
Rendezvous	20,45%	3,40
Sin solución	1,74%	3,89

Tabla 6.6: Media y Desviación de los porcentajes de los agentes en cada estado.



Gráfica 6.5: Representación de los porcentajes medios de cada agente en cada estado.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

Realizando la comparativa del experimento real con el simulador, el sistema arroja los siguientes resultados:

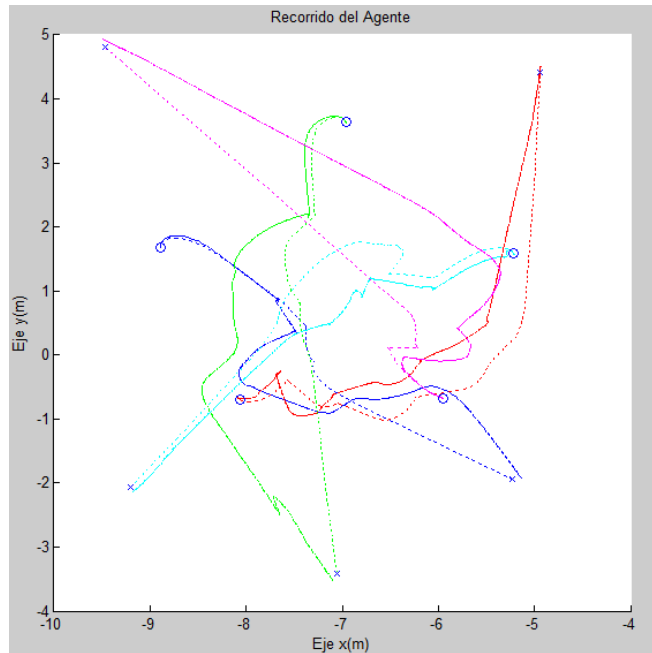


Figura 6.6: Recorridos real y virtual de los sistemas.

Sobre la figura 6.6 se observa cómo las tendencias de esquiva de los agentes reales (líneas continuas) y virtuales (líneas discontinuas) son similares, pero debido a los múltiples errores de posicionamiento<sup>68</sup>, a los diferentes tiempos de procesamiento y a la diferencia entre los Radios Reserved del sistema real<sup>69</sup> y virtual, algunas acciones de esquiva realizadas son más potentes en el laboratorio.

Éste hecho no supone problema alguno en la diferenciación entre ambos resultados, dado que si bien el Simulador realiza acciones que por lo general no obligan a los robots a alejarse tanto del destino, el sistema real no hace más que aumentar la seguridad de la solución obtenida, sacrificando algo más el recorrido óptimo, pero manteniendo una tendencia similar.

<sup>68</sup> El sistema de posicionamiento de los equipos se basa en la visión que tienen los láseres de las paredes y columnas. La forma de enfrentarlos utilizada genera amplias zonas de sombra para los mismos que se traducen en errores en posicionamiento. En el final del recorrido del agente 2 (de color verde) se pone de manifiesto la necesidad de hacer salto en la posición debido a dichos errores.

<sup>69</sup> Véase Apartado 6.1: Modelando el Simulador



## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

---

### 6.2.2 Cinco Agentes Confrontados

En éste experimento también se ha empleado la parte de la sala carente de obstáculos para emplazar a los cinco robots formando dos líneas paralelas enfrentadas.

Como puede apreciarse en la figura 6.7, las formaciones han sido programadas para avanzar en direcciones opuestas, enfrentándose de esta forma, ambas en la zona central que las separa.

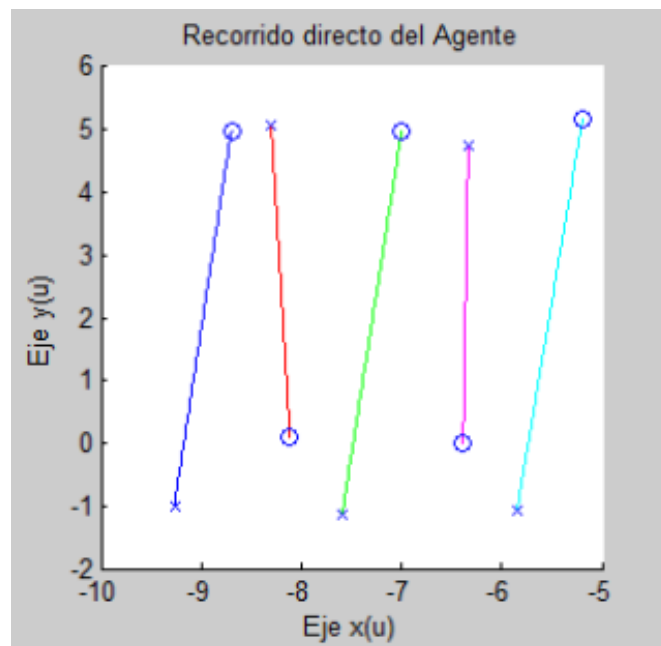


Figura 6.7: Recorridos de los agentes de no existir conflictos

La distancia de separación en los orígenes de los agentes es tal que les permite conservar la formación en caso de no encontrar conflictos en su avance, pero también lo suficientemente pequeña como para que cualquier encuentro implique al menos a tres agentes.

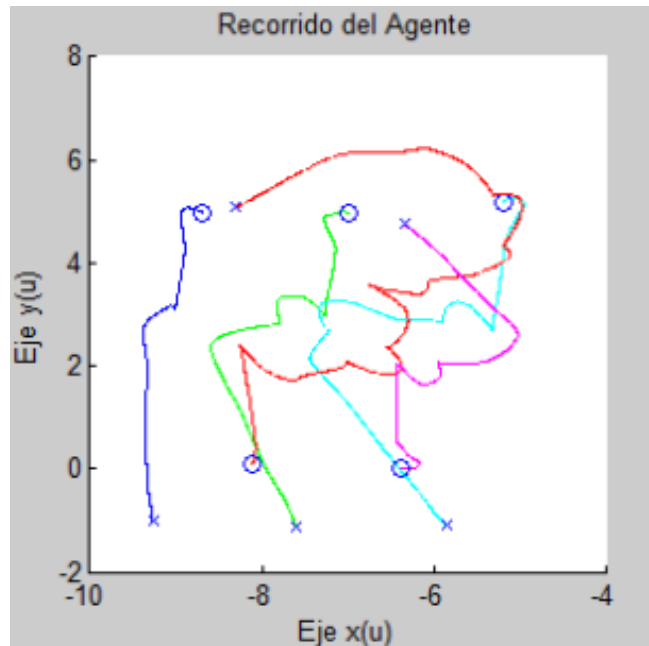
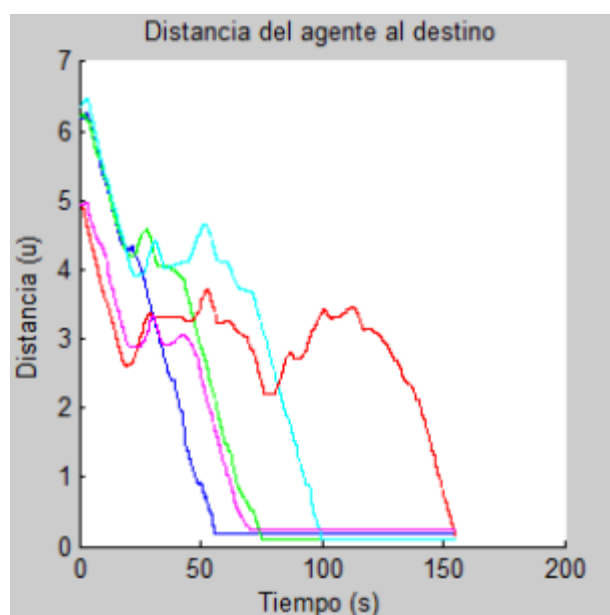


Figura 6.8: Resultado del Experimento

Las trayectorias tomadas por los Pioneer, reflejadas en la figura 6.8, muestran cómo el recorrido pseudo-directo del agente uno (línea azul) le permite rápidamente escapar de la zona de conflicto sin apenas variar la tendencia de su trayectoria.

En la solución conjunta generada, se aprecia cómo el agente cuatro (línea roja) sale muy perjudicado en cuanto a eficiencia del recorrido, debido a que su objetivo se encuentra situado en una zona muy cercana a la masificación de agentes.



Gráfica 6.6: Representación de las distancias a los objetivos de los agente con respecto al tiempo

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

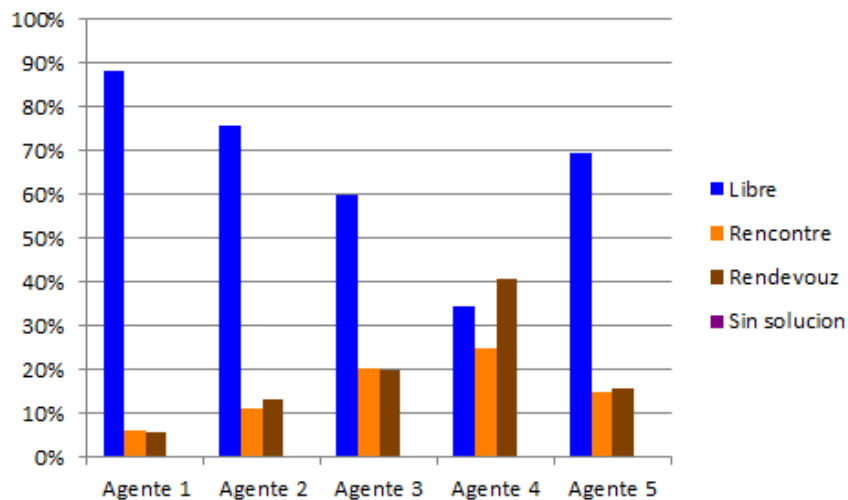
	Pioneer I	Pioneer II	Pioneer III	Pioneer IV	Pioneer V
Distancia Directa (m)	6.18 m	6.21 m	6.37 m	4.93 m	4.94 m
Distancia Recorrida (m)	6.70 m	8.15 m	10.30 m	14.29 m	7.26 m
Distancia Recorrida (%)	108.50%	130.97%	161.78%	290.07%	146.87%

Tabla 6.7: Relación de Distancias Recorridas

Sobre la gráfica 6.6 y la tabla 6.5 se pone de manifiesto los problemas mencionados sobre el agente cuatro.

Dicha problemática podría reducirse si los objetivos de los agentes se encuentran mucho más alejados entre si, dado que el verdadero problema del Pioneer IV, ha sido tener que rodear al Pioneer V una vez que éste había alcanzado su objetivo; presentándose para el mismo como un obstáculo estático.

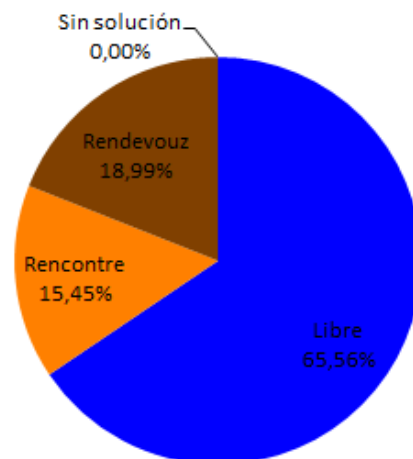
Los porcentajes de tiempo que los agentes han permanecido en cada estado se detallan en las siguientes gráficas:



Gráfica 6.7: Porcentajes de tiempo de los agentes en cada estado

	Media	Desviación
Libre	65,48%	20,27
Rencontre	15,43%	7,45
Rendezvous	18,97%	13,24
Sin solución	0,00%	0,00

Tabla 6.8: Media y Desviación de los porcentajes de los agentes en cada estado.



Gráfica 6.8: Representación de los porcentajes medios de cada agente en cada estado.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

En la comparativa con el Simulador, el experimento obtiene los siguientes resultados:

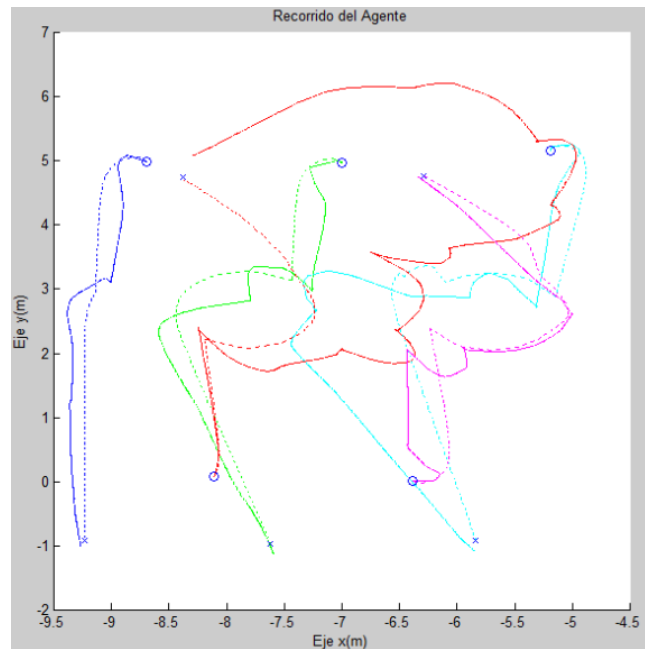


Figura 6.9: Recorridos real y virtual de los sistemas.

Sobre la figura 6.6 puede observarse cómo en ésta ocasión, las acciones de esquiva simuladas, al ser menos amplias que las reales, han provocado que el agente cuatro (línea discontinua roja) no llegue a toparse en su recorrido con el agente tres (línea discontinua celeste), provocando que ambos no se vean obligados a esquivarse y haciendo que los recorridos virtuales de dichos agentes disten un poco más de la realidad.

Por contra, el resto de agentes simulados, a pesar de verse también influenciados por la falta de potencia en las esquivas, vemos que marcan la misma tendencia que los reales.

Esto se debe a que los Pioneer, una vez realizada la esquiva y debido a su amplitud de reacción, se liberan de los encuentros colindantes, retornando hacia los mismos al intentar volver a retomar su orientación hacia el destino.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

---

### 6.3 Experimentos Complejos

Para concluir, se ha sometido al sistema a dos conflictos en los que dos de las columnas del laboratorio de experimentación están implicadas.

Con ellos se pretende demostrar la eficiencia del algoritmo incluso bajo condiciones adversas, donde la labor de elaborar una solución rotacional conjunta se ve entorpecida por los obstáculos mencionados.

#### 6.3.1 Cruce con Columnas

Éste experimento tiene una disposición de partida similar al experimento denominado “Cinco Agentes en Círculo”<sup>70</sup>, con la salvedad de que el punto de cruce de las trayectorias libres se centra en el (0,0).

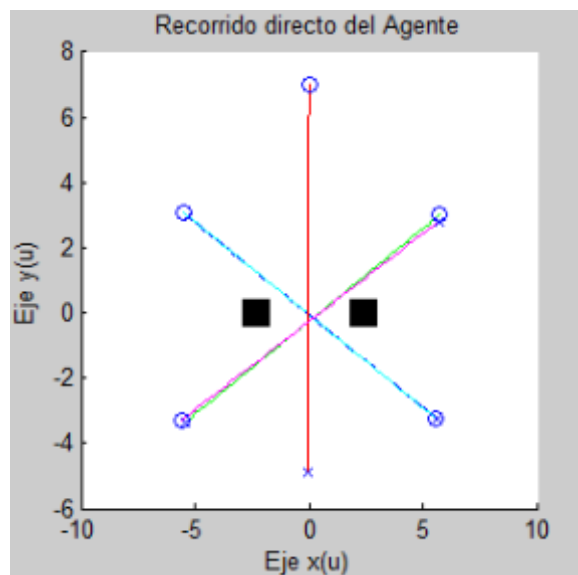


Figura 6.10: Recorridos de los agentes de no existir conflictos

Esto introduce sobre el problema global las columnas que se sitúan a izquierda y derecha de dicho punto, y que cuatro de los cinco agentes habrían de esquivar incluso en caso de no existir otros robots en el sistema.

---

<sup>70</sup> Véase Apartado 6.2.1: Cinco Agentes en Círculo.

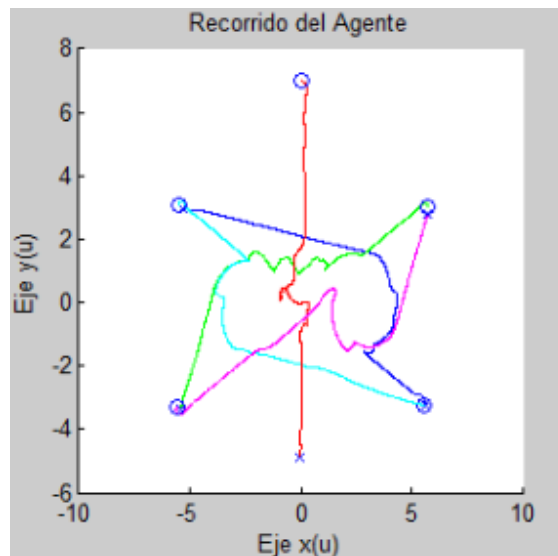
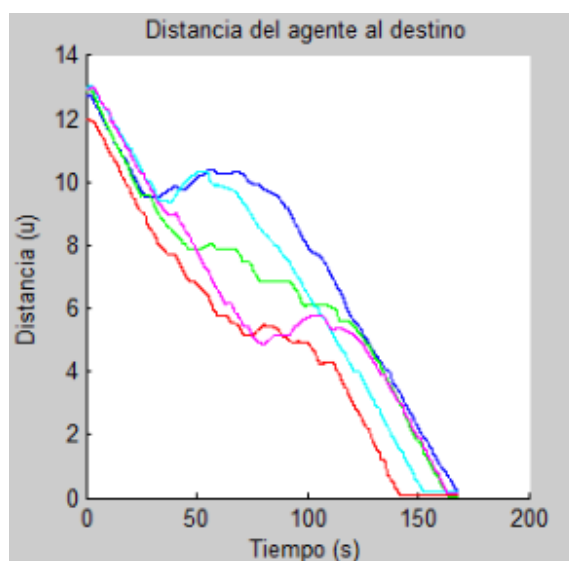


Figura 6.11: Resultado del Experimento

El resultado del experimento, reflejado en la figura 6.8, muestra cómo el sistema construye automáticamente un mecanismo de rotación que contempla a los obstáculos estáticos en su interior.

Sobre la solución, cabe destacar que los obstáculos son sorteados automáticamente, recorriendo unas trayectorias similares a las que podría proponer un algoritmo de planificación de rutas, que tuviese de alguna forma modelada la posible masificación que se generaría entre ambas columnas.

Dicha premisa no sólo es asumible a priori por el hecho de que la zona de reunión de todos los agentes se centra en dicho punto, sino porque además, el agente cuatro (línea de color rojo), debido a su predisposición, alcanzaría esta zona por defecto, obligando a los otros agentes a rodear exteriormente las columnas.



Gráfica 6.9: Representación de las distancias a los objetivos de los agentes con respecto al tiempo

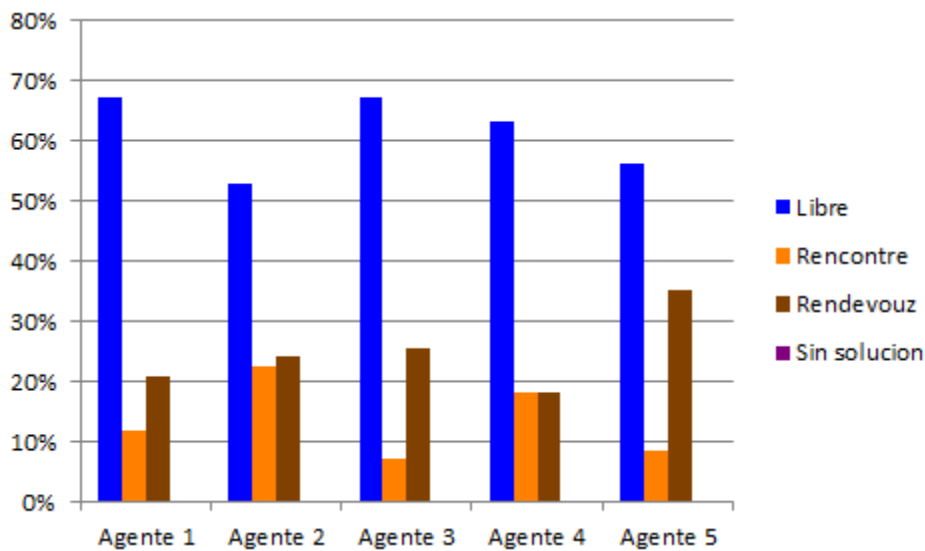
## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

	Pioneer I	Pioneer II	Pioneer III	Pioneer IV	Pioneer V
Distancia Directa (m)	12.70 m	12.92 m	13.03 m	11.97 m	12.92 m
Distancia Recorrida (m)	16.94 m	16.31 m	16.99 m	14.69 m	17.47 m
Distancia Recorrida (%)	133.37%	126.23%	130.36%	122.72%	135.21%

Tabla 6.9: Relación de Distancias Recorridas

La representación de las distancias con respecto al tiempo (gráfica 6.8) junto con las medidas de las distancias recorridas (tabla 6.7) revelan cómo las acciones de esquiva de los agentes no suponen un incremento importante en el recorrido a realizar.

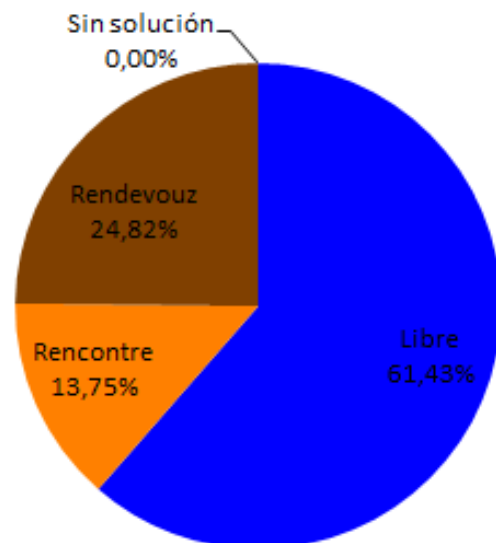
En éste caso, los porcentajes de tiempo correspondientes a cada estado de la máquina de estados de los agentes es el siguiente:



Gráfica 6.10: Porcentajes de tiempo de los agentes en cada estado

	Media	Desviación
Libre	61,40%	6,55
Rencontre	13,74%	6,57
Rendezvous	24,80%	6,44
Sin solución	0,00%	0,00

Tabla 6.10: Media y Desviación de los porcentajes de los agentes en cada estado.



Gráfica 6.11: Representación de los porcentajes medios de cada agente en cada estado.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

La comparación de las trayectorias generadas por el Simulador con las generadas por los Pioneer en el TestBed es la siguiente:

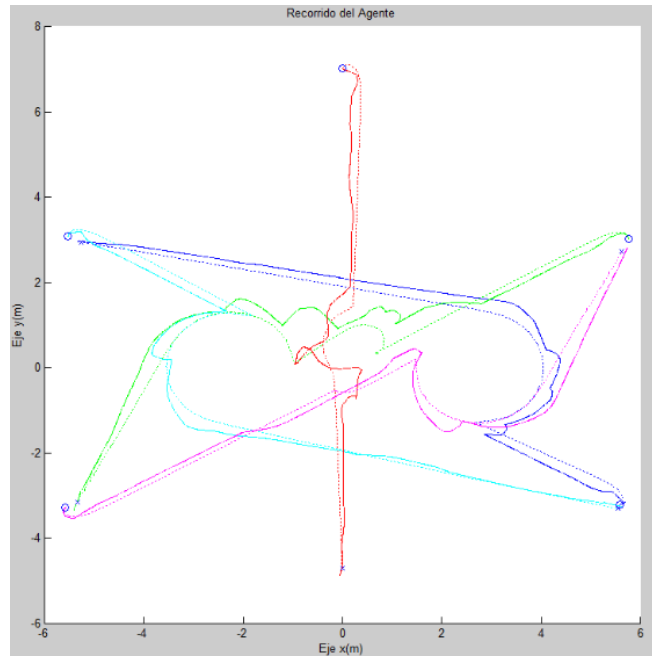


Figura 6.12: Recorridos real y virtual de los sistemas.

La figura 6.9 pone de manifiesto cómo el Simulador recrea las trayectorias de los agentes con encuentros sobre los obstáculos estáticos y dinámicos con una muy alta fiabilidad.

Esto se debe sobre todo a que la posición estática de las columnas introduce una menor indeterminación en los tiempos de reacción, haciendo que los  $R_d$  del Simulador modelen de una forma muy eficiente dichos tiempos.

Además de ello, el introducir las columnas entre los agentes hace que las sombras de las mismas (que no influyen negativamente en el posicionamiento<sup>71</sup>) eliminen en gran medida las zonas de sombra creadas por los otros agentes (que si introducen indeterminaciones en el cálculo de la posición), consiguiendo un conocimiento más preciso de la posición de cada uno con respecto del tiempo.

---

<sup>71</sup> Las columnas son obstáculos estáticos sobre los que se apoya el filtro de partículas para el cálculo de la posición.



## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

---

### 6.3.2 En Formación con Columnas

Éste experimento emplaza a los agentes en una distribución similar a la anterior, pero a diferentes distancias del punto de conflicto.

Con ello, se pretende estudiar la solución que se genera al introducir tiempos de llegada diferentes sobre el mismo problema anterior.

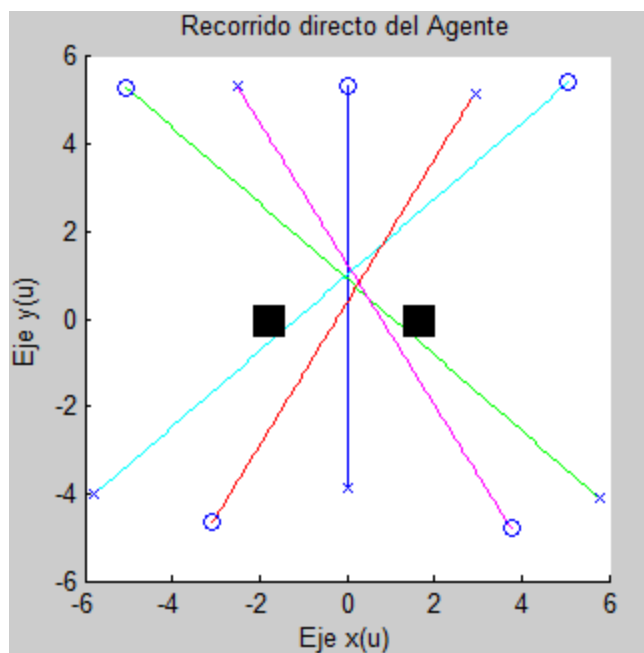


Figura 6.13: Recorridos de los agentes de no existir conflictos

Además de ello, se ha descentrado el punto de conflicto, obligando a romper la tendencia rotacional anteriormente formada<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> Véase Apartado 6.3.1: Cruce con columnas

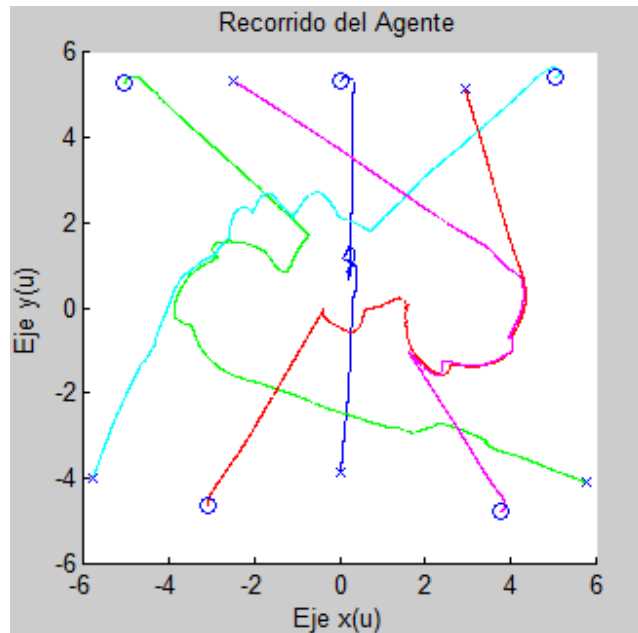
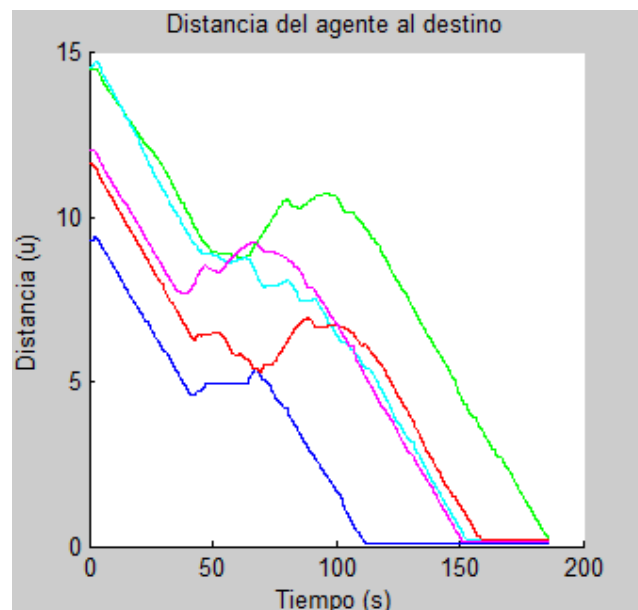


Figura 6.14: Resultado del Experimento

Sobre el resultado del experimento representado en la figura 6.11, puede observarse cómo la solución rotacional creada es similar a la generada sobre el experimento “Cruce con columnas”<sup>73</sup>, con la salvedad de que el desplazamiento en el punto de conflicto ha degenerado la rotación haciendo que los agentes cuatro (línea color rojo) y cinco (línea color rosa) invadan más la zona central de la sala, obligando a los mismos tomar las acciones de esquiva de las columnas de forma más tardía, empeorando la eficiencia de los recorridos.



Gráfica 6.12: Representación de las distancias a los objetivos de los agentes con respecto al tiempo

<sup>73</sup> Véase Apartado 6.3.1: Cruce con columnas

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

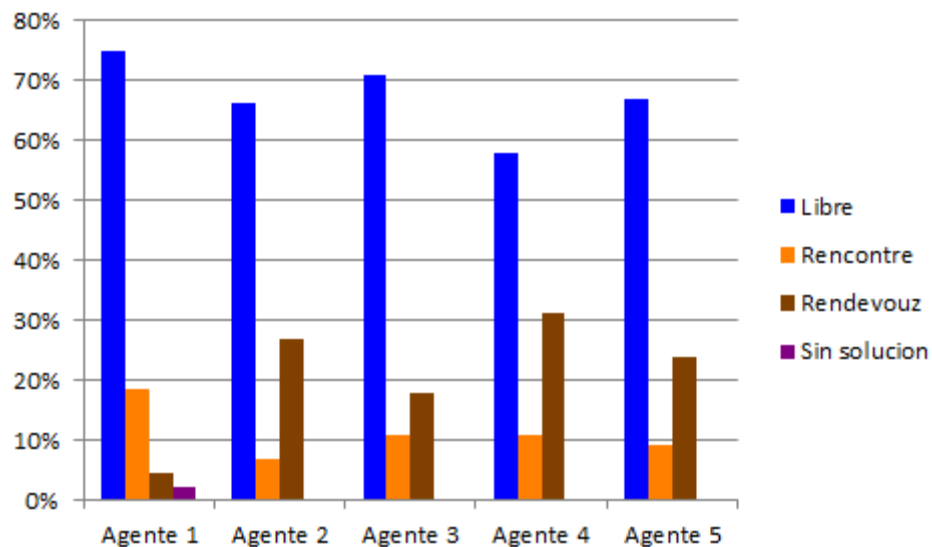
	Pioneer I	Pioneer II	Pioneer III	Pioneer IV	Pioneer V
Distancia Directa (m)	9.28 m	14.50 m	14.57 m	11.64 m	12.03 m
Distancia Recorrida (m)	11.64 m	22.09 m	18.17 m	18.72 m	17.60 m
Distancia Recorrida (%)	125.34%	152.32%	124.69%	160.92%	146.24%

Tabla 6.11: Relación de Distancias Recorridas

Al comparar los resultados arrojados por el experimento (tabla 6.11) con los del experimento anterior (tabla 6.9) se observa cómo la mínima variación de la zona de conflicto, unida a la diferenciación de los tiempos de llegada, han hecho que el sistema pase de recorrer una media de un 129.57% del recorrido total<sup>74</sup> a una media de 141.90%.

Esto pone de manifiesto la posible mejora a aportar por parte de un nivel superior al centralizar los conflictos sobre zonas donde las soluciones rotacionales generadas por el sistema no se vean muy entorpecidas por los obstáculos del mapa.

Los porcentajes de tiempo en los que han permanecido las diferentes máquinas de estado durante el transcurso del experimento han sido los siguientes:



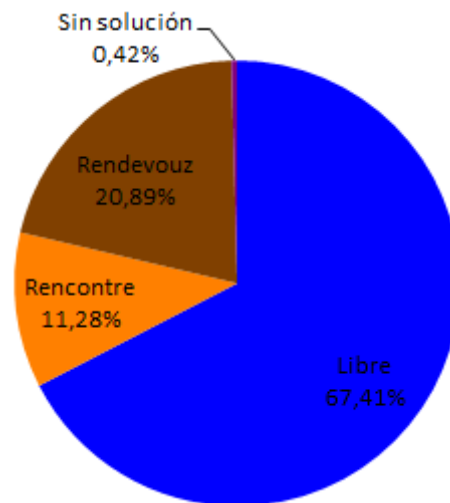
Gráfica 6.13: Porcentajes de tiempo de los agentes en cada estado

<sup>74</sup> Media de los porcentajes de distancia recorrida en el experimento "Cruce con columnas". Véase apartado 6.3.1: Cruce con columnas.

## Capítulo 6. Experimentos en TestBed

	Media	Desviación
Libre	67,37%	6,40
Rencontre	11,27%	4,37
Rendezvous	20,88%	10,37
Sin solución	0,42%	0,93

Tabla 6.12: Media y Desviación de los porcentajes de los agentes en cada estado.



Gráfica 6.14: Representación de los porcentajes medios de cada agente en cada estado.

Al comparar los experimentos reales con los resultados en el simulador, se observan los siguientes recorridos:

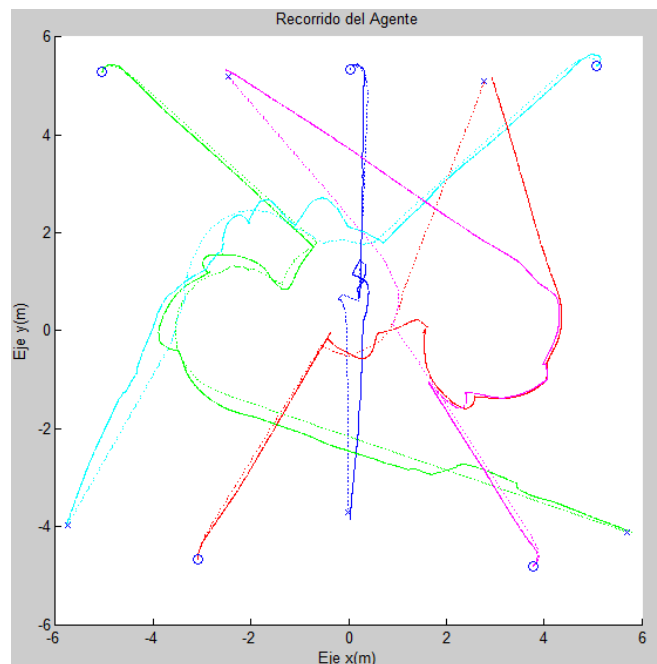


Figura 6.15: Recorridos real y virtual de los sistemas.

Sobre éstos resultados se observa cómo continúa la precisión apreciada en el experimento anterior para los agentes uno (línea azul), dos (línea verde) y tres (línea celeste), debido a que las condiciones son similares en ambos casos.

Sin embargo se aprecia cómo el  $R_d$  del simulador juega una mala pasada sobre el sistema, debido a que ni el agente cuatro (línea roja) ni el agente cinco (línea rosa) llegan en ningún momento a provocar el encuentro con la columna derecha, resolviendo el conflicto sin necesidad de aplicar la esquivada sobre la misma.