

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Simulación del Flujo de Pasajeros en una Estación de
Autobuses

Autor: Raúl García Pila

Tutor: José María del Castillo Granados

Departamento de Ingeniería y Ciencia de los
Materiales y del Transporte

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Simulación del Flujo de Pasajeros en una Estación de Autobuses

Autor:

Raúl García Pila

Tutor:

José María del Castillo Granados

Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Simulación del Flujo de Pasajeros en una Estación de Autobuses

Autor: Raúl García Pila

Tutor: José María del Castillo Granado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

RESUMEN

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado es el cálculo de la máxima capacidad de la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” de Sevilla, mediante una simulación realizada con el programa matemático Matlab®. Para ello, aumentaremos progresivamente la frecuencia de llegada de los autobuses a la estación hasta conseguir que la cola formada a la entrada de la misma sea excesiva; debido a la inexistencia de dársenas disponibles. Además, habrá de tenerse en cuenta diferentes conflictos que, a priori, limitan la capacidad de la estación. Ensayaremos distintos escenarios, obteniendo para cada uno ellos con qué frecuencia de llegada a la estación se alcanza la capacidad máxima de ésta.

ABSTRACT

The purpose of this Final Degree Work is the calculation of the maximum capacity of the bus station " Plaza de Armas " in Seville, through a simulation performed with the Matlab® mathematical program. Gradually will increase the frequency of arrival of buses to the station to get the the queue formed at the entrance to the station is excessive; due to the lack of docks available. In addition, various conflicts appear limit the ability of the station shall be taken into account. We rehearse different situations, getting for each of them whit what frequency arrival at the station this maximum capacity is reached.

ÍNDICE

1. - ESTACIÓN DE AUTOBUSES “PLAZA DE ARMAS”	14
1.1. - INTRODUCCIÓN	14
1.2. - LOCALIZACIÓN	14
1.3. - DIMENSIONES	15
1.4. - CONFLICTOS.....	16
2. - SIMULACIÓN	17
2.1. - INTRODUCCIÓN	17
2.2. - DATOS SOBRE LOS AUTOBUSES.....	17
2.3. - EXPLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN	18
2.4. - MODELO COMPLETO	24
2.5. - CONDICIONES INICIALES.....	27
2.6. - CONDICIONES DE AVANCE	28
3. - ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD.....	33
4. - RESULTADOS	35
4.1. - Escenario 1.....	35
4.2. - Escenario 2.....	36
4.3. - Escenario 3.....	38
4.4. - Escenario 4.....	39
4.5. - Escenario 5.....	41
4.6. - Escenario 6.....	42
4.7. - Escenario 7.....	44
4.8. - Escenario 8.....	45
5. - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	48
6. - CONCLUSIONES	49
7. - BIBLIOGRAFÍA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. - Localización “Plaza de Armas”	15
Figura 2. - Localización “Plaza de Armas”	15
Figura 3. - Dimensiones de la estación	16
Figura 4. - Dimensiones dársena	16
Figura 5. - Determinación radio de giro	18
Figura 6. - Posiciones a ocupar por los autobuses	20
Figura 7. - Representación autobús	21
Figura 8. - Vector de Ocupación	22
Figura 9. - Avance de un autobús	23
Figura 10. - Trayectoria de los autobuses	26
Figura 11. - Formación colas	28
Figura 12. - Conflicto entrada/salida de la estación.....	29
Figura 13. - Bloqueo entrada estación.....	30
Figura 14. - Bloqueo salida estación	30
Figura 15. - Bloqueo estacionamiento.....	31
Figura 16. - Bloqueo abandono dársena.....	31
Figura 17. - Bloqueo entrada	33
Figura 18. - Escenarios de estudio	34
Figura 19. - Dársenas ocupadas escenario 1	35
Figura 20. - Autobuses en cola escenario 1.....	36
Figura 21. - Histograma dársenas ocupadas escenario 1	36
Figura 22. - Dársenas ocupadas escenario 2	37
Figura 23. - Autobuses en cola escenario 2.....	37
Figura 24. - Histograma dársenas ocupadas escenario 2	38
Figura 25. - Dársenas ocupadas escenario 3	38
Figura 26. - Autobuses en cola escenario 3.....	39
Figura 27. - Histograma dársenas ocupadas escenario 3	39
Figura 28. - Dársenas ocupadas escenario 4	40
Figura 29. - Autobuses en cola escenario 4.....	40
Figura 30. - Histograma dársenas ocupadas escenario 4	41
Figura 31. - Dársenas ocupadas escenario 5	41
Figura 32. - Autobuses en cola escenario 5.....	42

Figura 33. - Histograma dársenas ocupadas escenario 5	42
Figura 34. - Dársenas ocupadas escenario 6	43
Figura 35. - Autobuses en cola escenario 6.....	43
Figura 36. - Histograma dársenas ocupadas escenario 6	44
Figura 37. - Dársenas ocupadas escenario 7	44
Figura 38. - Autobuses en cola escenario 7.....	45
Figura 39. - Histograma dársenas ocupadas escenario 7	45
Figura 40. - Dársenas ocupadas escenario 8	46
Figura 41. - Autobuses en cola escenario 8.....	46
Figura 42. - Histograma dársenas ocupadas escenario 8	47

1. - ESTACIÓN DE AUTOBUSES “PLAZA DE ARMAS”

1.1. - INTRODUCCIÓN

La Estación de Autobuses “Plaza de Armas” se inauguró el 31 de marzo de 1.992 con motivo de la celebración en Sevilla de la Exposición Universal que tuvo lugar ese mismo año y ante la necesidad de dotar a la ciudad de una terminal de autobuses acorde a tal evento.

Está dotada de 43 dársenas o andenes desde los cuales realizan su salida los autobuses de las 20 empresas que operan desde la estación hacia distintos puntos de la geografía provincial, autonómica, nacional e internacional.

Presta servicios a gran parte del Aljarafe sevillano, Sierra Norte de Sevilla, Huelva con sus pueblos y sus playas, Córdoba, Jaén, Granada, Málaga y Almería. Tiene destinos muy diversos: Extremadura, Madrid, Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Castilla-León, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana, Cataluña y Murcia.

Hay que destacar los servicios que se realizan a otros países y la diversidad de las ciudades a las que hay conexión desde la estación de autobuses: Portugal, Francia, Bélgica, Alemania, Inglaterra, Rumanía, Bulgaria, Ucrania y Marruecos.

Actualmente, la actual concesionaria del contrato de explotación de la Estación de Autobuses Plaza de Armas es NEX CONTINENTAL HOLDINGS, S.L.U., en virtud de Acuerdo del Comité Ejecutivo del Consorcio de Transporte Metropolitano del Área de Sevilla de fecha 25 de febrero de 2014.

Progresivamente, esta estación se ha ido convirtiendo en una de las opciones más importantes para el viajero que quiere acceder a la ciudad de Sevilla. Es por eso que, en las inmediaciones de la estación, además de contar con una parada de taxis, hay varias paradas de autobuses urbanos que comunican la Estación de Autobuses Plaza de Armas con la otra terminal Prado San Sebastián, con la estación de ferrocarril Santa Justa e incluso con el aeropuerto.

1.2. - LOCALIZACIÓN

La Estación de Autobuses “Plaza de Armas” se localiza al Oeste de Sevilla capital, en la Av. Cristo de la Expiración, esquina con la calle Torneo.



Figura 1. - Localización “Plaza de Armas”

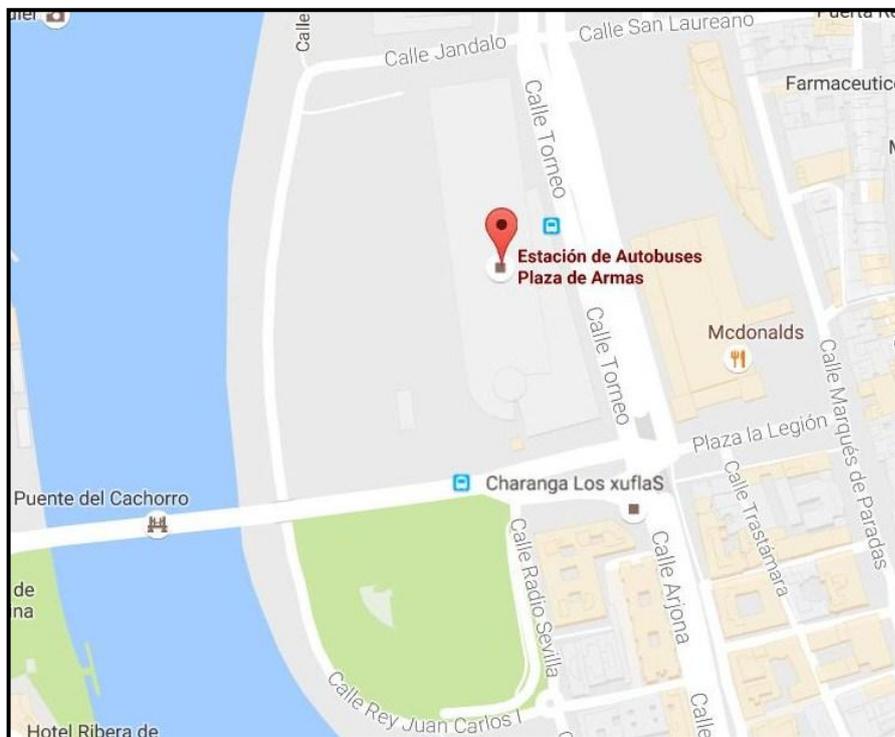


Figura 2. - Localización “Plaza de Armas”

1.3. - DIMENSIONES

En las figuras siguientes, se mostrará, por un lado, las dimensiones que presenta la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” y por otro, el tamaño de las dársenas de estacionamiento. En ambas, las medidas están expresadas en metros.

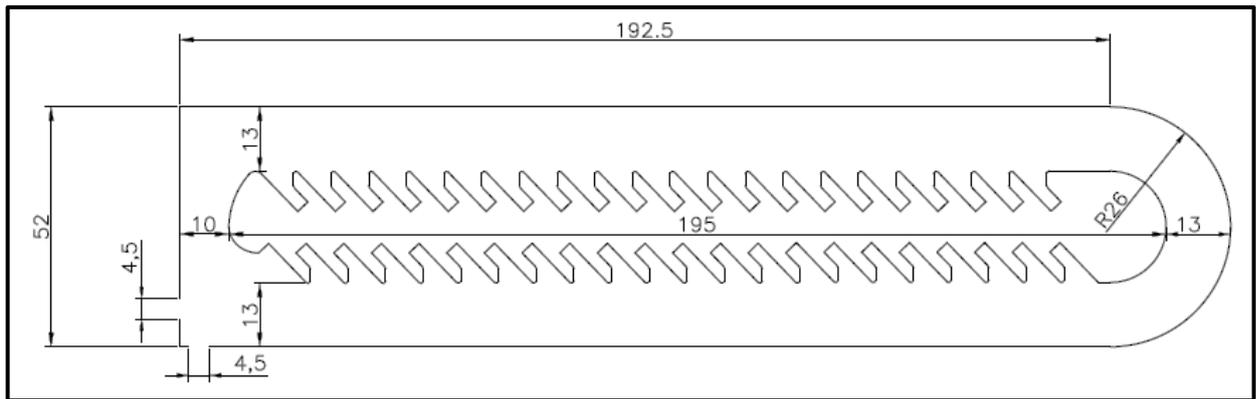


Figura 3. - Dimensiones de la estación

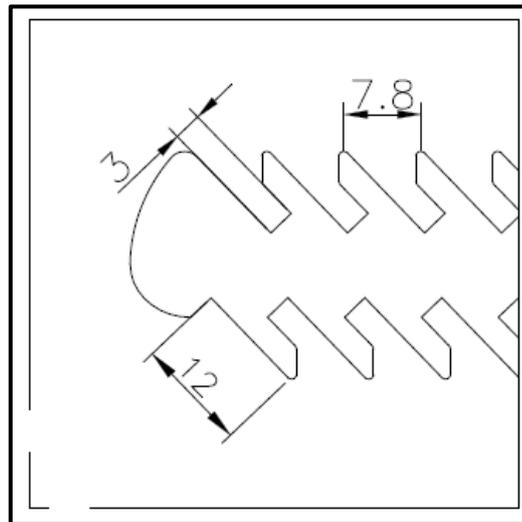


Figura 4. - Dimensiones dársena

1.4. - CONFLICTOS

La Estación de Autobuses “Plaza de Armas” cuenta con algunos conflictos que, a priori, parecen limitar la capacidad máxima de la misma o incluso que dicha capacidad máxima sea alcanzada en un periodo de tiempo menor.

Uno de ellos es el cuello de botella que se forma a la entrada y salida de la estación. Esto es debido a que ambas, entrada y salida, se realizan por la misma zona cortándose sus trayectorias; impidiendo que se puedan dar las dos situaciones de forma simultánea. Ante ello, la política de la estación es dar preferencia a los autobuses que desean abandonar la estación frente a los que están llegando a la misma, provocando la formación de cola a la entrada de la Estación de Autobuses.

Otro conflicto a tener en cuenta es que la política de la estación es dar preferencia al autobús que está realizando la maniobra de dejar libre la dársena frente al que se encuentra en circulando. Esto provoca que se vaya formando cola detrás de este último mientras el autobús estacionado abandona completamente la dársena y se reincorpora a la circulación. La causa de esto es que el ancho de la estación no es suficiente para permitir las dos situaciones a la vez; si bien es cierto que, en caso de avería o necesidad de notificar al conductor información de última hora, sí se produce dicho rebase pero solo por parte de otros autobuses que se encuentren circulando.

2. - SIMULACIÓN

2.1. - INTRODUCCIÓN

La simulación de los autobuses circulando dentro de la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” ha sido realizada con ayuda del programa matemático Matlab®.

Simular el desplazamiento de un objeto en el plano a través de una trayectoria fijada de ante mano no es más que modificar la posición del objeto en cuestión en cada iteración; creando la sensación de que el objeto se mueve a lo largo de su trayectoria.

Por ello, en primero lugar, es necesario definir las distintas posiciones que puede ocupar nuestro objeto, formando la trayectoria o trayectorias deseadas. Posteriormente, mediante la generación de un algoritmo, debemos ser capaces de que éste reconozca la posición del objeto y lo avance hasta la siguiente posición posible. Repitiendo este algoritmo en cada iteración conseguimos crear la simulación del objeto moviéndose a lo largo de un recorrido, fijado con antelación.

2.2. - DATOS SOBRE LOS AUTOBUSES

Antes de centrarnos en la explicación de nuestra simulación, es necesario definir distintas características de los autobuses que operan en la estación, haciendo una pequeña aclaración inicial: a pesar de que el tamaño de los distintos autobuses que realizan su parada en la estación no es el mismo, hemos considerado que todos ellos son de la misma dimensión ya que esto no influye en el objeto de nuestro trabajo además de disminuir de forma considerable la carga cuantitativa y cualitativa del mismo.

Es por ello que todos los autobuses miden 12 metros de largo y 2.5 metros de ancho. Además, la distancia entre la parte posterior del autobús y el eje trasero es de 3 metros; siendo 3.3 metros si hablamos de la parte delantera de éste.

Así mismo, únicamente hemos tenido en cuenta los autobuses de corto recorrido, es decir, aquellos que conectan los pueblos de Sevilla, como Gines, Valencina, Salteras, etc., con la capital.

Para determinar el radio de giro mínimo de un autobús solo necesitamos saber la posición de las ruedas y el máximo ángulo que permite la rueda delantera interior en el giro. Conocido este ángulo, trazamos una perpendicular al mismo, por el centro de dicha rueda, hasta cortar la prolongación del eje trasero del autobús. La distancia entre dicha intersección y el punto medio del eje trasero es el mínimo radio de giro que permite el autobús.

Conocida la posición de cada eje, al conocer la distancia que existe entre éstos y la parte delantera o trasera del autobuses, y sabiendo que el máximo ángulo de la rueda delantera interior en el giro es de 52.5° , el mínimo radio de giro que permite un autobús de estas características es 5.36 metros. Para nuestro proyecto, hemos considerado que todos los giros tendrán un radio de 7 metros a excepción de la curva de la derecha que presenta un radio de 18.5 metros.

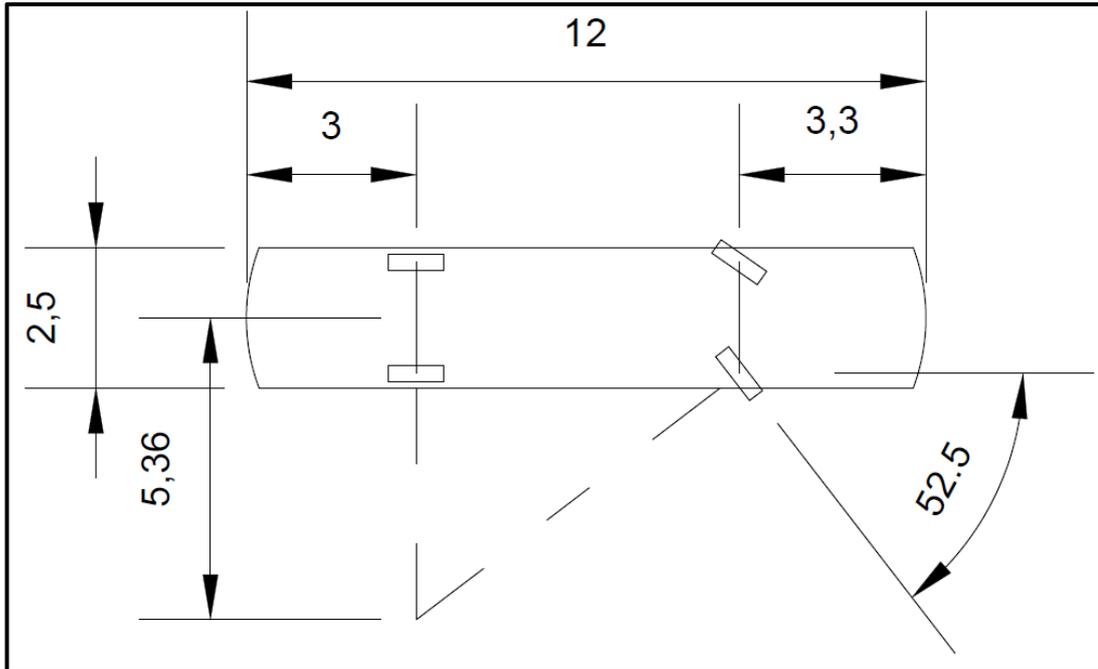


Figura 5. - Determinación radio de giro

Aunque la velocidad no es una característica propiamente dicha de los autobuses, la incluiremos en este apartado. La velocidad máxima dentro de la estación es de 10 km/h. Por simplificación, hemos supuesto que la velocidad es constante en todo el recorrido, aunque sí bien es cierto que distinguimos dos velocidades a lo largo del mismo. Por un lado, tenemos la Velocidad de Circulación de aproximadamente 9 km/h; es la velocidad a la cual se desplazan los autobuses por la estación. Por otro lado, encontramos la Velocidad de Maniobra, de aproximadamente 7km/h; esta velocidad es mantenida durante los cambios de dirección (giros) así como durante las maniobras de estacionamiento y abandono de las dársenas.

El hecho de que las velocidades no las hayamos tomado exactas se explicará en apartados posteriores.

2.3. - EXPLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Como hemos definido con anterioridad, a la hora de programar una simulación es imprescindible definir en primer lugar las distintas posiciones a ocupar por los distintos objetos a simular. También hemos aclarado que, a pesar de distinguir dos tipos de velocidades, ésta será constante a lo largo de todo el desplazamiento por la estación. Para que dicha velocidad sea constante es necesario que la distancia entre las distintas posiciones que pueden ocupar los objetos sean equidistantes unas con las otras, de manera que en cada iteración, instante de tiempo, avancemos la misma longitud.

Centrándonos en nuestro proyecto, dicho objetos serán los autobuses, los cuales representaremos por rectángulos de 12 metros de longitud y 2.5 metros de ancho. Además, cada iteración representará un intervalo de tiempo de un segundo. De esta forma, la distancia que recorre cada autobús en los cambio de posición es equivalente a la velocidad de circulación de los autobuses.

Como consecuencia de la distinción de velocidades, es necesario definir dos tipos de posiciones: Posiciones de Circulación y Posiciones de Maniobra.

Las Posiciones de Circulación son aquellos puntos que puede ocupar un autobús durante su recorrido, siempre y cuando no realice cambios de dirección o maniobras de estacionamiento y abandono de las dársenas. Dichas posiciones se encontrarán a una distancia de 2.6 metros, de forma que la velocidad de circulación sea 9.4km/h

(inferior a la máxima velocidad permitida dentro de la estación). Este intervalo entre posiciones es un tercio de la distancia entre dársenas.

Las Posiciones de Maniobra, por el contrario, serán aquellas no definidas en las Posiciones de Circulación, es decir, aquellas posiciones que contemplen cambios de dirección o maniobras de estacionamiento y abandono de las dársenas. Todas ellas se encontrarán a una equidistancia de 2 metros unas de las otras, es decir, a la largo de estas posiciones los autobuses circularán a 7.2 km/h.

Aprovechamos que estamos trabajando sobre un plano de la planta de la estación para definir las distintas posiciones en coordenadas cartesianas. Definimos la Matriz de Posición como la matriz donde se encuentran recogidas todas las posiciones, tanto las de Circulación como las de Maniobra, formando una matriz de tantas filas como posiciones existentes y dos columnas; en la primera está recogida la componente X de cada posición, siendo la segunda columna reservada para la componente Y.

Una vez tenemos definidas las distintas posiciones que pueden ocupar nuestros autobuses, procederemos al diseño de los mismos.

En primer lugar, tomaremos que la posición ocupada por los distintos autobuses es en realidad la ocupada por el punto medio de sus ejes traseros. A continuación, obtendremos el punto medio de la parte delantera y trasera de los autobuses, sabiendo que la distancia al eje trasero es 9 y 3 metros, respectivamente. Finalmente, conocidos estos dos últimos puntos, calcularemos las posiciones de las cuatro esquinas de los autobuses; las cuales se encuentran a 1.25 metros de ellos.

Procederemos ahora a desarrollar con más detenimiento cómo se ha llevado a cabo el cálculo de los diversos puntos necesarios para la representación de los autobuses. Para completar la explicación nos apoyaremos en la Figura 7.

Para poder determinar el punto medio de la parte delantera y trasera de los autobuses es imprescindible conocer la dirección y sentido que están llevando los mismos. Esto lo conseguimos obteniendo, en primer lugar, la pendiente formada entre las posiciones ocupadas (círculo negro de la Figura 7.) y las posiciones anteriores a éstas (círculo rojo de la Figura 7.), para posteriormente conocer el ángulo formado entre ellas, θ . Conocido el ángulo y la distancia al eje trasero, podemos calcular, aplicando relaciones trigonométricas simples, la posición del punto medio de la parte delantera y trasera de los autobuses (círculos azul de la Figura 7.).

Debido a la necesidad de conocer la posición anterior a la ocupada por un autobús para determinar la pendiente, la primera posición posible que éste puede ocupar es la número 2; ya que si lo situamos en la posición 1, daría error al no existir una posición anterior a ella.

Por último, para hallar las cuatro esquinas que conforman el autobús (círculos verde de la Figura 7.) aplicaremos nuevamente relaciones trigonométricas sencillas, imponiendo que el eje formado por cada pareja de puntos (las dos esquinas delanteras y las dos de la parte de atrás del autobús) sea perpendicular al eje resultante de unir los puntos medios previamente calculados. Recordando que el ancho de los autobuses es de 2.5 metros, la distancia desde las esquinas hasta los puntos medio debe ser la mitad, es decir, 1.25 metros.

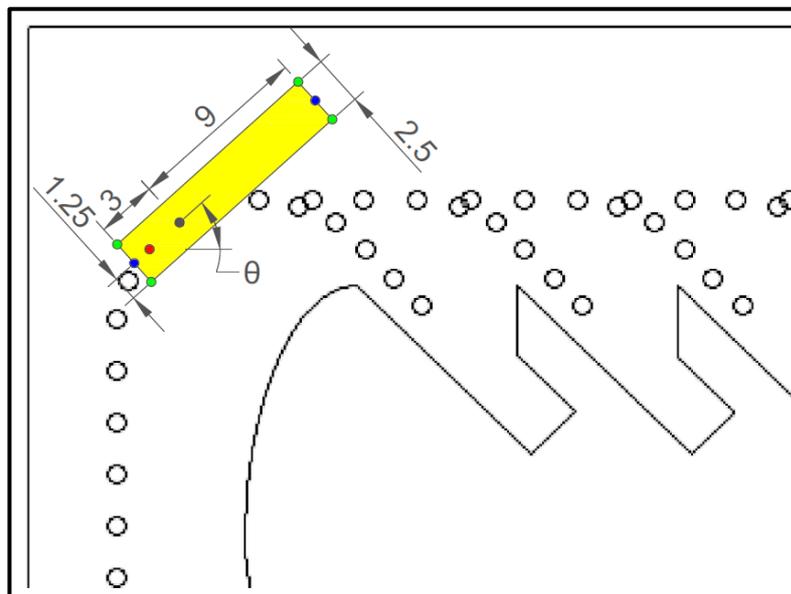


Figura 7. - Representación autobús

Tras haber definido las distintas posiciones que pueden ocupar los autobuses y procedido a la explicación de cómo se ha llevado a cabo su representación, nos centraremos ahora en detallar el desarrollado de la

simulación, propiamente dicha.

Antes de comenzar la explicación recordaremos que la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” cuenta con un total de 43 dársenas. Es por ello, que en nuestro modelo hemos creado 43 trayectorias diferentes, es decir, una por cada dársena existente. A la hora de explicar cómo hemos llevado a cabo la simulación, no existe diferencia entre una y 43 dársenas (entre una y 43 trayectorias), por lo que supondremos que solo tenemos una trayectoria para facilitar de esta forma la explicación. En el apartado posterior se comentarán las particularidades de considerar todas las dársenas presentes en la estación.

Procedemos a continuación al desarrollo de la aplicación.

Tras haber definido las distintas posiciones que pueden ocupar los autobuses, crearemos un vector de ceros cuyo número de componentes sea igual al número de posiciones existente en nuestra trayectoria. Dicho vector lo denominaremos Vector de Ocupación. Éste recoge la información sobre las posiciones que están ocupando los autobuses, la cual es trasladada a la Matriz de Posición; matriz que contiene las coordenadas cartesianas de las distintas posiciones. Conociendo las coordenadas en las que se encuentran nuestros autobuses, los representemos gráficamente mediante un rectángulo de 12 metros de largo y 2.5 metros de ancho, como hemos mencionado con anterioridad.

La información recogida por el Vector de Ocupación se expresa de la siguiente forma:

- 0: en dicha posición no encontramos ningún autobús.
- 1: la posición en cuestión está siendo ocupada por un autobús.

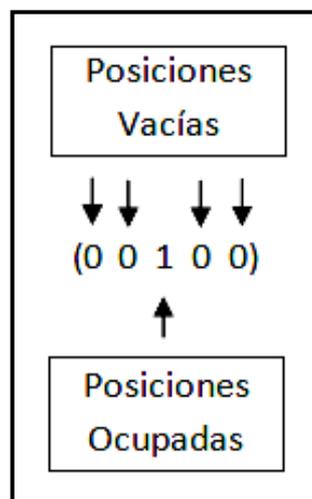


Figura 8. - Vector de Ocupación

Para apoyar la explicación de cómo partiendo del Vector de Ocupación representamos los autobuses en la estación, nos ayudamos del siguiente ejemplo:

Supondremos que solo existen dos autobuses, es decir, en el Vector de Ocupación solo existen dos componentes con valor igual a 1, siendo las demás componentes de valor cero; esas componentes son la 3 y la 15, por ejemplo. Una vez tenemos localizadas esas componentes, nos iremos a la Matriz de Posición y buscaremos aquellas filas que correspondan con las componentes escogidas, es decir, de la Matriz de Posición solo nos interesa la información contenida en las filas 3 y 15. Gracias a ello, conocemos las posiciones, en ejes cartesianos, que están ocupando los autobuses, o mejor dicho, como ya aclaramos con anterioridad, las posiciones del punto medio del eje trasero de los autobuses. Conocidos estos puntos, ya podemos representar los autobuses en las posiciones que están ocupando.

Para crear la sensación de que los autobuses se desplazan por la estación, es decir, para llevar a cabo la simulación en sí, debemos, en cada iteración, avanzar las distintas posiciones que están ocupando los

autobuses. Esto se consigue identificando dichas posiciones, es decir, buscando en el Vector de Ocupación aquellas componentes en la que exista un 1, para posteriormente trasladar esos 1 a la componente justamente posterior.

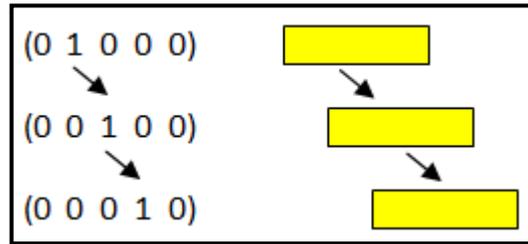


Figura 9. - Avance de un autobús.

Para poder avanzar un autobuses, es decir, para poder avanzar una componente de valor 1 del Vector de Ocupación, es necesario que se cumplan unas series de condiciones, como que no haya algún autobús delante, por ejemplo, que explicaremos en apartados posteriores.

Por último, se ha desarrollado un contador para conseguir que los autobuses permanezcan estacionados en las dársenas un determinado tiempo de estacionamiento, previamente establecido. Para ello, es necesario definir un vector de ceros de tantas componentes como dársenas existen denominado Contador. Dado que la explicación la estamos realizando como si solo existiese una única dársena, nuestro vector Contador únicamente tendrá una componente.

La manera que tiene de trabajar el contador programado es la siguiente: en primer lugar, comprobará si el autobús se encuentra estacionado en la dársena. Para ello, habrá que comprobar que en la componente del Vector de Ocupación correspondiente a esa posición existe un 1. Si es así, el contador se pondrá en marcha de forma que, en cada iteración, aumente en una unidad su valor hasta alcanzar un valor máximo establecido de antemano. Dicho valor corresponde al tiempo de estacionamiento que debe permanecer el autobús en la dársena. Mientras el valor de Contador sea menor o igual al tiempo de estacionamiento establecido, el autobús permanecerá en la dársena sin abandonarla. Transcurrido ese tiempo, el autobús dejará libre la dársena y el valor de Contador volverá a ponerse a cero, a la espera de que otro autobús la ocupe.

La forma de bloquear el autobús para que no abandone la dársena antes de tiempo, así como permitir la salida libre de éste del estacionamiento se explicará en apartados posteriores.

Para finalizar este apartado correspondiente a la explicación del modelo adoptado para desarrollar la simulación, procederemos a mencionar, a modo de resumen, los pasos a seguir:

- 1) Definir el número de iteraciones que va a desarrollar nuestro modelo; número de veces que queremos que se repita el planteamiento elegido.
- 2) Localizar las posiciones que están siendo ocupadas por los autobuses, es decir, buscar las componentes de valor 1 del Vector de Posición.
- 3) Representar los autobuses en sus respectivas posiciones.
- 4) Identificar si alguna de las componentes ocupadas se corresponde a una posición de estacionamiento en la dársena. En caso que así sea:
 - Si el contador es menor o igual al tiempo de estacionamiento establecido, impedir que el autobús abandone la dársena.
 - Si el contador es mayor que el tiempo de estacionamiento establecido, permitir la salida del autobús de la dársena y volver el contador a cero cuando éste la haya abandonado completamente, es decir, cuando el autobús se reincorpore a la circulación.

- 5) Verificar que se cumplen todas las condiciones de avance, las cuales se explicarán en apartados posteriores.
- 6) Avanzar los autobuses hacia la siguiente posición, en caso que las condiciones de avance lo permitan.
- 7) Repetir los puntos 2) a 6) para cada iteración.

2.4. - MODELO COMPLETO

Antes de comenzar este apartado es importante explicar la forma de trabajo de Matlab®. El programa matemático Matlab® únicamente trabaja con matrices, de forma que para Matlab®, un escalar no es más que una matriz de una fila y una columna. Igualmente, aunque esto es más intuitivo, un vector no es más que una matriz donde, o bien la fila o bien la columna, vale 1, ya sea un vector fila o un vector columna. Además, la manera que tiene Matlab® de leer estas matrices es por columna. Aclaremos esto con un ejemplo:

Sea una matriz A 5×5 , por ejemplo, tenemos dos formas de acceder a sus componentes: bien de forma bidimensional, es decir, indicando fila y columna o bien de forma unidimensional, que es como Matlab® trabaja. Como hemos comentado, Matlab® lee las matrices por columna, de forma que el elemento 1 (forma unidimensional) se corresponde con el elemento (1,1) (expresado de forma bidimensional). De esta forma, el elemento 2 se corresponde con el (2,1),..., el elemento 6 (unidimensional) con el (1,2) (bidimensional) y así sucesivamente hasta el último elemento, el 25, que se corresponde con el (5,5).

En este apartado, desarrollaremos el modelo completo, es decir, tendremos en cuenta las 43 dársenas existentes en la estación, remarcando las diferencias respecto al modelo anterior.

Al existir ahora 43 dársenas diferentes es necesario plantear 43 trayectorias diferentes; una para cada dársena. Por tanto, ahora ya no podemos hablar de Matriz de Posición y sí de Matrices de Posición, las cuales estarán formadas por tantas filas como posiciones tiene cada trayectoria (todas con igual número de posiciones) y tantas columnas como número total de trayectorias haya, es decir, 43. Una de las Matrices de Posición contendrá la componente X de cada posición, siendo la segunda matriz reservada para la componente Y.

Como todas las trayectorias están superpuestas, como podemos comprobar en la imagen mostrada a continuación, podemos dividir las trayectorias en dos; una común para todas las dársenas, denominada Ruta Exterior, y otra particular para cada una de ellas, Ruta Dársena.

Esta división de las trayectorias presenta una doble función. Por un lado, liberar de memoria al programa, y por otro, aprovechar el tránsito de Ruta Exterior a Ruta Dársena para asignar, de forma aleatoria, las dársenas a ocupar por los distintos autobuses conforme alcanzan dicha transición. Para ello, es importante saber qué dársenas están ya ocupadas y cuáles de ellas, sin estar ocupadas, ya han sido seleccionadas por algún autobús que está circulando hacia ellas. Todo esto evitará que dos autobuses estacionen en la misma dársena simultáneamente. Sin embargo, sí está permitido que una dársena recién abandonada vuelva a ser ocupada, de forma inmediata, por otro autobús ya que esto no influye en el cálculo de la capacidad máxima de la estación.

Debido a esta división, habrá que hacer dos planteamientos idénticos; uno para los autobuses que están circulando por la Ruta Exterior y otro para los que se encuentran en la Ruta Dársena. Cada planteamiento tendrá su propio Vector de Ocupación así como su propia Matriz de Posición, como ahora veremos.

Dicha Ruta Exterior, al ser común para todas las trayectorias, será únicamente un vector de tantas componentes como posiciones tiene la Ruta Exterior. Por tanto, el planteamiento a seguir es el mismo que el desarrollado en el apartado anterior.

Sin embargo, para la Ruta Dársena tenemos algunas diferencias que hay que solventar para conseguir que el planteamiento de ambas situaciones sea idéntico. Ya hemos comentado que, al tener más de una trayectoria, hablamos de Matrices de Posiciones y no de Matriz de Posición. Aplicando lo mencionado al

comienzo de este apartado, podemos pasar de matriz a vector (y de vector a matriz) sin que se pierda información. Gracias a esto, podemos convertir las Matrices de Posición en vectores y conformar la Matriz de Posición (tantas filas como posiciones totales existen en las 43 trayectorias de la Ruta Dársena y dos columnas, una primera para la componente X y la segunda para la componente Y).

Al finalizar la Ruta Dársena, volvemos a juntas todas las trayectorias, de manera que los distintos autobuses abandonen la estación sobre la Ruta Exterior; común para todos.



Figura 10. - Trayectoria de los autobuses.

Siguiendo el planteamiento inicial, y por el mismo motivo que con las Matrices de Posición, no podemos hablar de Vector de Ocupación, sino que tenemos que hablar de Matriz de Ocupación. De nuevo aplicaremos lo comentado al comienzo de este apartado para pasar de Matriz de Ocupación a Vector de Ocupación, encontrándonos de nuevo con la misma situación idéntica y pudiendo aplicar el planteamiento inicial. En esta ocasión tenemos que hacer una pequeña corrección ya que tenemos que identificar en el Vector de Ocupación el final de una trayectoria y el inicio de la siguiente para evitar que, tras finalizar en una de ellas comience en la siguiente en lugar de abandonar la estación.

Si nos centramos ahora en el estacionamiento de los autobuses, la diferencia entre el planteamiento original, de una única trayectoria, y el planteamiento real, considerando todas las dársenas, es que el vector Contador está formado por 43 componentes. Como es lógico, la forma de trabajo es exactamente la misma.

Por último, para permitir el avance de los autobuses es necesario cumplir las mismas condiciones de avance que en la situación inicial (considerando una sola dársena), pero extrapolándolas a un total de 43 dársenas.

2.5. - CONDICIONES INICIALES

Una vez descrito el modelo, a falta de las condiciones de avance que explicaremos en apartados posteriores, definiremos las condiciones iniciales de nuestra simulación.

En primer lugar, será necesario determinar la frecuencia de llegada de los autobuses. Para ello, partiendo de los intervalos de llegada medidos en la estación, y gracias a una distribución Gamma, obtendremos otros nuevos, aleatorios, a introducir en nuestro programa.

En estadística, la distribución Gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros, k y λ , cuya función de densidad para valores $x > 0$ es

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(x)}$$

Aquí “e” es el número e y Γ es la función Gamma. Para valores de k perteneciente a los Naturales, la función Gamma es

$$\Gamma(k) = (k - 1)!$$

Los intervalos de llegada observados son los que se muestran a continuación; expresados en segundos.

[40, 40, 13, 7, 89, 69, 21, 57, 188, 87, 96, 112, 7, 6, 7, 21, 9, 74, 103, 47, 48, 57, 85, 7, 6, 75, 10, 307, 85, 16, 157, 6, 32, 50, 90, 323, 58, 34, 12, 126, 40, 7, 6, 96, 13, 49, 7, 8, 31, 12]

Conformando un total de 50 mediciones.

Estos intervalos los introduciremos en la función de Matlab® “gamfit” gracias a la cual obtendremos los dos parámetros necesarios de una distribución Gamma; la media y la desviación típica. Estos dos parámetros los incluiremos en la función de Matlab® “gamrnd” dando como resultado los intervalos de llegada aleatorios deseados; expresados también en segundos.

[63, 16, 10, 66, 33, 217, 106, 13, 116, 109, ..., 50]

Con los intervalos obtenidos podemos conocer el tiempo medio de llegada de los autobuses a la estación; 58.6 segundos.

Los tiempos de estacionamiento, igualmente aleatorios, los determinaremos empleando el mismo planteamiento, es decir, partiremos de los anotados en la estación para posteriormente obtener otros nuevos aleatorios que introduciremos en la aplicación.

Los medidos en la estación son los que se muestran a continuación; expresados en minutos.

[20, 16, 23, 15, 9, 12, 11, 13, 16, 15, 12, 10, 9, 30, 15, 13, 13, 16]

En total se han anotado 18 resultados.

Siendo los obtenidos mediante una distribución Gamma, expresados también en minutos,

[15, 21, 8, 23, 14, 16, 14, 20, 14, 14, ..., 11]

Los autobuses se encuentran estacionados en sus dársenas una media de 14.8 minutos.

Los tiempos de estacionamiento calculados tendremos que pasarlo a segundo ya que es como estamos operando con la aplicación; cada iteración se corresponde con un segundo.

Así mismo, hemos tenido en cuenta también como condición inicial el número máximo de autobuses estacionados durante la toma de datos; 33 dársenas ocupadas. Las componentes del vector Contador correspondiente a estas dársenas no empezarán a cero, sino que tendrán como valor inicial un tiempo aleatorio entre cero y el tiempo de estacionamiento establecido para cada una de ellas. De esta forma consideramos que estos autobuses llevan ya un tiempo en la estación cuando empiezan a llegar los nuevos.

Volvemos a recordar que todos ellos son de corto recorrido, es decir, solo se desplazan por la provincia de Sevilla.

2.6. - CONDICIONES DE AVANCE

Como hemos mencionado en apartados anteriores, es necesario que se cumplan una serie de condiciones para permitir que los autobuses avancen a lo largo de sus respectivas trayectorias. El objetivo de esto es impedir que se produzcan colisiones entre ellos mismos. Para ello, daremos preferencia a unos autobuses frente a otros.

Las condiciones que se tienen que verificar para permitir que los autobuses avancen son los que se muestran a continuación.

Tendremos que comprobar que no tenemos autobuses delante con los cuales podemos colisionar si avanzamos. Para ello, observaremos el Vector de Ocupación y confirmaremos que el número de componentes entre dos autobuses, es decir, entre dos 1 consecutivos, es suficiente para evitar el choque de los mismo. De manera empírica hemos comprobado que para evitar esto, es necesario que existan 5 componentes entre dos posiciones ocupadas por los autobuses. Cuando nos encontremos en la Ruta Dársena, dicha verificación deberá extenderse a las 43 trayectorias presentes en el modelo, de forma que se cumpla la misma separación entre autobuses con independencia de la trayectoria en la que se encuentren.

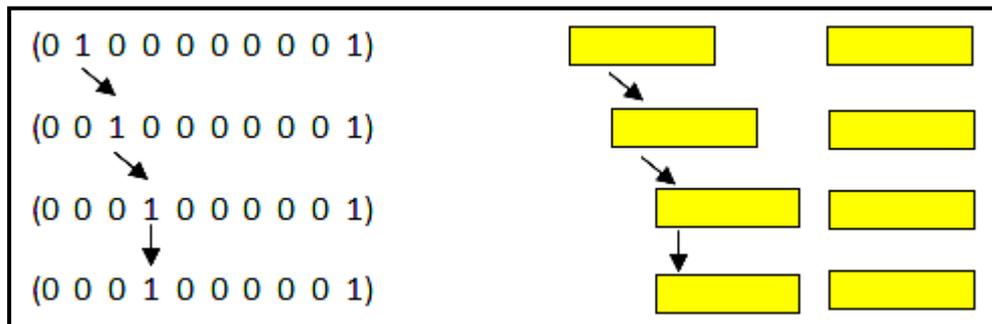


Figura 11. - Formación colas.

Estas condiciones de avance sirven también para evitar el conflicto encontrado a la entrada y salida de los autobuses dando preferencia a los autobuses que salen sobre los que entran, de forma que es necesario

preguntar si algún autobús quiere salir antes de avanzar otro que desee entrar en la estación. Sin embargo, puede darse la situación contraria, es decir, cuando un autobús se encuentre en disposición de abandonar la estación, otro que esté entrando en la misma ya se encuentre situado en la intersección, por lo que también tendremos que considerar esta situación y comprobar si es posible avanzar la posición de un autobús con intención de marcharse de la estación. De esta forma, nos encontramos ante dos nuevas condiciones, en función de la situación que nos hallemos, que tendremos que cumplir.

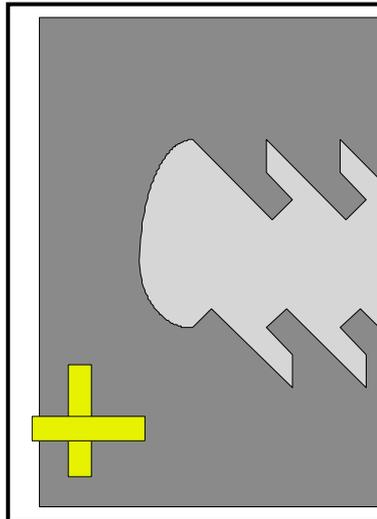


Figura 12. - Conflicto entrada/salida de la estación

Si nos centramos ahora en los autobuses que se encuentran estacionados en sus dársenas, existen otras dos condiciones. Por un lado, está el contador en sí, explicado con anterioridad, y por otro, tenemos que comprobar que no se hallan autobuses circulando en el momento de dejarla libre. Si bien es cierto que a pesar de que el autobús que abandona la dársena tiene preferencia sobre el que se encuentra circulando, puede darse la situación que tras finalizar el tiempo de estacionamiento, exista un autobuses transitando por detrás, por lo que impediremos el avance del autobús estacionado y, por tanto, el abandono de la dársena al no cumplirse una de las condiciones. Así mismo, al encontrarse las dársenas en la Ruta Dársena, será necesario verificar que por ninguna de las 43 trayectorias están circulando autobuses, de forma que se permita un libre abandono de la misma colisión.

La forma de conseguir que se cumplan estas condiciones de avance es mediante las relaciones de preferencia, abordando además las situaciones en las que dichas relaciones se vean alteradas.

Recordemos que el Vector de Ocupación estaba formado por componentes cuyo valor podía ser 1 ó 0 en función de si esa posición estaba siendo ocupada o no por un autobús. Para poder continuar con la explicación será necesario definir un valor más. Siguiendo con la numeración, dicho valor será el 2. Éste, lo emplearemos a modo de bloqueo de forma que si la posición siguiente a la ocupada por algún autobús es un 2, impidamos que este último avance, manteniéndose en la misma posición hasta que dicho bloqueo desaparezca, es decir, hasta que la posición ocupada por el 2 vuelva a ser un 0, indicando que dicha posición se encuentra vacía.

Tras definir la forma de generar los bloqueos, detallaremos como intervienen éstos en las relaciones de preferencia y por tanto, en la verificación de las condiciones que permiten el avance de los distintos autobuses por sus respectivas trayectorias.

Comenzaremos abordando el conflicto a la entrada y salida de la estación. Hemos comentado que los autobuses que deseen abandonar la estación tiene preferencia sobre los que pretenden acceder a ella, por lo que cuando un autobús que está saliendo de la estación se encuentre próximo a la intersección, debemos

bloquear la entrada de forma que ningún autobús pueda entrar, evitando de esta forma la colisión de los mismos. Sin embargo, puede darse la situación contraria, es decir, cuando un autobuses que quiera abandonar la estación se aproxime a la intersección, otro la está ya ocupando. En este caso, la relación de preferencia se ha visto alterada ya que el autobús que debemos bloquear es el que está saliendo la estación. A la hora de colocar el bloqueo correspondiente, es decir, a la hora de colocar el valor 2 en una determinada componente del Vector de Ocupación, debemos tener en cuenta las dimensiones de los autobuses para que, aun estando bloqueados, no se produzca la colisión.

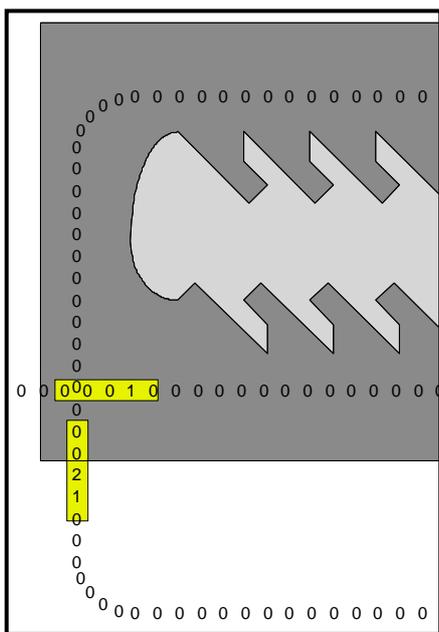


Figura 13. - Bloqueo entrada estación

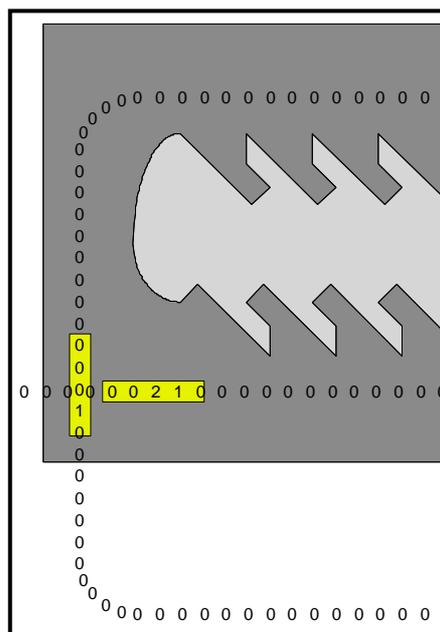


Figura 14. - Bloqueo salida estación

Para el caso de los autobuses estacionado en sus dársenas tenemos que emplear dos bloqueos diferentes; uno impidiendo que la abandonen y otro impidiendo la circulación por detrás de los autobuses aparcados.

Hemos mencionado con anterioridad que mientras el contador sea menor o igual que el tiempo de estacionamiento establecido, debemos permanecer en la dársena sin abandonarla. Para conseguir esto, tenemos que bloquear la siguiente posición a la del estacionamiento, es decir, colocar un 2 en la correspondiente componente del Vector de Posición para impedir que el autobús avance durante, como mínimo, el periodo de estacionamiento establecido. Además, si cumplido dicho tiempo existen autobuses, con independencia de la trayectoria a la que pertenezcan, circulando por detrás de la dársena ocupada, debemos seguir bloqueando el abandono de ésta a fin de evitar un choque entre ambos autobuses.

Puesto que un autobús estacionado tiene preferencia sobre el que está circulando por detrás, cuando el contador esté próximo al tiempo de estacionamiento establecido bloquearemos la circulación tras la dársena a abandonar; permitiendo la salida libre y sin colisión. Al igual que antes, la posición del bloqueo se ha obtenido de forma empírica para que, aun estando bloqueados los autobuses, no se produzca la colisión. Al tener nuestro modelo un total de 43 trayectorias diferentes, debemos impedir la circulación por cualquiera de ellas cuando nos encontremos en la situación de abandono de la dársena.

Así mismo, hemos considerado que en caso de que dos dársenas consecutivas estén ocupadas y ambas vayan a ser abandonadas al mismo tiempo, dotaremos de preferencia a la situada más a la derecha, en el sentido de la circulación. Para ello, bloquearemos la dársena situada a la izquierda hasta que el autobuses dotado de preferencia haya terminado de completar la maniobra.

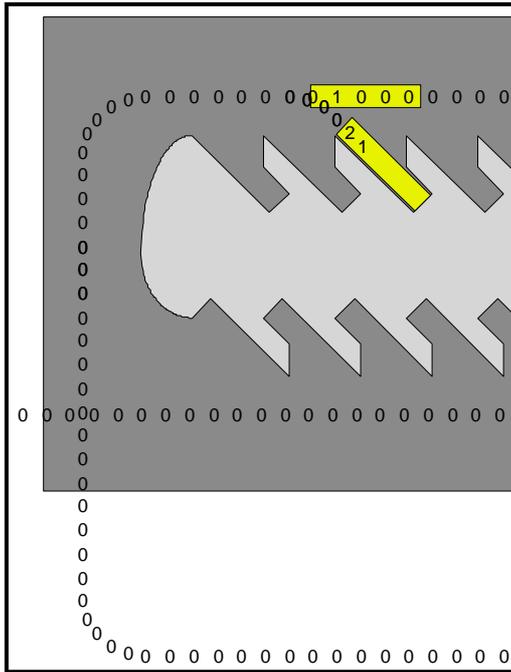


Figura 15. - Bloqueo estacionamiento

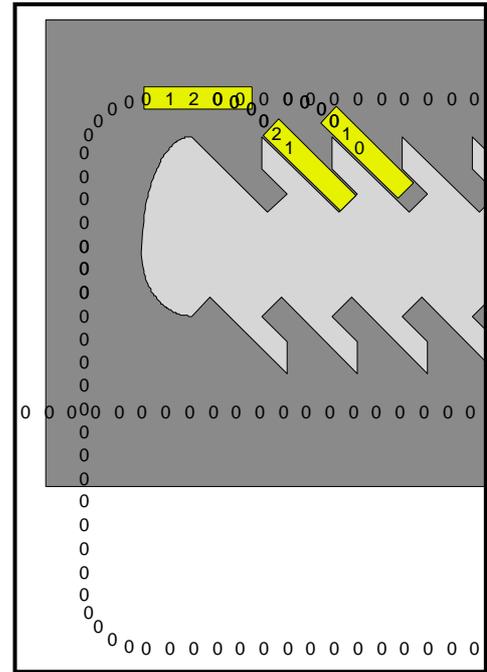


Figura 16. - Bloqueo abandono dársena.

Cabe destacar que, a pesar de que una trayectoria no puede ser ocupada por dos autobuses diferentes, puesto que significaría que ambos van a estacionar en la misma dársena, a la hora de realizar los bloqueos necesarios, éstos los hemos extendido a todas las trayectorias por simplificación a la hora de programar la simulación.

Para finalizar este apartado, y aprovechando que ya hemos explicado el modelo completo, con sus 43 dársenas, y las condiciones de avance a cumplir, volveremos a mencionar, a modo de resumen, los pasos a seguir:

- 1) Definir el número de iteraciones que va a desarrollar nuestro modelo; número de veces que queremos que se repita el planteamiento elegido.
- 2) Localizar las posiciones que están siendo ocupadas por los autobuses, es decir, buscar las componentes de valor 1 del Vector de Posición.
- 3) Representar los autobuses en sus respectivas posiciones.
- 4) Identificar si alguna de las componentes ocupadas se corresponde a una posición de estacionamiento en la dársena. En caso que así sea:
 - Si el contador es menor o igual al tiempo de estacionamiento establecido, impedir que el autobús abandone la dársena. Cuando el contador esté próximo a su máximo, bloquear la circulación de los demás autobuses tras la dársena ocupada y la salida del autobús situado en la dársena anterior.
 - Si el contador es mayor que el tiempo de estacionamiento establecido, comprobar si es posible la salida del autobús de la dársena y volver el contador a cero cuando éste la haya abandonado completamente, es decir, cuando el autobús se reincorpore a la circulación. En caso que existan autobuses circulando, impedir la salida del mismo.
- 5) Verificar que se cumplen todas las condiciones de avance:
 - Posibilidad de avance sin colisión con el autobús situado delante.

- Posibilidad de avance sin colisión con el autobús que desea entrar o salir de la estación, en función de la situación en la que nos encontremos.
 - Posibilidad de salida de la dársena ocupada sin colisión con los autobuses que están circulando detrás de ella ni con los estacionados en dársenas colindantes.
- 6) Avanzar aquellos autobuses que han cumplido las condiciones de avance, en función de la situación en la que se encuentren, hacia la siguiente posición.
 - 7) Repetir los puntos 2) a 6) para cada iteración.

3. - ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es, como ya hemos mencionado, el cálculo de la capacidad máxima de la Estación de Autobuses “Plaza de Armas”.

Esto lo conseguiremos aumentando progresivamente la frecuencia de llegada de los autobuses a la estación hasta conseguir que la cola formada a la entrada de la misma sea excesiva. Para ello, tendremos que bloquearla, colocando un 2 en la posición correspondiente del Vector de Ocupación, cuando no existan dársenas disponibles que ofrecer a los autobuses que tratan de acceder a ella; creándose una cola de autobuses que aumentará o disminuirá en función de la frecuencia de llegada y de la disponibilidad de dársenas libres.

Dado que lo que nos interesa es conocer el número de autobuses que conforman la cola de entrada a la estación con independencia de la posición que ocupe cada uno de ellos, no impondremos en éstos las condiciones de avance, colocándolos consecutivamente unos detrás de los otros, como podemos observar en la siguiente imagen; disminuyendo notablemente el número de posiciones necesarias para la creación de la cola.

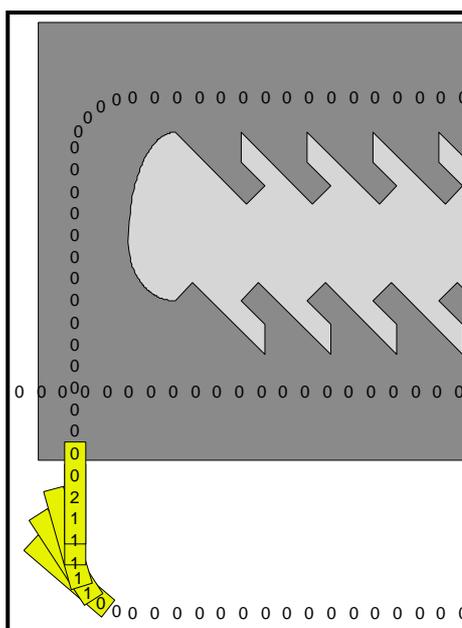


Figura 17. - Bloqueo entrada

La posición del bloqueo se ha obtenido de forma empírica para que cuando se detengan los autobuses en la entrada no colisionen con los que van a abandonar la estación.

Así mismo, la condición inicial de los tiempos de estacionamiento no se verá modificada ya que, como es lógico, el tiempo que los autobuses permanecen en sus dársenas no depende de cuántos llegan en un determinado periodo de tiempo.

Partiremos de las condiciones iniciales, para posteriormente aumentar la frecuencia de llegada. Esto lo conseguiremos multiplicando los intervalos de llegada entre autobuses por un determinado factor menor que la unidad, los cuales iremos disminuyendo hasta conseguir alcanzar la máxima capacidad de la estación.

Para afirmar que la hemos alcanzado, tomaremos como criterio que la diferencia entre la frecuencia de

llegada (λ) y la de salida (μ) sea mayor que un 10% la frecuencia de llegada, es decir,

$$\frac{\lambda - \mu}{\lambda} > 0.1$$

La frecuencia de llegada es la inversa del intervalo de llegada medio entre autobuses. La diferencia entre ambas frecuencias ($\lambda - \mu$) es la cola formada a la entrada de la estación es decir, la pendiente de la recta de regresión realizada a la grafica del número de autobuses en la cola en función del tiempo.

$$y = a + b * x$$

Siendo b el valor buscado. Es importante que dicho coeficiente b sea significativo. Para ello, comprobaremos que el área de las colas de la distribución de Student sea muy pequeña, es decir, $p < 0.05$.

Por tanto, para encontrar cuándo se alcanza la capacidad máxima de la estación, partiremos de la situación inicial y aumentaremos la frecuencia de llegada hasta hallar la primera que alcanza el criterio impuesto.

En cada simulación, se han llevado a cabo 7200 iteraciones, es decir, se ha considerado que durante dos horas la frecuencia de llegada a la estación no varía. Recordemos que cada iteración representa un segundo como mencionado al comiendo de este documento.

Se ha desarrollado 3 situaciones diferentes así como las posibles combinaciones entre ella; de manera que en cada escenario hallemos para qué frecuencia se alcanza la capacidad máxima buscada.

Estas situaciones serán los dos conflictos mencionados al comienzo de este documento, así como la consideración de que únicamente existen autobuses de corto recorrido.

Tomando como 1 que sí tenemos en cuenta dicha situación y 0 como que no, las distintas combinaciones posibles son las que se muestran a continuación.

Entrada/ Salida	Abandono Dársena	Autobuses Corto Recorrido
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Figura 18. - Escenarios de estudio

Conformando un total de 8 escenarios diferentes.

En la situación en las que el conflicto encontrado a la entrada y salida de la estación no influya, consideraremos que existe un paso a nivel que permite que se pueda dar de forma simultánea la entrada y salida de la estación. Cuando el valor cero esté asociado al conflicto encontrado cuando un autobús desea abandonar su dársena de estacionamiento, simulará que el ancho es suficiente para que se puedan dar ambas situaciones a la vez; el abandono de la dársena y la continuada circulación de los autobuses. Por último, también consideraremos que 10 de las dársenas se encuentran ocupadas por autobuses de largo recorrido o por autobuses fuera de servicio cuando encontremos un cero en esta situación. En este caso, obligaremos a dichos autobuses a permanecer en sus dársenas durante todo el ensayo.

4. - RESULTADOS

A continuación se expondrán los resultados logrados al alcanzar la máxima capacidad de la estación en cada uno de los 8 escenarios. Para cada uno de ellos, se ha obtenido la siguiente información:

- Factor de reducción del intervalo de llegada.
- Intervalo medio de llegada entre autobuses.
- Frecuencia de llegada de los autobuses.
- Pendiente de la recta de regresión (b).
- Número medio de dársenas ocupadas.
- Número medio de autobuses en cola.
- Gráfica del número de autobuses en cola en función del tiempo.
- Gráfica del número de dársenas ocupadas en función del tiempo.
- Histograma de las dársenas ocupadas.

4.1. - Escenario 1

En este escenario hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de entrar y salir los autobuses de la estación así como el conflicto a la hora de abandonar las dársenas ocupadas. Además, se ha tenido en cuenta que todos los autobuses son de corto recorrido.

Para llevar a cabo el colapso de la estación en este escenario, ha sido necesario multiplicar los intervalos de llegada por un factor de 0.35, dando lugar a una media de 21.6 segundos entre autobuses, es decir, una frecuencia de llegada de 0.0463 autobuses por segundos. De la gráfica de la cola formada en función del tiempo hemos obtenido que la pendiente de la recta de regresión es 0.0073. Dividiendo ahora dicha pendiente por la frecuencia de llegada, obtenemos un valor de 0.16; afirmando que se cumple la saturación de la estación ($0.16 > 0.10$). Para este escenario, el número medio de dársenas ocupadas ha sido de 40.9, siendo 25.7 el número medio de autobuses en cola.

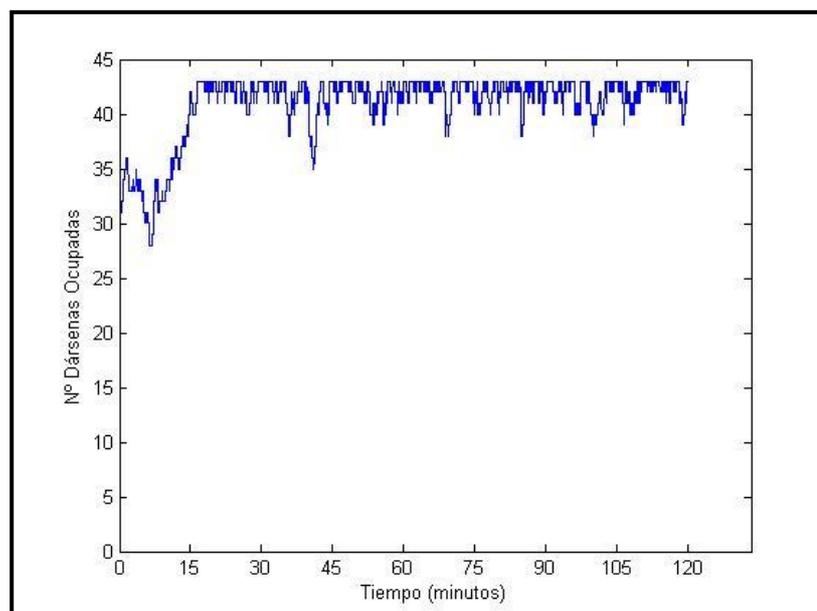


Figura 19. - Dársenas ocupadas escenario 1

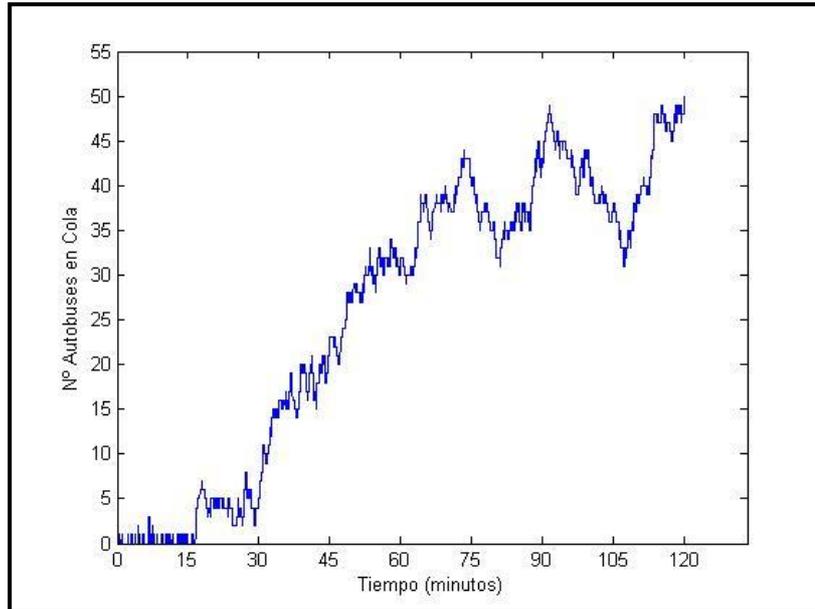


Figura 20. - Autobuses en cola escenario 1

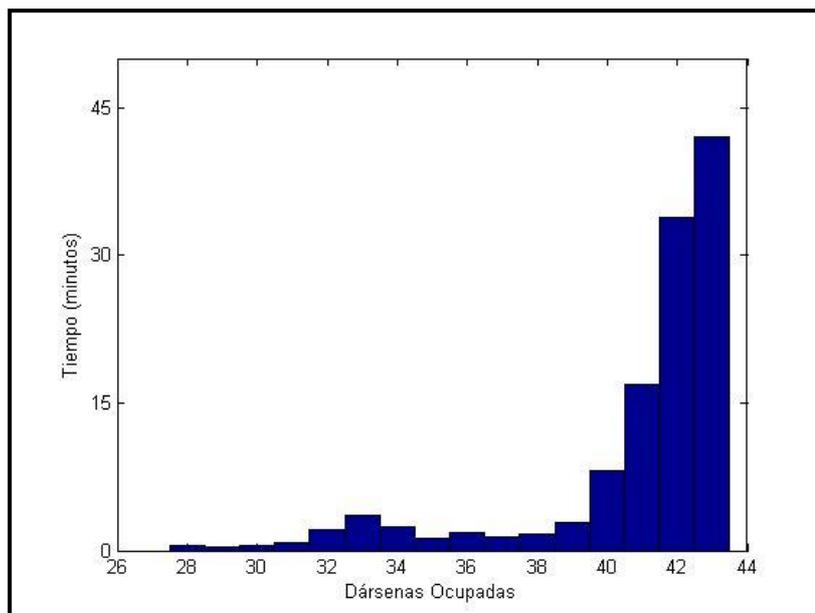


Figura 21. - Histograma dársenas ocupadas escenario 1

4.2. - Escenario 2

En este escenario solamente hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de entrar y salir los autobuses de la estación. Además, se ha tenido en cuenta que algunos autobuses son de largo recorrido.

El factor de corrección de los intervalos, el intervalo de llegada y la frecuencia de llegada son 0.35, 20.8 y 0.048, respectivamente. El número medio de dársenas ocupadas es 41.4 y el de autobuses en cola 27.6. El cociente entre la pendiente de la recta de regresión y la frecuencia de llegada de los autobuses es 0.16.

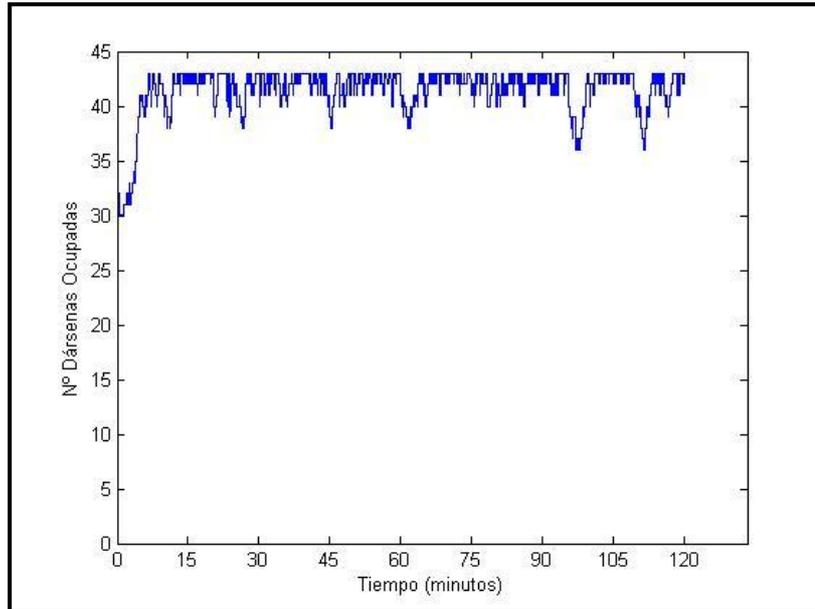


Figura 22. - Dársenas ocupadas escenario 2

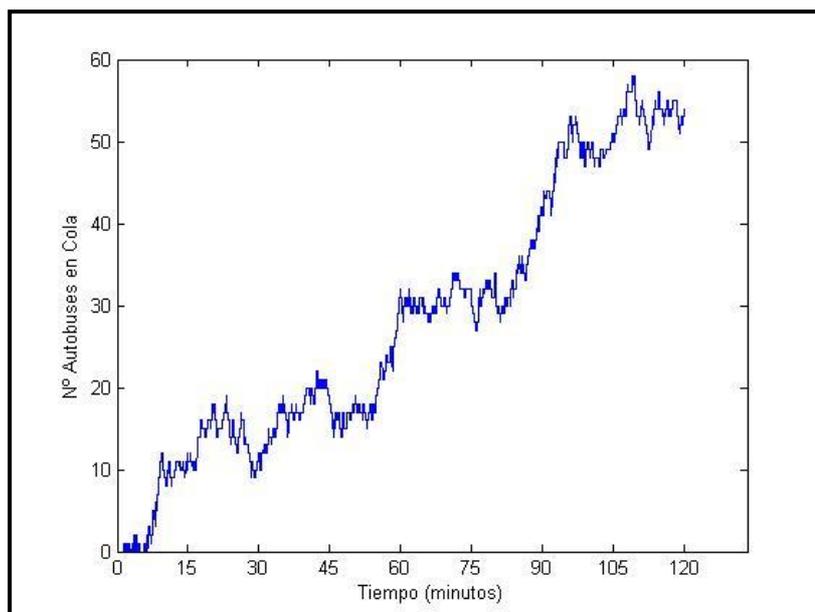


Figura 23. - Autobuses en cola escenario 2

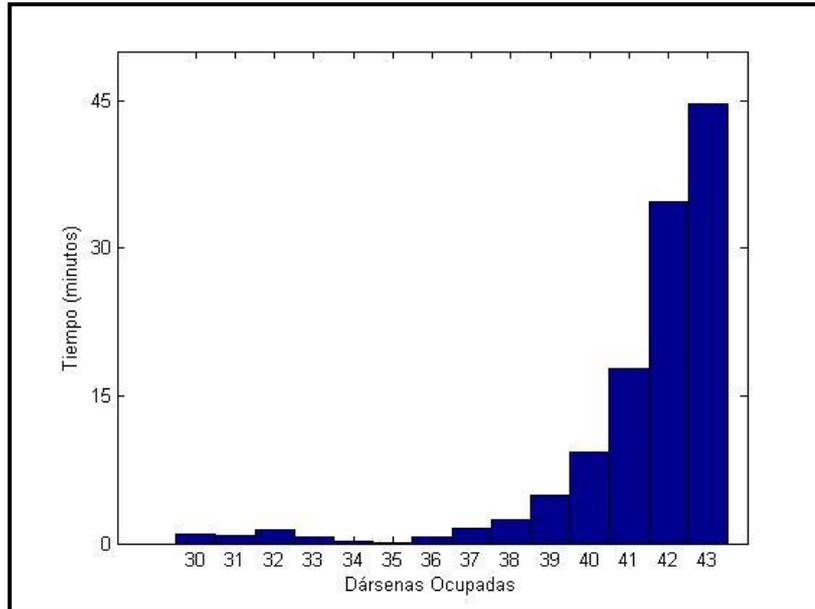


Figura 24. - Histograma dárseas ocupadas escenario 2

4.3. - Escenario 3

En este escenario solamente hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de abandonar las dárseas ocupadas. Además, se ha tenido en cuenta que algunos autobuses son de largo recorrido.

El cociente entre la pendiente y la frecuencia de llegada es 0.11. La frecuencia de llegada es de 0.0469 autobuses por segundos con un factor de corrección de 0.35. 41.6 es el número medio de dárseas ocupadas y 9.9 la media de autobuses en cola.

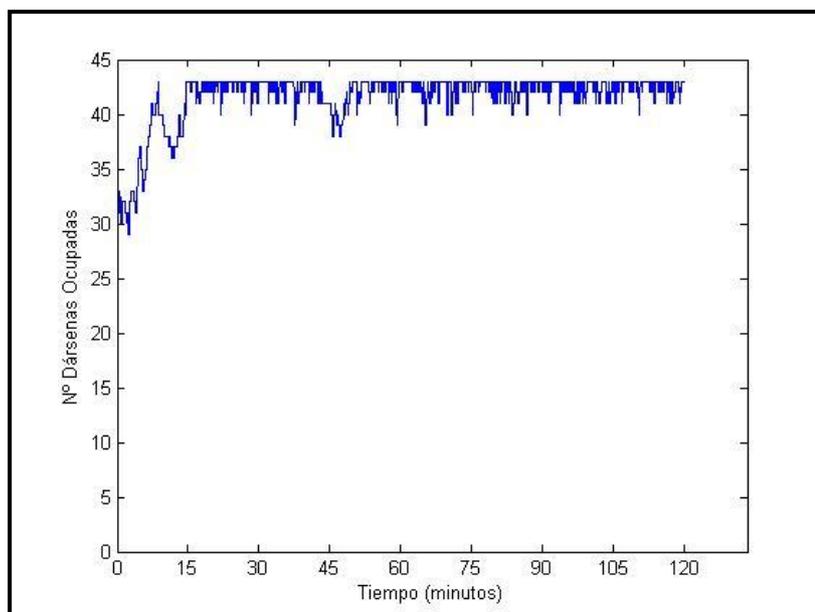


Figura 25. - Dárseas ocupadas escenario 3

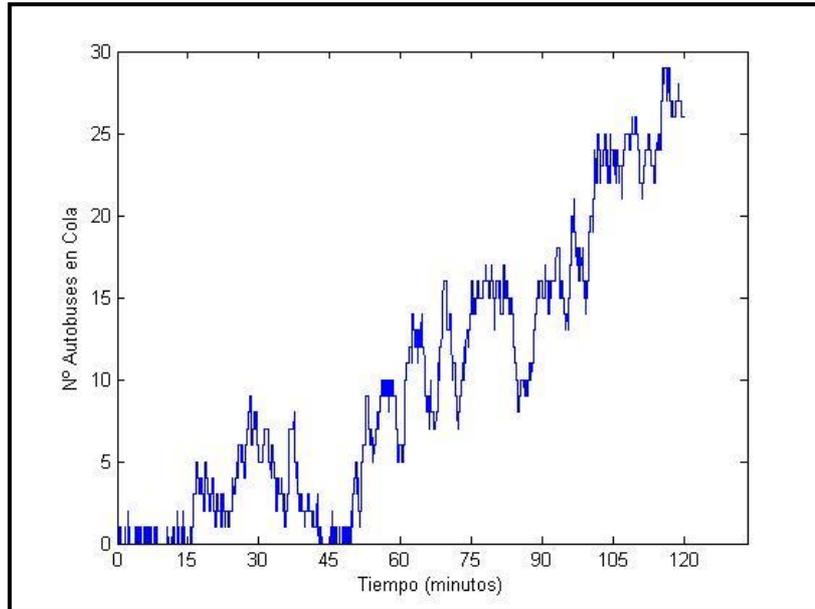


Figura 26. - Autobuses en cola escenario 3

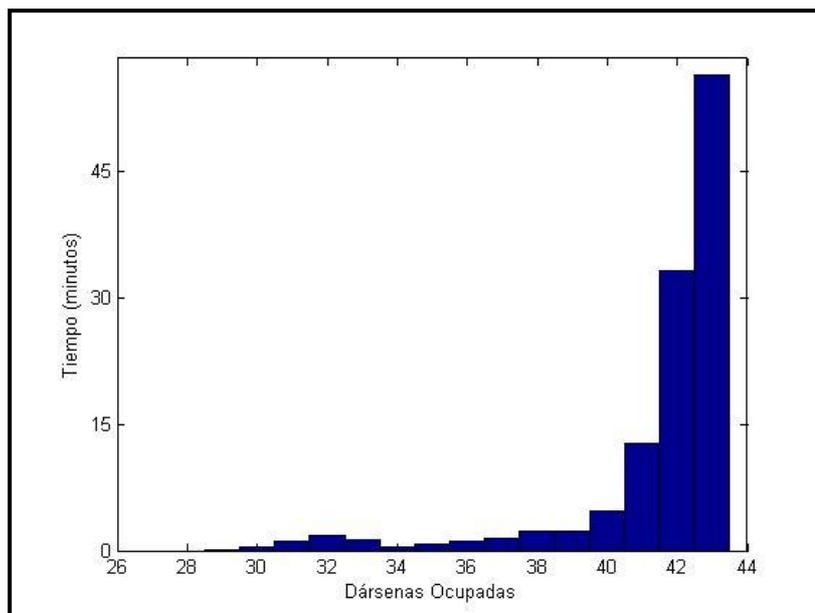


Figura 27. - Histograma dársenas ocupadas escenario 3

4.4. - Escenario 4

En este escenario no se ha considerado ninguno de los dos conflictos. Además, se ha tenido en cuenta que todos los autobuses son de corto recorrido.

La saturación de la estación se ha obtenido para un intervalo medio de llegada de 18.8 segundos, es decir, una frecuencia de llegada de 0.0533 autobuses por segundos. Así mismo, la pendiente de la recta de regresión del número de autobuses en la cola en función del tiempo ha sido 0.0116; dando un cociente de 0.22, confirmando la saturación de la estación. El número medio de dársenas ocupadas y el número medio de autobuses en la cola es 41.8 y 36.8, respectivamente. El factor de reducción ha sido 0.3.

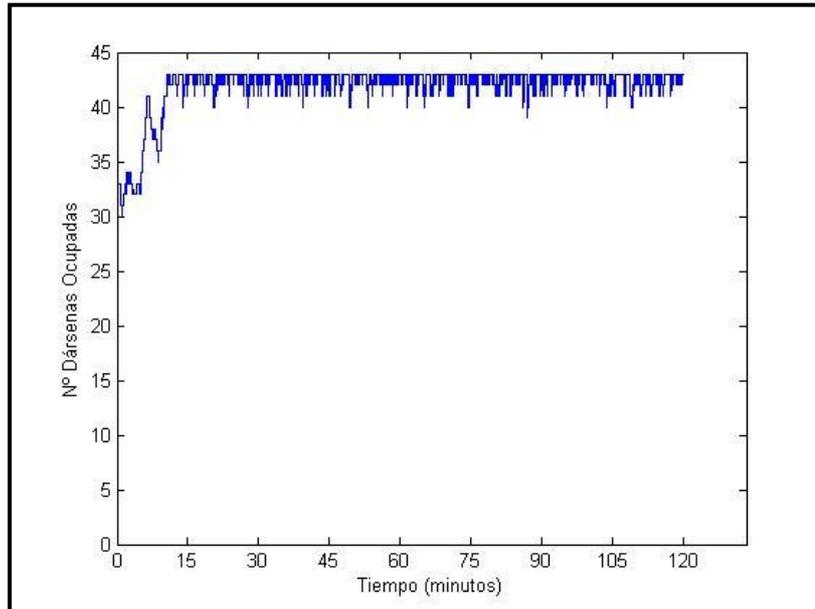


Figura 28. - Dársenas ocupadas escenario 4

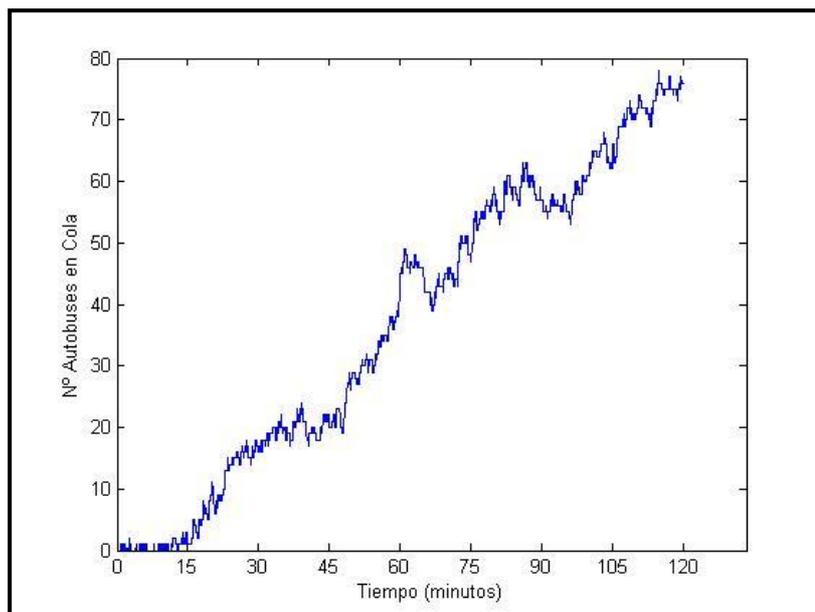


Figura 29. - Autobuses en cola escenario 4

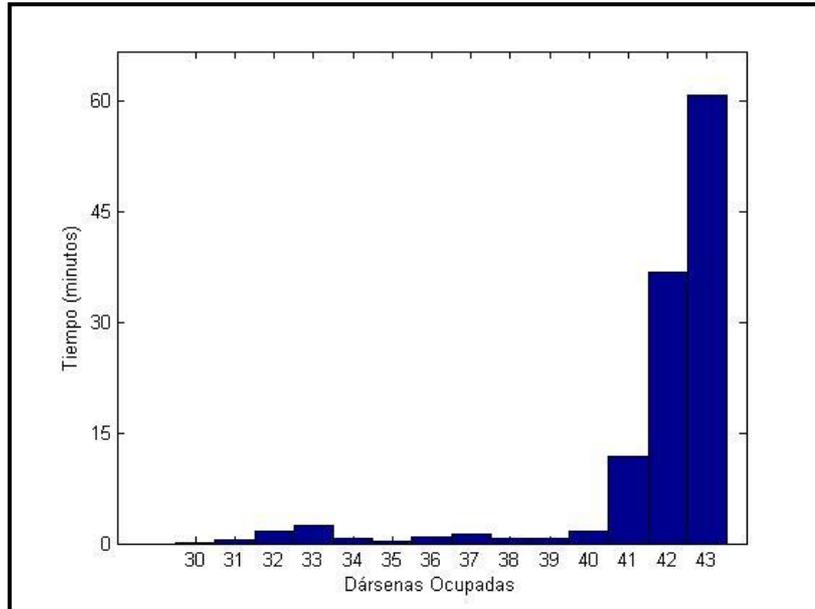


Figura 30. - Histograma dársenas ocupadas escenario 4

4.5. - Escenario 5

En este escenario hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de entrar y salir los autobuses de la estación así como el conflicto a la hora de abandonar las dársenas ocupadas. Además, se ha tenido en cuenta que algunos autobuses son de largo recorrido.

El cociente entre la pendiente (0.0067) y la frecuencia de llegada (0.0474) es 0.14, por lo que la estación alcanza la capacidad máxima para un intervalo de llegada entre autobuses de 21.1 segundos (factor de reducción de 0.35). El número medio de autobuses en la cola es de 23.8, siendo la ocupación media de 40.8.

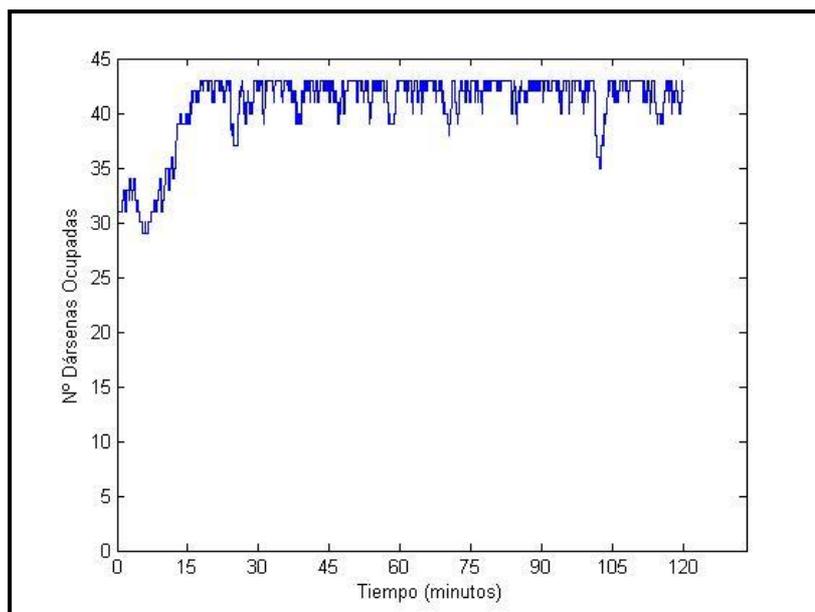


Figura 31. - Dársenas ocupadas escenario 5

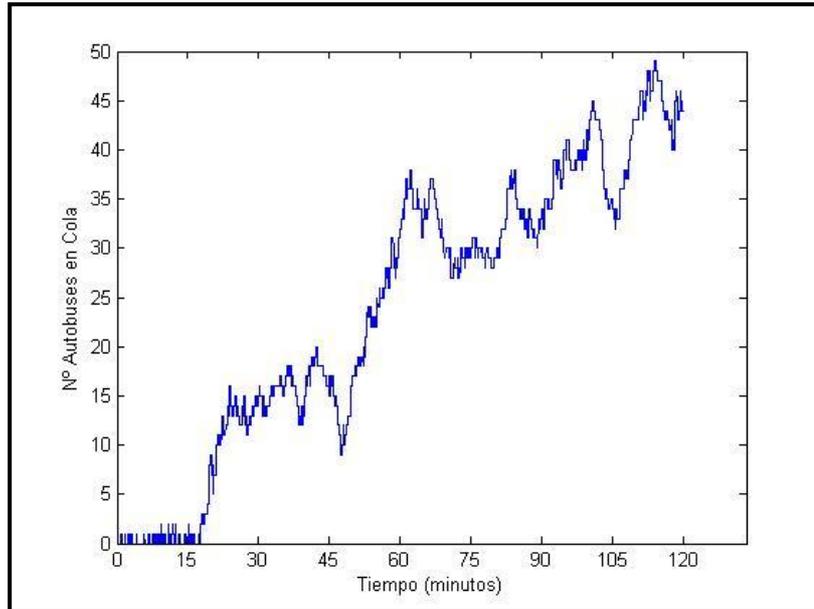


Figura 32. - Autobuses en cola escenario 5

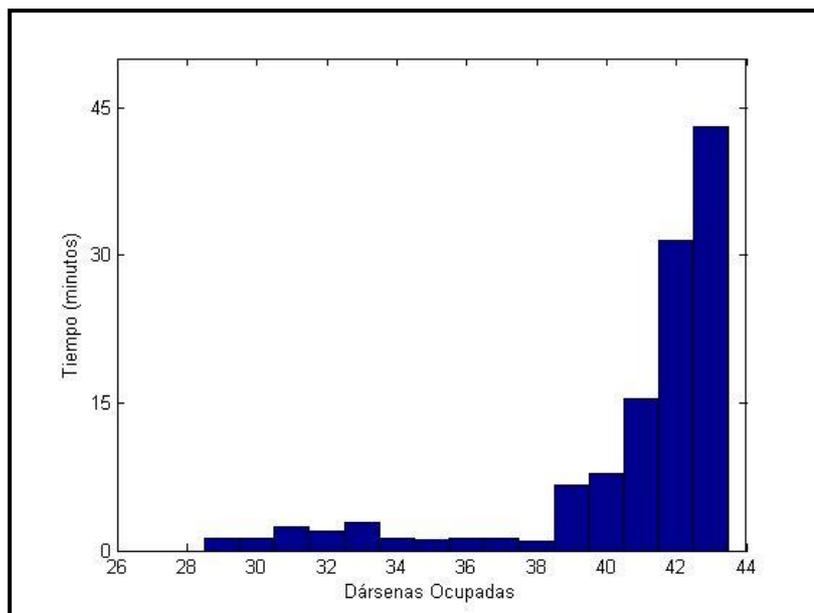


Figura 33. - Histograma dársenas ocupadas escenario 5

4.6. - Escenario 6

En este escenario solamente hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de entrar y salir los autobuses de la estación. Además, se ha tenido en cuenta que todos los autobuses son de corto recorrido.

Para el factor de reducción en el cual se alcanza la capacidad máxima de la estación (0.35), el número medio de dársenas ocupadas es 41.6. Por otro lado, tenemos que el número medio de autobuses en la cola es 26.6. La frecuencia de llegada de los autobuses es 0.0475 con un intervalo medio de llegada de 21.1 segundos entre autobuses.

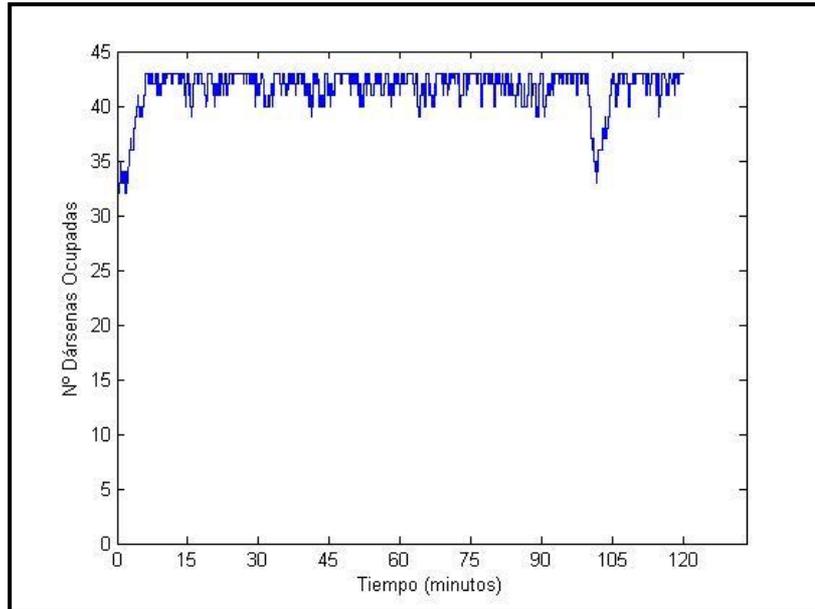


Figura 34. - Dársenas ocupadas escenario 6

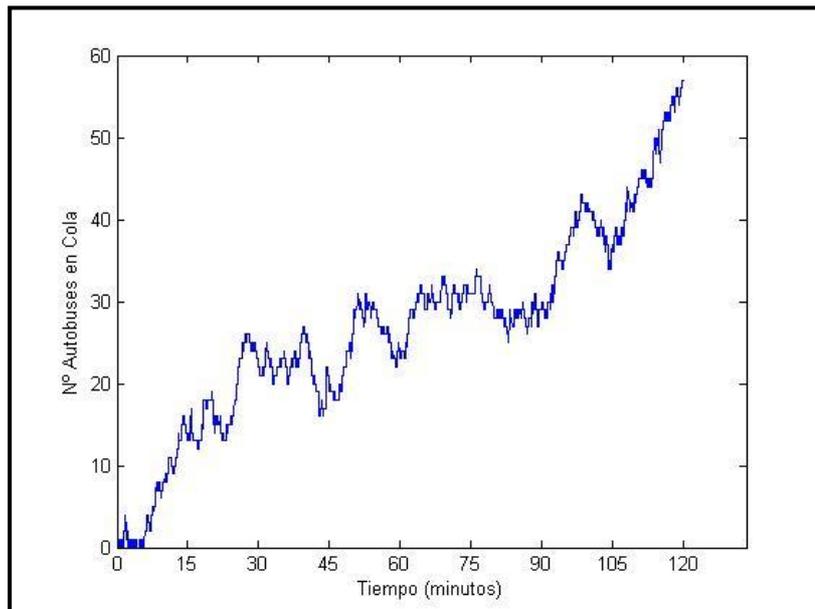


Figura 35. - Autobuses en cola escenario 6

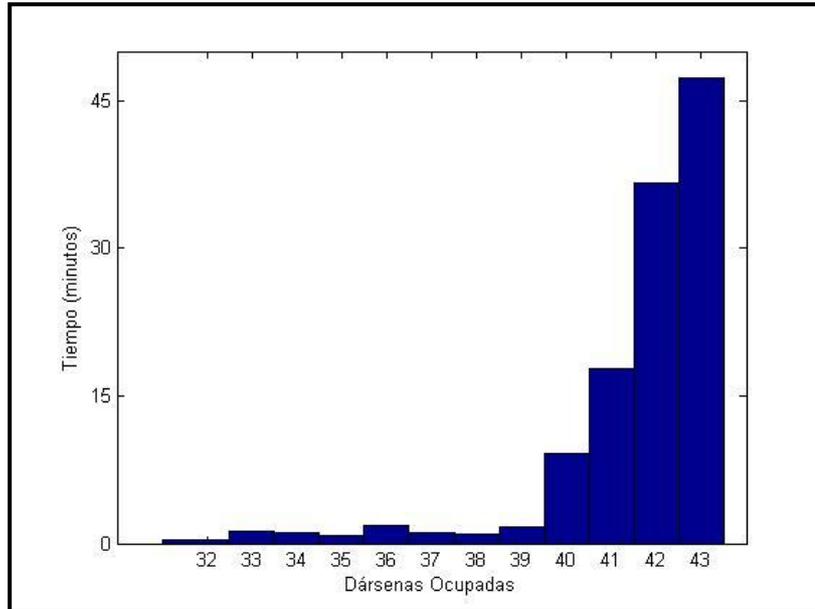


Figura 36. - Histograma dárseas ocupadas escenario 6

4.7. - Escenario 7

En este escenario solamente hemos considerado el conflicto encontrado a la hora de abandonar las dárseas ocupadas. Además, se ha tenido en cuenta que todos los autobuses son de corto recorrido.

A la hora de ensayar este escenario, la simulación se ha interrumpido antes de la cuenta al alcanzarse la máxima capacidad estimada para la formación de cola. Es por ello, que en vez de 7200 iteraciones se han realizado 5643.

En esta ocasión, el factor por el que ha sido necesario multiplicar el intervalo de llegada para alcanzar la condición de saturación ha sido 0.3. La frecuencia de llegada es de 0.0545 autobuses por segundo, con un intervalo de 18.3 segundos entre ellos. El número medio de dárseas ocupadas es 41.4 y el número medio de autobuses en la cola de 43.7.

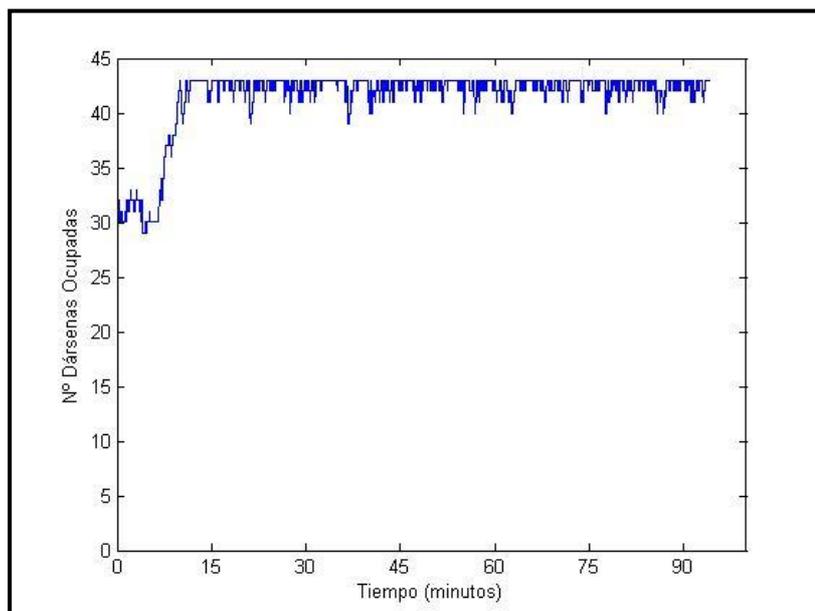


Figura 37. - Dárseas ocupadas escenario 7

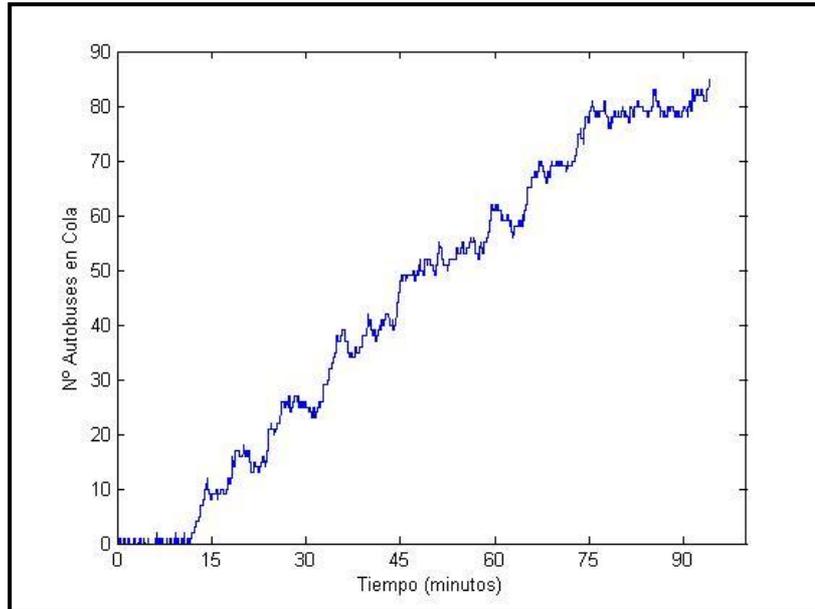


Figura 38. - Autobuses en cola escenario 7

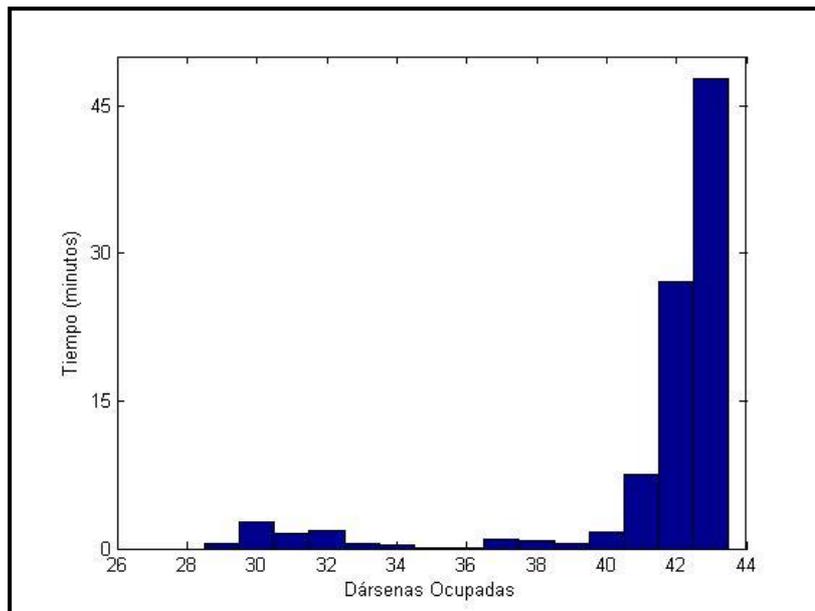


Figura 39. - Histograma dársenas ocupadas escenario 7

4.8. - Escenario 8

En este escenario no se ha considerado ninguno de los dos conflictos. Además, se ha tenido en cuenta que algunos autobuses son de largo recorrido.

Para esta simulación, el número medio de dársenas ocupadas ha sido 41, siendo 14.9 el número medio de autobuses en la cola. Esto se ha obtenido con un intervalo entre autobuses de 20.8 segundos, un intervalo de llegada de 0.0481 y una pendiente de la recta de regresión de 0.0067. El factor de reducción nuevamente ha sido 0.35.

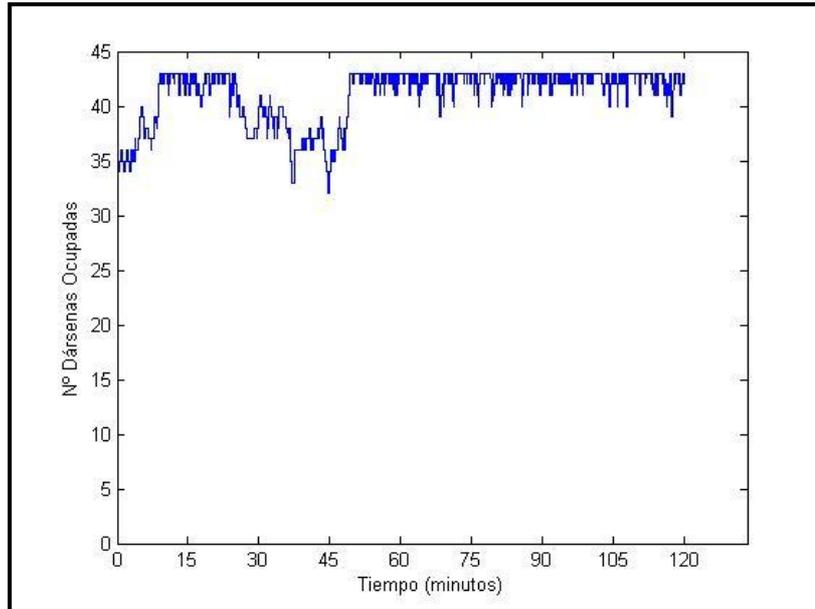


Figura 40. - Dársenas ocupadas escenario 8

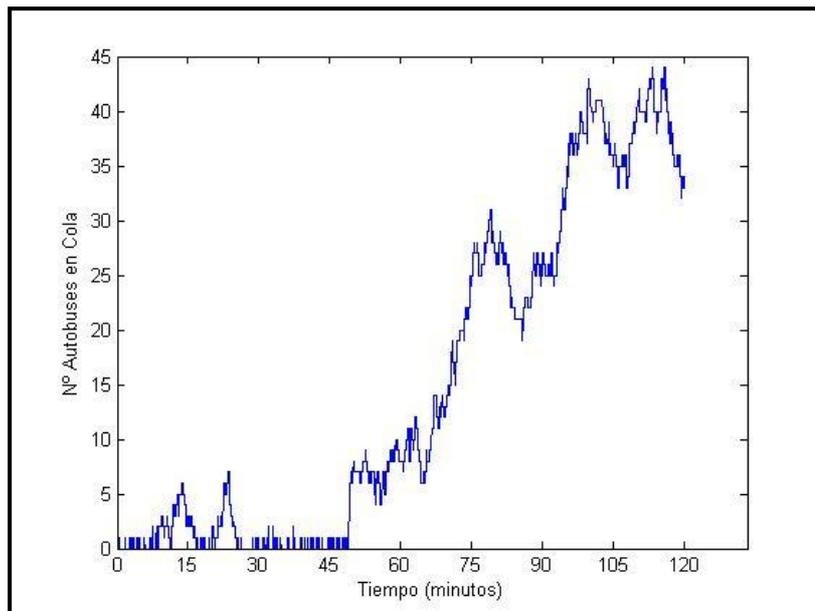


Figura 41. - Autobuses en cola escenario 8

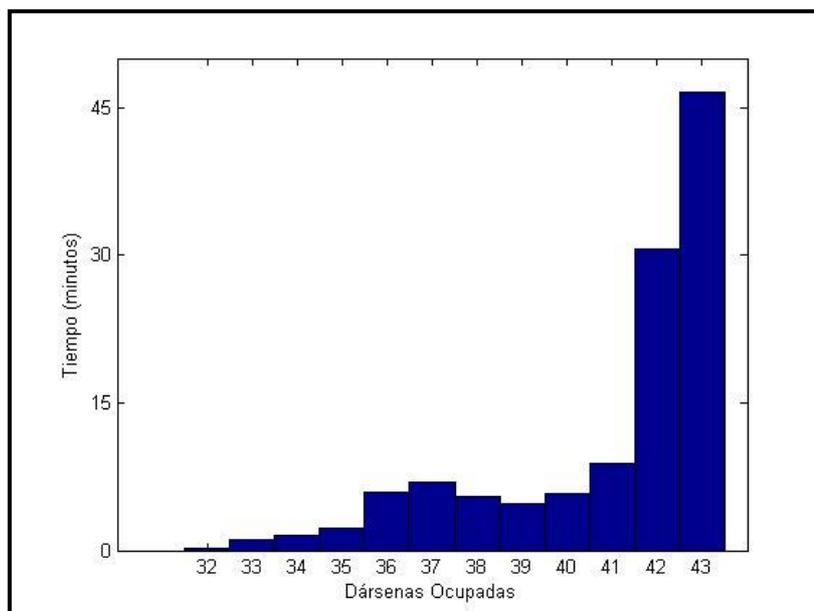


Figura 42. - Histograma dársenas ocupadas escenario 8

A continuación, mostraremos una tabla resumen con los datos obtenidos en cada uno de los escenarios.

Escenario	Factor Corrector	Intervalo Llegada (s)	Frecuencia Llegada (λ)	Pendiente Recta (b) ($\lambda - \mu$)	$(\lambda - \mu) / \lambda$	Cola Media	Ocupación Media
1	0.35	21.6	0.0463	0.0073	0.16	25.7	40.9
2	0.35	20.8	0.0480	0.0077	0.16	27.6	41.9
3	0.35	21.3	0.0469	0.0052	0.11	9.9	41.6
4	0.30	18.8	0.0533	0.0116	0.22	36.8	41.8
5	0.35	21.1	0.0474	0.0067	0.14	23.8	40.8
6	0.35	21.1	0.0475	0.0054	0.11	26.6	41.6
7	0.30	18.3	0.0545	0.0169	0.31	43.7	41.4
8	0.35	20.8	0.0481	0.0067	0.14	14.9	41.0

5. - ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tras haber simulado los 8 escenarios diferentes y haber obtenido las distintas gráficas para cada uno de ellos, vamos a proceder a analizar los resultados obtenidos.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la determinación de la máxima capacidad de la Estación de Autobuses "Plaza de Armas"; tomando como criterio de saturación que el cociente entre la diferencia de frecuencia de llegadas y salida y la frecuencia de llegada sea mayor que 0.1.

Para poder alcanzar dicho criterio de saturación, hemos tenido que aumentar la frecuencia de llegada en un 65% en todos los escenarios a excepción de los escenarios 4 y 7, en el cual se ha tenido que aumentar un 70%, es decir, los factores de reducción han sido 0.35 y 0.3, respectivamente. Este aumento de la frecuencia de llegada supone que el intervalo medio entre los autobuses que acceden a la estación sea, considerando los 8 escenarios, de 20.5 segundos.

Podemos observar como para ese criterio de saturación, el porcentaje del número medio de dársenas ocupadas oscila entre 94.9% (escenario 5), con una media de 40.8 dársenas ocupadas, y 97.4% (escenario 2), con una media de 41.9 autobuses estacionados; afirmando, por tanto, que realmente la estación se encuentra operando a su máxima capacidad.

Gracias a los histogramas podemos observar que en todos los escenarios, la totalidad de la estación se encuentra ocupada durante el mayor intervalo de tiempo.

En cuanto a la cola formada a la entrada de la misma, encontramos una media de 26.1 autobuses; considerando los 8 escenarios. Este valor es excesivamente alto, sin embargo, tenemos que tener en cuenta que hemos supuesto que la estación se encuentra operando a máxima capacidad durante 2 horas seguidas (7200 iteraciones); lo cual no se asemeja con la realidad. Sin embargo, hemos considerado dicha duración para que el tamaño de la cola sea significativo y podemos observar como claramente ésta aumenta de forma indefinida conforme van pasando las iteraciones.

Si nos detenemos ahora en los escenarios, destacamos 3 grupos diferentes. En el primer grupo se encuentra los escenarios 4 y 7, los cuales presentan un aumento de la frecuencia mayor (70%) para alcanzar la saturación de la estación. A continuación, encontramos el segundo grupo formado por los escenarios 3 y 8, en los que encontramos un número medio de autobuses en cola muy inferior a la media. En el último grupo encontramos el resto de los escenarios, 1, 2, 5 y 6, cuyos número medio de autobuses en cola es aproximadamente la media de éstos considerando los 8 escenarios.

Si nos centramos en los escenarios del grupo 1, el 4 y 7, observamos que en ambos casos nos encontramos en la situación de libre acceso y salida de la estación, es decir, considerando la existencia de un paso a nivel que permita que se puedan dar las dos circunstancias de forma simultánea. Además, para ambos escenarios asumimos que todos los autobuses son de corto recorrido. Cabe destacar que el número medio de autobuses en cola no depende de si existe la posibilidad de rebase de los autobuses que están abandonando las dársenas, o no; presentan un valor similar.

En el grupo 2, cuya media de autobuses esperando para entrar en la estación es muy inferior a la media, nos encontramos en la misma situación que en el grupo anterior; considerando en este caso la existencia de autobuses de largo recorrido. Volvemos a encontrar el hecho de que la posibilidad de rebase no afecta a la cola forma a la entrada de la estación.

Por último, en el grupo 3 encontramos todos los escenarios posible considerando el conflicto existente en la entrada y salida de la estación. En todos ello, la cola media es similar con independencia de que algunos autobuses sean de largo recorrido o ninguno de ellos, así como el libre abandono de la dársena de estacionamiento o la necesidad de bloquear los autobuses que circulan por detrás a la hora de dejarla libre.

6. - CONCLUSIONES

Tras haber analizado todos los escenarios posibles, obtenemos como resultado que el aumento del ancho de la estación, para permitir que se rebasen los autobuses que están realizando la maniobra de abandono de las dársenas, no aumenta la capacidad de la estación ya que, como hemos mencionado con anterioridad, el número medio de autobuses esperando para entrar en la estación es similar tengamos en cuenta o no esta situación.

En cuanto a la consideración de que todos los autobuses que realizan su parada en la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” son de corto recorrido, observamos que claramente tampoco influye para aumentar su capacidad si tenemos en cuenta el conflicto hallado en la entrada y salida de la misma; por el mismo motivo mencionado anteriormente. Si no lo tenemos en cuenta, es decir, si permitimos que los autobuses puedan acceder y abandonar la estación de forma simultánea, tampoco influye que ya, ante cualquier fluctuación en los resultados obtenidos mediante la distribución Gamma, la cola podría ser más pequeña aun teniendo que aumentar la frecuencia de llegada de los autobuses para conseguir el colapso de la estación.

Únicamente encontramos un aumento de la frecuencia de llegada al considerar la existencia de un paso a nivel que permita que los autobuses puedan acceder a la estación sin tener que ceder el paso a los que desean marcharse; con independencia de los demás conflictos y consideraciones tenidas en cuenta.

Por todo esto, podemos concluir que la Estación de Autobuses “Plaza de Armas” alcanza su máxima capacidad, teniendo en cuenta el criterio impuesto, al considerar que no existe conflicto a la hora de que los autobuses puedan entrar y salir de la misma; no interviniendo el conflicto en el momento de abandonar las dársenas ocupadas ni la consideración de que todos los autobuses sean de corto recorrido.

7. - BIBLIOGRAFÍA

- <http://www.autobusesplazadearmas.es/>. De este enlace hemos obtenido la información incluida en la introducción sobre la Estación de Autobuses “Plaza de Armas”.
- https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_gamma. Este enlace ha sido empleado para la definición de la Distribución Gamma.
- Consulta directa con el jefe de estación de “Plaza de Armas”, así como demás trabajadores competentes del sector.
- Consulta de Transit Capacity and Quality of Service Manual.