

SIMULACIÓN DE SISTEMAS  
PRÁCTICA 3:  
MODELOS DE SIMULACIÓN DINÁMICOS Y  
DISCRETOS



*ugr*

Universidad  
de **Granada**

**Autor:** Sergio Aguilera Ramírez  
Curso 2019 - 2020

# Índice

<b>1. MI SEGUNDO MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETO</b>	<b>2</b>
1.1. Programa de simulación con incremento fijo . . . . .	2
1.2. Programa de simulación con incremento variable . . . . .	4
1.3. Programa de simulación dinámico y discreto . . . . .	6
1.3.1. Modificación colammk . . . . .	8
<b>2. MI TERCER MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETO</b>	<b>10</b>
2.1. Alternativa 1- Aumento de puntos de atraque . . . . .	11
2.2. Alternativa 2- Remolcador al que no le afectan las tormentas . . . . .	12
2.3. Alternativa 3- Remolcador más rápido . . . . .	12
2.4. Resultados según toneladas totales . . . . .	13
<b>3. ANÁLISIS DE SALIDAS Y EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>14</b>
3.1. Comparativa modelos A y B . . . . .	14
3.1.1. Comparativa modelos A y B : 1 simulación (100 veces) . . . . .	14
3.1.2. Comparativa modelos A y B : 5 simulaciones (100 veces) . . . . .	14
3.1.3. Comparativa modelos A y B : 10, 25 y 50 simulaciones (100 veces) . . . .	15
3.2. Comparativa modelos A y C . . . . .	15
3.2.1. Comparativa modelos A y C : 1 simulación (100 veces) . . . . .	15
3.2.2. Comparativa modelos A y C : 5 simulaciones (100 veces) . . . . .	16
3.2.3. Comparativa modelos A y C : 10, 25 y 50 simulaciones (100 veces) . . . .	16
3.2.4. Comparativa modelos A vs B y A vs C : 100 simulaciones (100 veces) . .	16
3.3. Intervalos de confianza . . . . .	17
3.4. Comparación de k sistemas . . . . .	18
<b>4. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>19</b>

# 1. MI SEGUNDO MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETO

En este primer capítulo vamos a realizar diferentes experimentos y modificaciones sobre un determinado sistema. Este sistema está basado en suministrar mediante un servidor distintos servicios a los clientes que hacen esta petición. Nuestro sistema seguirá el método FIFO, dicho método consiste en dar servicio al primero en la cola cuando el servidor este libre. En los siguientes apartados se van a realizar varias modificaciones sobre este sistema, calculando en cada uno de ellos el porcentaje de tiempo de ocio del servidor y el número medio de clientes en cola.

## 1.1. Programa de simulación con incremento fijo

Este primer modelo está basado en el método 'incremento fijo de tiempo', el cual está basado en el crecimiento del tiempo de unidad en unidad (según medida especificada), siguiendo el modelo de un reloj habitual.

Los generadores de llegada y servicio han sido modificados, como se muestra en la Figura 1 y Figura 2. Los cambios han sido simples, se ha redondeado el valor obtenido al número más próximo mediante la función *ceil()* ya que la unidad de tiempo que vamos a utilizar en este apartado son unidades enteras, la segunda modificación consiste en establecer el valor devuelto a 1 cuando el resultado obtenido al generar el tiempo es 0, ya que si dicho valor no se incrementase ni si quiera en 1 unidad sobre el tiempo actual, el siguiente ciclo en el cual el reloj de nuestro programa ya ha avanzado, lo que supone que nuestro tiempo de llegada o servicio es menor a dicha hora, dejaríamos la llegada o el servicio de un cliente perdidos en el pasado, por lo que el sistema no tendría más eventos.

```
/* Genera el tiempo de llegada de un cliente */
float generallegada(float tlleg){
    float u = (float) random(); // o también rand() en lugar de random()
    u = (float) (u/(RAND_MAX+1.0)); //RAND_MAX es una constante del sistema
    float val = ceil((-tlleg*log(1-u)));
    float result = 1.0;
    if(val != 0){
        result = val;
    }
    return result;
}
```

Figura 1: Código de generación de llegada de clientes

```
/* Genera tiempo de servicio */
float generaservicio(float tserv){
    float u = (float) random(); // o también rand() en lugar de random()
    u = (float) (u/(RAND_MAX+1.0)); //RAND_MAX es una constante del sistema
    float val = ceil((-tserv*log(1-u)));
    float result = 1.0;
    if(val != 0){
        result = val;
    }
    return result;
}
```

Figura 2: Código de generación de servicio de clientes

Una vez generado el código requerido, se ha realizado diferentes pruebas sobre este programa. La conversión de las medidas de tiempo se han llevado a cabo dentro del mismo programa, la entrada de los valores de tiempo de llegada y de servicio se deben introducir en los argumentos en horas (0.1,0.4,1 ...), además se debe especificar en los argumentos de entrada la medida deseada (0->horas, 1->minutos, 2->segundos,3->medias horas), este método se ha utilizado tanto para 'incremento fijo' como para 'incremento variable'.

Los resultados obtenidos mediante la ejecución del programa con distintas medidas de tiempo, además de diferentes valores de tiempo de llegada y de servicio, se muestran a continuación:

tLlegada	tServicio	%tOcio	Med. Clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	0.109868	0	1.33333	33.3333	0.001487
0.2	0.15	0.52642	0.289531	2.25	25	0.002152
0.3	0.28	1.09447	3.09284	13.0667	6.66667	0.002596
1	0.3	35.2705	0.040268	0.128571	70	0.001901
0.1	0.3	0.0096367	94.755	-	-	0.001988

Cuadro 1: Resultados con medida de tiempo en horas ('incremento fijo')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	31.8498	1.23243	1.33333	33.3333	0.002348
0.2	0.15	21.0811	2.79255	2.25	25	0.002702
0.3	0.28	7.49289	9.34562	13.0667	6.66667	0.002085
1	0.3	68.8849	0.133501	0.128571	70	0.003558
0.1	0.3	0.00108936	9034.34	-	-	0.003505

Cuadro 2: Resultados con medida de tiempo en minutos ('incremento fijo')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	33.4399	1.20518	1.33333	33.3333	0.016041
0.2	0.15	24.3653	2.23444	2.25	25	0.01976
0.3	0.28	8.61632	7.27086	13.0667	6.66667	0.031269
1	0.3	69.6918	239.645	0.128571	70	9.82238
0.1	0.3	0.00212041	9873.53	-	-	0.029699

Cuadro 3: Resultados con medida de tiempo en segundos ('incremento fijo')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	3.17583	0.164469	1.33333	33.3333	0.002338
0.2	0.15	5.0787	0.638635	2.25	25	0.002019
0.3	0.28	2.70666	6.00967	13.0667	6.66667	0.001978
1	0.3	51.5633	0.0853829	0.128571	70	0.002405
0.1	0.3	0.00812612	1100.87	-	-	0.002465

Cuadro 4: Resultados con medida de tiempo en medias horas ('incremento fijo')

Observando los resultados obtenidos, se puede ver como los resultados de las medidas de tiempo en horas y medias horas son algo confusos ya que no reflejan los valores de forma correcta, dando en algunos casos tiempos de ocio muy reducido incluso llegando a ser 0, en cambio cuando utilizamos las unidades de tiempo en minutos y segundos vemos como los resultados son semejantes. Por otro lado podemos decir que cuando la diferencia entre el tiempo de llegada y el tiempo de servicio (cumpliendo  $tLleg > tServ$ ) se incrementa, el tiempo que el servidor esta ocioso crece, esto se debe, como es evidente, a que el tiempo de llegada entre los clientes es bastante amplia mientras que el servicio suministrado a cada uno es reducido, por lo que el servidor no realiza ningún servicio durante ese periodo de tiempo.

Por otro lado, si nos fijamos en los valores obtenidos del número medio de clientes en cola vemos como la diferencia de valores comentados en el párrafo anterior ahora es a la inversa, conforme mayor es esta diferencia menor es el número de clientes esperando en cola.

## 1.2. Programa de simulación con incremento variable

Este segundo programa se basa, a diferencia del modelo anterior, en el método de 'incremento variable'. Este método consiste en establecer el reloj del programa al tiempo menor en el que ocurrirá una acción, ya sea de llegada o de servicio, lo cual permite no dejarnos acciones en el pasado como ocurría en el programa anterior. También comentar, que gracias a este método los generadores de datos se pueden usar sin ninguna modificación, es decir, sin redondear ni establecer a 1 si este fuera 0.

A continuación vamos a mostrar los resultados obtenidos por las ejecuciones de este programa (los valores de  $tLleg$  y  $tServ$  utilizados son los mismo que los utilizados para 'incremento fijo').

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	33.2776	13.3367	1.33333	33.3333	0.00201
0.2	0.15	26.0537	13.8602	2.25	25	0.002512
0.3	0.28	8.08197	40.7761	13.0667	6.66667	0.001503
1	0.3	69.4173	0.419116	0.128571	70	0.002191
0.1	0.3	1.07361e-31	3.68932e-24	-	-	0.001921

Cuadro 5: Resultados con medida de tiempo en horas ('incremento variable')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	34.7177	1.46219	1.33333	33.3333	0.002441
0.2	0.15	24.9557	2.29518	2.25	25	0.002373
0.3	0.28	7.73393	12.1953	13.0667	6.66667	0.002623
1	0.3	70.0982	0.137879	0.128571	70	0.002423
0.1	0.3	0.00337951	11163.9	-	-	0.002363

Cuadro 6: Resultados con medida de tiempo en minutos ('incremento variable')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	32.4721	1.40983	1.33333	33.3333	0.003088
0.2	0.15	24.5719	2.28626	2.25	25	0.001751
0.3	0.28	7.00549	10.352	13.0667	6.66667	0.002295
1	0.3	69.9277	0.126682	0.128571	70	0.002408
0.1	0.3	0.00255436	10286.1	-	-	0.002138

Cuadro 7: Resultados con medida de tiempo en segundos ('incremento variable')

tLlegada	tServicio	% tOcio	Nº medio clientes cola	Q(teórico)	PTO(teórico)	T. ejecución
0.15	0.1	30.9166	8.49786	1.33333	33.3333	0.001559
0.2	0.15	24.2258	9.28345	2.25	25	0.002669
0.3	0.28	8.16854	25.4872	13.0667	6.66667	0.000693
1	0.3	69.7821	0.269863	0.128571	70	0.001645
0.1	0.3	0.00171617	43794.5	-	-	0.001897

Cuadro 8: Resultados con medida de tiempo en medias horas ('incremento variable')

Observando los resultados, vemos como con el método de incremento variable los valores obtenidos por las diferentes medidas de tiempo expresan resultados congruentes y similares entre las mismas. La forma en la que evoluciona el porcentaje de tiempo ocioso es igual que en el experimento anterior. En cuanto a los tiempos de ejecución vemos como son similares a los empleados en el incremento fijo.

Por otra parte, si comparamos ambos métodos mediante su precisión, concluimos que el método de 'incremento variable' obtiene resultados empíricos mas cercanos a los resultados teóricos en cada caso, esto permite deducir que este método es mas efectivo y preciso que el expuesto en el apartado anterior, aunque en algunas ejecuciones el valor empírico se desvíe demasiado del teórico, por lo cual este método no proporciona la estructura totalmente adecuada para nuestro problema.

Por último, cuando el tiempo de servicio es mayor que el tiempo de llegada (como ocurre en la última ejecución de cada tabla) esto provoca que el servidor se sature y la cola de clientes en espera se incremente muy rápidamente, ya que la gente llega con mas frecuencia de la que el servidor termina un servicio.

### 1.3. Programa de simulación dinámico y discreto

En este apartado vamos a realizar diferentes pruebas sobre el programa colammk el cual implementa, como en los apartados anteriores, peticiones de clientes hacia  $m$  servidores, estos servidores trabajan en paralelo. Este programa sigue la estructura de incremento variable de tiempo, además el procedimiento de finalización varia con respecto a los anteriores ya que en este programa la ejecución se detiene cuando haya transcurrido un cierto tiempo.

Como he comentado anteriormente se han hecho diferentes pruebas sobre este programa, para el caso de  $m=1$  se van a obtener tanto las medidas teóricas de rendimiento como experimentales. Además he realizado diferentes pruebas con distintas cantidades de servidores.

Las medidas de rendimiento utilizadas son:

1.  $TM^1$  de espera en cola
2. TM de estancia en sistema
3.  $NM^2$  de clientes en cola
4. NM de clientes en sistema
5.  $LM^3$  de colas Nvacias<sup>4</sup>
6. porcentaje de tiempo de ocio

En primer lugar se han realizado pruebas sobre el programa original.

•Para  $tlleg = 0.15$  y  $tserv = 0.1$  (horas) ,  $m = 1$ :

TM esp. cola	TM est. sis.	NM clien. cola	NM clien. sis	LM colas Nvacias	%tocio
0.2	0.3	1.33	2	3	33.333

Cuadro 9: Resultados teóricos

Tparada	TM esp. cola	TM est. sis.	NM clien. cola	NM clien. sis.	LM colas Nvacias	%tocio
100	0.176	0.276	1.149	1.755	3.059	39.350
1000	0.209	0.309	1.408	2.073	3.160	33.544
10000	0.188	0.288	1.248	1.907	2.875	34.120
100000	0.198	0.298	1.317	1.983	2.967	33.385
1000000	0.204	0.304	1.363	2.017	3.053	33.687

Cuadro 10: Resultados para  $m=1$ ,  $tlleg=0.15$  y  $tserv=0.1$

---

<sup>1</sup>TM = tiempo medio

<sup>2</sup>NM = numero medio

<sup>3</sup>LM = longitud media

<sup>4</sup>Nvacias = no vacias

• Para  $t_{lleg} = 0.3$  y  $t_{serv} = 0.28$  (horas) ,  $m = 1$ :

TM esp. cola	TM est. sis.	NM clien. cola	NM clien. sis	LM colas Nvacías	%tocio
3.92	4.2	13.06667	14	15	6.6667

Cuadro 11: Resultados teóricos

Tparada	TM esp. cola	TM est. sis.	NM clien. cola	NM clien. sis	LM colas Nvacías	%tocio
100	3.756	4.036	12.523	13.493	13.290	3.081
1000	3.518	3.798	12.119	13.065	13.486	5.388
10000	3.045	3.325	10.115	11.046	11.675	6.877
100000	3.669	3.949	12.215	13.147	13.147	6.818
1000000	4.008	4.288	13.343	14.268	15.272	6.563

Cuadro 12: Resultados para  $m=1$ ,  $t_{lleg}=0.3$  y  $t_{serv}=0.28$

Observando las tablas 9, 10, 11 y 12, donde se muestran los valores teóricos y empíricos de las diferentes ejecuciones, podemos concluir que los valores se asemejen de forma razonable a sus valores teóricos por lo que este modelo sería el más adecuado para nuestro problema comparado con los dos anteriores. Se han realizado dos combinaciones de valores de  $t_{lleg}$  y  $t_{servicio}$ , donde cada combinación a sido ejecuta 5 veces modificando el tiempo de parada.

Una vez demostrado que este modelo es el correcto para nuestro problema, realizaremos diferentes pruebas para la experimentación sobre la variación del número de servidores, de forma en la que se guarde un equilibrio entre el número de servidores y el tiempo de servicio.

T de parada	m	$t_{lleg}$	$t_{serv}$	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	2	0.15	0.2	0.107	0.307	0.699	1.994	2.216	35.260
	3		0.3	0.171	0.471	1.156	3.198	3.356	31.923
	4		0.4	0.195	0.595	1.352	4.186	4.082	29.143
1000	2	0.15	0.2	0.158	0.358	1.047	2.351	3.063	34.770
	3		0.3	0.127	0.427	0.844	2.821	3.024	34.093
	4		0.4	0.098	0.498	0.643	3.265	2.680	34.465
10000	2	0.15	0.2	0.158	0.358	1.056	2.386	2.995	33.490
	3		0.3	0.140	0.440	0.934	2.951	3.079	32.780
	4		0.4	0.112	0.512	0.745	3.406	2.959	33.461

Cuadro 13: Resultados para  $m= 2,3$  y  $4$ .  $t_{lleg}=0.15$  y  $t_{lleg}=0.1$

Para este primer experimento se han utilizado los mismos tiempos de llegada y servicio que para  $m=1$  para poder comparar los resultados obtenidos, como he comentado anteriormente se guarda el equilibrio entre el número de servidores y el tiempo de servicio ( $m \cdot t_{serv}$ ). La prueba se a realizado para  $m= 2,3$  y  $4$ , y para los tiempos de parada 100, 1000 y 10000. Como vemos los resultados obtenidos son relativamente equivalentes a los obtenidos para  $m=1$ , aunque cuando aumentamos el número de servidores se nota mejoría en el número medio de clientes en cola.



T de parada	m	tlleg	tserv	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	2	0.4	0.7	0.567	1.267	1.362	2.967	2.552	19.740
	3		1.05	0.611	1.661	1.570	4.016	2.986	18.458
	4		1.4	2.872	4.272	7.612	11.128	10.216	12.098
1000	2	0.4	0.7	1.945	2.645	4.914	6.710	6.438	10.213
	3		1.05	2.056	3.106	5.220	7.860	7.577	11.998
	4		1.4	1.500	2.900	3.689	7.150	5.889	13.474
10000	2	0.4	0.7	2.167	2.867	5.396	7.141	7.625	12.734
	3		1.05	2.711	3.761	6.833	9.497	9.755	11.196
	4		1.4	1.988	3.388	4.979	8.471	7.757	12.688

Cuadro 14: Resultados para m= 2,3 y 4. tlleg=0.4 y tlleg=0.35

En este segundo experimente he aumentado el tiempo de llegada y de servicio, a su vez también se ha reducido la diferencia entre ambos tiempos para comprobar la saturación de los servidores. Como podemos comprobar el porcentaje de tiempo ocioso se reduce, ya que los servidores estarán menos tiempo desocupados. Al mantener el equilibrio sobre el tiempo de servicio y servidores los valores entre los diferentes tiempos de parada son semejantes.

### 1.3.1. Modificación colammk

Por último, vamos a realizar diferentes pruebas sobre este programa pero ahora mostrando mas información. Esta información va a ser las medias y desviaciones típicas de las medidas de rendimiento usadas en el programa anterior.

Se van a realizar 2 experimentos: el primero con generadores de datos exponenciales y el segundo con generadores de datos uniformes.

## Generadores exponenciales

- Para m=1 , tlleg=0.15 , tserv=0.1, Tparada = 100 y 1000, num. simulaciones=100

T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	0.1462	0.2462	1.3194	1.9821	2.9704	33.7310
1000	0.1942	0.2942	1.3146	1.9785	2.9719	33.6063
Desviaciones Típicas						
T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	0.5344	0.5344	0.3514	0.3729	0.5974	3.4147
1000	0.0483	0.0483	0.1261	0.1343	0.2088	1.1842

Cuadro 15: Resultados colammk-modificado (1er experimento)

- Para  $m=1$  ,  $tlleg=0.5$  ,  $tserv=0.3$ ,  $Tparada = 100$  y  $1000$ , num. simulaciones=100

T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	0.0545	0.3545	0.8687	1.4606	2.3622	40.8067
1000	0.1523	0.4523	0.8819	1.4764	2.3981	40.5566
Desviaciones Típicas						
T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	3.1840	-nan	0.4079	0.4538	0.6545	5.9060
1000	4.6474	4.6474	0.4351	-nan	0.7171	6.0059

Cuadro 16: Resultados colammk-modificado (2º experimento)

Observando los resultados podemos decir que al calcular la media de las medidas de rendimiento de 100 simulaciones los datos son más exactos, esto significa que el valor medio obtenido de todas las simulaciones es más preciso al compararlo con el valor teórico de estas medidas. En cuanto a las desviación entre las simulaciones vemos como esta es mayor en la segunda prueba (donde  $tlleg=0.5$  y  $tserv=0.3$ ).

### Generadores uniformes

- Para  $m=1$  ,  $tlleg=0.15$  ,  $tserv=0.1$ ,  $Tparada = 100$  y  $1000$ , num. simulaciones=100

T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	0.5889	0.6889	5.8386	6.7917	6.5441	4.6869
1000	3.9300	4.0300	19.6789	20.6661	20.3371	1.2798
Desviaciones Típicas						
T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	4.3533	4.3533	3.6521	-nan	3.6108	3.3984
1000	11.2732	3.1074	10.7554	10.7613	10.7503	0.9021

Cuadro 17: Resultados colammk-modificado (3º experimento)

- Para  $m=1$  ,  $tlleg=0.5$  ,  $tserv=0.3$ ,  $Tparada = 100$  y  $1000$ , num. simulaciones=100

T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	0.5795	0.8795	5.6142	6.5636	6.4118	5.0524
1000	3.0110	3.3110	16.6208	17.6061	17.2640	1.4684
Desviaciones Típicas						
T. parada	TMEC	TMES	NMCC	NMCS	LMCNV	%tocio
100	4.5957	4.5948	3.4381	-nan	3.4806	3.8478
1000	13.3801	13.3801	9.2929	14.5925	9.2417	1.0571

Cuadro 18: Resultados colammk-modificado (4º experimento)

En esta prueba se ha modificado los generadores de datos de forma que estos son uniformes, utilizando la misma media que para el exponencial. Como podemos ver los valores obtenidos son totalmente diferentes a los conseguidos por el generador exponencial, esto se debe a que no basta con tener información sobre las medias, también influyen la aleatoriedad de los datos generados y la distribución utilizada.

## 2. MI TERCER MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETO

El problema a tratar en este capítulo se basa en el transporte marítimo de crudo. Un remolcador es el encargado de transportar los diferentes petroleros desde la bocana del puerto hasta los puntos de atraque y viceversa. Los tiempos de carga de estos petroleros varían dependiendo al tipo que pertenezcan, existen 3 tipos de petroleros (1,2 y 3). El valor de tiempo de simulación para nuestro modelo es de un año (8760 horas).

Durante la simulación ocurrirán diferentes sucesos, como llegada de los barcos, comienzo de atraque, fin de atraque, comienzo de la carga, fin de la carga, comienzo de desatraque, fin de desatraque, comienzo y fin de desplazamientos desde la bocana a los puntos de atraque y viceversa, y además habrá un suceso de tormenta, donde si esto ocurre el remolcador no podrá desplazarse.

Las medidas de rendimiento son las siguientes (junto con las desviaciones típicas de cada medida):

1. Numero medio de barcos en cola de llegadas (NMBCL)
2. Número medio de barcos en cola de salidas (NMBCS)
3. Tiempo medio de estancia en puerto (TMEP)
4. Porcentaje de tiempo del remolcador desocupado (PTRD)
5. Porcentaje de tiempo del remolcador viajando vacío (PTRVV)
6. Porcentaje de tiempo del remolcador remolcando barcos (PTRRB)
7. Porcentaje de tiempo de puntos de atraque libres (PTPAL)
8. Porcentaje de tiempo de puntos de atraque ocupados sin cargar (PTPAOSC)
9. Porcentaje de tiempo de puntos de atraque ocupados cargando (PTPAOC)

En primer lugar vamos a experimentar sobre el programa original y posteriormente introduciremos diferentes ventajas a esta simulación. Se ha realizado 3 ejecuciones para cada valor de número de simulaciones (100 y 1000).

N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1 100	1.172845	0.028515	33.133320	39.260941	51.146645	80.597534	1.267819	18.134649	13.045928	0.950505	86.003555
2 100	1.216723	0.028822	33.685627	39.814713	51.575668	80.632607	1.241808	18.125597	12.947336	0.960731	86.091942
3 100	1.189627	0.028469	33.308277	39.384327	51.421452	80.608215	1.290796	18.100975	13.193835	0.948979	85.857185
Desviaciones Típicas											
N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1 100	0.395924	0.002772	4.234477	4.272131	4.340321	0.168550	0.246618	0.246263	1.460354	0.092395	1.431517
2 100	0.395113	0.003502	4.297207	4.301585	4.271817	0.177667	0.213459	0.238034	1.288991	0.116724	1.268549
3 100	0.448167	0.003008	4.772582	4.646738	5.124553	0.172255	0.216092	0.229081	1.256815	0.100277	1.228605

Cuadro 19: Resultados obtenidos para numSimulaciones=100

	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	1000	1.244875	0.028555	34.054493	39.955238	51.912731	80.622681	1.262922	18.114433	13.029742	0.951834	86.018402
2	1000	1.214617	0.028911	33.728531	39.679428	51.559032	80.621368	1.260547	18.118082	13.000676	0.963689	86.035606
3	1000	1.230823	0.028908	33.873882	39.814812	51.784920	80.627708	1.262341	18.109962	13.018898	0.963595	86.017525
Desviaciones Típicas												
	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	1000	0.527672	0.003347	5.559376	5.580144	5.847816	0.158193	0.234072	0.240693	1.408801	0.111576	1.387417
2	1000	0.493905	0.003382	5.216257	5.251864	5.483299	0.174730	0.245209	0.243342	1.432755	0.112743	1.404091
3	1000	0.527457	0.003445	5.540516	5.596859	5.860170	0.153374	0.238217	0.243278	1.425269	0.114832	1.398913

Cuadro 20: Resultados obtenidos para numSimulaciones=1000

Los resultados obtenidos por este sistema (original) se pueden ver en las tablas 19 y 20, los valores obtenidos son semejantes entre sí, aunque podemos decir que los valores mas concretos son los obtenidos por el número de simulaciones 1000 ya que a mayor número de simulaciones las medias obtenidas serán más precisas. Si nos fijamos en las desviaciones típicas de ambas pruebas, vemos como para el número de simulaciones igual a 1000 son algo mayores por lo que esto puede llevarnos a una reducción en la precisión de los resultados.

## 2.1. Alternativa 1- Aumento de puntos de atraque

En esta mejora se va a modificar el número de los puntos de atraque de los que dispone el puerto, en vez de contar con 3 puntos de atraque se añadirán uno o dos puntos mas, es decir, habrá 4 o 5 puntos de atraque en total.

	P. atraque	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	4	100	0.086011	0.028881	21.250481	27.250643	39.244164	78.162201	3.657271	18.180531	34.725193	0.722028	64.552765
2		1000	0.086808	0.029098	21.283890	27.288689	39.271297	78.232307	3.638945	18.128788	34.714443	0.727441	64.558182
3		10000	0.087217	0.029120	21.289219	27.288975	39.268761	78.218765	3.640256	18.140799	34.652519	0.727991	64.619591
Desviaciones Típicas													
	P. atraque	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	4	100	0.011370	0.003043	0.213940	0.216142	0.175432	0.274092	0.065890	0.274379	1.126227	0.076087	1.112089
2		1000	0.012519	0.003164	0.211648	0.238079	0.206562	0.252118	0.072843	0.243278	1.080239	0.079100	1.061780
3		10000	0.012879	0.003257	0.212966	0.234212	0.219556	0.294633	0.071188	0.245980	1.078386	0.081455	1.067949

Cuadro 21: Resultados para el valor de puntos de atraque igual a 4

	P. atraque	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	5	100	0.047307	0.028975	20.848377	26.846960	38.813568	77.838745	3.994716	18.166542	47.620430	0.579500	51.800064
2		1000	0.047102	0.029252	20.851311	26.849684	38.843346	77.871147	3.992365	18.136469	47.736412	0.585039	51.678478
3		10000	0.047204	0.029249	20.849710	26.847185	38.835571	77.870232	3.991399	18.138374	47.724686	0.584987	51.690403
Desviaciones Típicas													
	P. atraque	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	5	100	0.003291	0.002666	0.117684	0.158910	0.132954	0.267092	0.062549	0.227785	0.821795	0.053316	0.814174
2		1000	0.003424	0.003226	0.125562	0.157995	0.131405	0.282984	0.063501	0.236431	0.849984	0.064525	0.834534
3		10000	0.003440	0.003209	0.124103	0.143011	0.173790	0.255356	0.064557	0.238549	0.841945	0.064191	0.843369

Cuadro 22: Resultados para el valor de puntos de atraque igual a 5

Tras analizar los resultados obtenidos por esta alternativa, podemos ver como el porcentaje de tiempo del remolcador desocupado se reduce, lo cual es lógico ya que al haber más puntos de atraque podrá realizar más acciones sin tener que esperar, por otro lado si observamos como el porcentaje de tiempo de puntos de atraque libres crece ya que al haber un mayor número de atraques tiene como consecuencia que cuando no haya suficientes barcos para ser ocupados estos puntos estén libres. Además, los tiempos de estancia medios en puerto de los diferentes tipos de barcos disminuyen, ya que la actividad del remolcador será consecutiva debido al aumento de puntos de atraque. Como es evidente, al aumentar los puntos de atraque los valores anteriormente comentados disminuyen como podemos ver comparando las tablas 21 y 22. También comentar la notable reducción del número medio de barcos en cola de llegadas.

## 2.2. Alternativa 2- Remolcador al que no le afectan las tormentas

Esta alternativa consiste en modificar el modelo para que las tormentas no tengan ningún efecto sobre el remolcador, es decir, cuando el remolcador este viajando de la bocana a los puntos de atraque o viceversa y comience una tormenta este continúe con su viaje. Para llevar a cabo esta mejora se ha eliminado la primera adición de comienzo de tormenta (la del método de inicialización), lo cual provoca que el sistema no añada ningún suceso de comienzo de tormenta durante la simulación.

	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	100	0.966904	0.010863	30.766460	36.754398	48.677521	80.486206	1.419072	18.094717	13.883859	0.362100	85.754051
2	1000	1.035425	0.010967	31.544451	37.546852	49.413738	80.527733	1.354635	18.117628	13.545501	0.365564	86.088852
3	10000	1.030821	0.010919	31.514524	37.442822	49.380016	80.525085	1.358541	18.116232	13.583857	0.363977	86.052238

Desviaciones Típicas

	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	100	0.364401	0.001392	3.799183	3.941331	4.093602	0.181186	0.239384	0.235828	1.374412	0.046416	1.363994
2	1000	0.406994	0.001391	4.258794	4.413656	4.515572	0.176156	0.237542	0.239781	1.396714	0.046368	1.391379
3	10000	0.396879	0.001362	4.167366	4.271466	4.412748	0.202988	0.236481	0.243579	1.399659	0.045397	1.380214

Cuadro 23: Resultados Alternativa 2: remolcador al que no le afectan las tormentas

Observando los resultados obtenidos por esta alternativa (Tabla 23), podemos afirmar que el porcentaje de tiempo de puntos de atraque ocupados sin cargar disminuye considerablemente, esto es debido a la modificación incluida en esta alternativa, ya que en el modelo original cuando empezaba una tormenta y el remolcador estaba viajando tenia que darse la vuelta lo que suponía un desperdicio de tiempo y además un aumento de tiempo en los puntos de atraque, en cambio con esta modificación puede ahorrarse todo el tiempo que gastaba en el modelo original. Además, se puede apreciar una disminución en los valores obtenidos referentes al número medio de barcos en cola de salidas.

## 2.3. Alternativa 3- Remolcador más rápido

En esta última alternativa, se va a modificar el tiempo de viaje del remolcador cuando viaja vacío, reduciendo este de 0.25 a 0.15. Esto acelerará los tiempos de espera

	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	100	1.218436	0.028028	33.753880	39.636765	51.707935	81.136574	0.762823	18.100599	13.006375	0.934259	86.059364
2	1000	1.196692	0.028515	33.557411	39.496227	51.355183	81.121803	0.765961	18.112259	13.032785	0.950497	86.016754
3	10000	1.211304	0.028529	33.706963	39.634296	51.531273	81.124969	0.764916	18.109825	13.028229	0.950971	86.020859

Desviaciones Típicas

	N. simula	NMBCL	NMBCS	TMEP(tipo 1)	TMEP(tipo 2)	TMEP(tipo 3)	PTRD	PTRVV	PTRRB	PTPAL	PTPAOSC	PTPAOC
1	100	0.441362	0.003035	4.674608	4.762146	4.849926	0.174078	0.133681	0.249170	1.326636	0.101156	1.321682
2	1000	0.488345	0.003402	5.178230	5.332770	5.371462	0.156603	0.140060	0.235570	1.378516	0.113385	1.348821
3	10000	0.494934	0.003317	5.260120	5.337111	5.440952	0.269828	0.141504	0.241000	1.403160	0.110546	1.378764

Cuadro 24: Resultados Alternativa 3: tiempo de viaje de remolcador = 0.15

Comparando los resultados obtenidos por esta alternativa con el resto vemos como los resultados son similares a los de la alternativa 2 (remolcador sin afectar tormentas). Al igual que en la alternativa 2 (incluso siendo menor) el porcentaje de tiempo del remolcador viajando vacío se reduce, ya que aunque a este remolcador le afecten las tormentas, el tiempo de viaje es menor por lo que se equilibraría.

## 2.4. Resultados según toneladas totales

Por último, vamos a comparar las diferentes alternativas mediante las toneladas totales transportadas. Como podemos observar en la tabla 25 las toneladas respectivas a cada modelo son muy similares, vemos como en las alternativas 2 y 3 para un número de simulaciones igual a 10000 las toneladas totales decrecen de manera espontanea. En conclusión, realizando las medias de los resultados obtenidos por las alternativas, la mejor de ellas sería la alternativa 1.

Modelo	N. simulaciones	Toneladas	N. puntos atraque
Alternativa 1	100	1773000	4
		1824000	5
Alternativa 2		1782090	
Alternativa 3		1787670	

Alternativa 1	1000	1835000	4
		1822000	5
Alternativa 2		1789255	
Alternativa 3		1788005	

Alternativa 1	10000	1789000	4
		1817000	5
Alternativa 2		70451	
Alternativa 3		69864	

A continuación se muestran tres gráficos de barras los cuales muestran la comparativa de las toneladas obtenidas en cada modelo por medio de los distintos valores de cantidad de simulaciones.

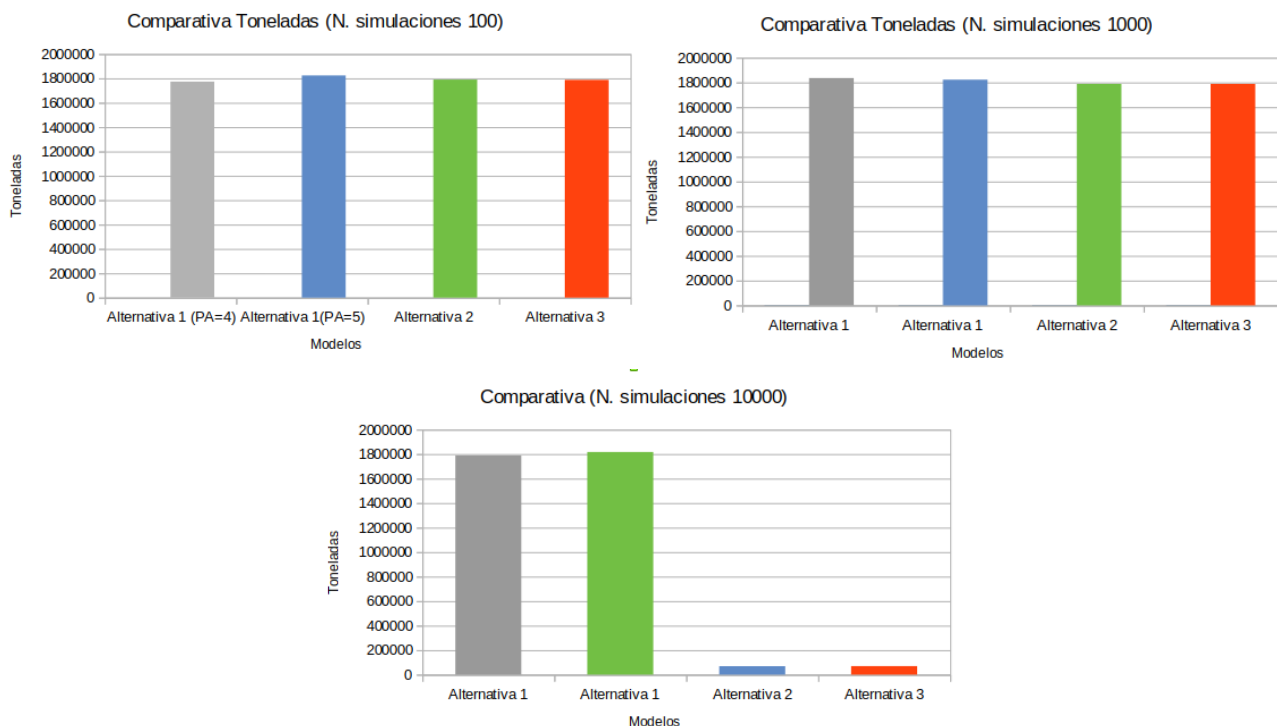


Figura 3: Código de generación de servicio de clientes

### 3. ANÁLISIS DE SALIDAS Y EXPERIMENTACIÓN

Se realizarán diferentes métodos de comparación entre los sistemas expuestos en el capítulo anterior. Estas comparaciones se van a realizar mediante la medida de número medio de barcos en cola de atraque.

En primer lugar vamos a comparar los resultados obtenidos de simular 1 vez cada sistema, esto se realizará 100 veces, a continuación repetiremos este proceso pero realizando 5, 10, 25 y 50 simulaciones por cada sistema realizando la media de los resultados obtenidos en cada ejecución, al igual que el método anterior esto se repetirá 100 veces por cada sistema.

#### 3.1. Comparativa modelos A y B

Comparativa sobre los modelos A (modelo original) y B (modelo sin afectarle las tormentas).

##### 3.1.1. Comparativa modelos A y B : 1 simulación (100 veces)

Esta primera comparativa se basa en calcular el porcentaje de ser preferible mediante la comparación del resultado obtenido por una simulación. Este proceso se repite 100 veces.

Modelo	% Preferible
A (Original)	38 %
B (Sin tormentas)	62 %

Cuadro 25: Porcentajes de preferibilidad (1 simulación : 100 veces)

Tras realizar las simulaciones hemos obtenido los resultados mostrados en la tabla 25, en el que el modelo original obtiene un 38 % frente al 62 % obtenido por el modelo del remolcador sin ser afectado por tormentas, por lo que si nos basamos en esta modo de comparativa seleccionaríamos el modelo B como preferible. Sin embargo, esta comparativa no nos proporciona una precisión muy elevada ya que todo depende de una única simulación en cada ejecución.

##### 3.1.2. Comparativa modelos A y B : 5 simulaciones (100 veces)

En este segundo modo de comparativa, vamos a realizar 5 simulaciones por cada ejecución. Realizaremos la media de dichas 5 simulaciones y esto nos proporcionará resultados más fiables.

Modelo	% Preferible
A (Original)	22 %
B (Sin tormentas)	78 %

Cuadro 26: Porcentajes de preferibilidad (5 simulaciones : 100 veces)

Como vemos en la tabla 26 (resultados de las ejecuciones), el modelo preferible sigue siendo el modelo en el que al remolcador no le afectan las tormentas. Tras realizar estas pruebas ya podemos pensar que el mejor modelo es el B. Aun así realizaremos pruebas más con cantidad de simulaciones más elevadas que serán expuestas en el siguiente apartado.

### 3.1.3. Comparativa modelos A y B : 10, 25 y 50 simulaciones (100 veces)

Repetiremos el mismo modo de comparativa que el apartado anterior, pero en este caso realizaremos la media de 10, 25 y 50 simulaciones en cada ejecución.

Modelo	% Preferible
10 simulaciones	
A (Original)	13 %
B (Sin tormentas)	87 %
25 simulaciones	
A (Original)	6 %
B (Sin tormentas)	94 %
50 simulaciones	
A (Original)	2 %
B (Sin tormentas)	98 %

Cuadro 27: Porcentajes de preferibilidad (10,25 y 50 simulaciones : 100 veces)

Tras analizar los resultados, podemos concluir que utilizando una cantidad elevada de simulaciones, la cual nos da valores más exactos sobre la variabilidad de las simulaciones, el modelo a ser seleccionado sería el B (remolcador sin afectarle las tormentas). Como sabemos a mayor número de simulaciones utilizado para realizar la media de las diferentes ejecuciones, menor es la equivocación de seleccionar un modelo.

## 3.2. Comparativa modelos A y C

En esta sección vamos a realizar los mismos pasos realizados anteriormente pero comparando los modelos A (modelo original) y el modelo C (modelo con remolcador más rápido).

### 3.2.1. Comparativa modelos A y C : 1 simulación (100 veces)

En el primer experimento como vemos en la tabla 28, el sistema el cual sería seleccionado es el C ya que obtiene un 62 % de NBCA menores con respecto al modelo A.

Modelo	% Preferible
A (Original)	38 %
C (R. más rápido)	62 %

Cuadro 28: Porcentajes de preferibilidad (1 simulación : 100 veces)



### 3.2.2. Comparativa modelos A y C : 5 simulaciones (100 veces)

En este segundo modo de comparación observamos como la diferencia de porcentajes decrece, aunque el modelo C es superior al A.

Modelo	% Preferible
A (Original)	48 %
C (R. más rápido)	52 %

Cuadro 29: Porcentajes de preferibilidad (5 simulaciones : 100 veces)

### 3.2.3. Comparativa modelos A y C : 10, 25 y 50 simulaciones (100 veces)

Para terminar, se han realizado las comparativas utilizando 10, 25 y 50 simulaciones para hacer la media en cada ejecución. Los resultados obtenidos son los representados en la tabla 30, en los cuales en todos el modelo C tiene un porcentaje mayor al modelo A, por lo cual este modelo sería elegido como preferible.

Modelo	% Preferible
10 simulaciones	
A (Original)	48 %
C (R. más rápido)	52 %
25 simulaciones	
A (Original)	44 %
C (R. más rápido)	56 %
50 simulaciones	
A (Original)	45 %
C (R. más rápido)	55 %

Cuadro 30: Porcentajes de preferibilidad (10,25 y 50 simulaciones : 100 veces)

### 3.2.4. Comparativa modelos A vs B y A vs C : 100 simulaciones (100 veces)

Para finalizar la experimentación sobre las diferentes formas de comparación de los modelos, se ha realizado una comparativa utilizando 100 simulaciones para realizar la media de la medida de rendimiento NBCA y ser comparada entre ambos modelos. Esto se ha hecho 100 veces y se ha obtenido los porcentajes como he comentado en los apartados anteriores.

Modelo	% Preferible
A vs B	
A (Original)	0 %
B (Sin tormentas)	100 %
A vs C	
A (Original)	44 %
C (R. más rápido)	56 %

Cuadro 31: Resultados comparativos

Como vemos en la tabla 31, en ambos casos el modelo original es el que menos porcentaje obtiene lo cual determina que ambas mejoras obtienen beneficio sobre el modelo original. Además, se observa como el modelo B es superior en las 100 simulaciones sobre el modelo original.

### 3.3. Intervalos de confianza

En este apartado vamos a obtener el intervalo de confianza de los modelo B y C, es decir, el modelo donde el remolcador no se ve afectado por tormentas y el modelo donde el remolcador es mas rápido. En mi caso he utilizado un valor de  $\alpha$  del 95 %, además la técnica de comparación de dos sistemas es la primera utilizada en el apartado anterior, donde el número de simulaciones por sistema era 100. La  $t_{student} = t_{99,1-\alpha/2}$  que vamos a utilizar tiene un valor de 1,9842. Para obtener este intervalo, en primer lugar, restamos los valores obtenidos por ambos sistemas para calcular la diferencia de ellos ( $R_{sinAfectarTormentas} - R_{remolcadorMasRapido}$ ), después calculamos la media y la varianza de los datos y mediante la fórmula  $[\bar{X} - t_{n-1,1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2}{n}}, \bar{X} + t_{n-1,1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2}{n}}]$  generamos el intervalo de los datos.

Tras realizar los pasos anteriormente descritos, obtenemos el siguiente intervalo:

alpha	n-1	Intervalo
0.95	99	[-0.1865 , 0.0164]

Observando y analizando el intervalo obtenido por estos dos sistemas, podemos ver como el 0 queda dentro del intervalo por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Además, se puede apreciar que la amplitud del intervalo es pequeña, lo que supone que este intervalo presenta una gran precisión. Por otro lado, vemos como el 0 esta situado mas cerca del lado izquierdo del intervalo por lo que concluimos que el mejor sistema es el modelo en el que el remolcador no se ve afectado por las tormentas.

### 3.4. Comparación de k sistemas

Por último, se ha realizado la técnica de selección del mejor entre k sistemas, siendo estos los sistemas que describen las alternativas anteriormente expuestas. Este método está constituido por dos etapas: la primera consiste en simular cada sistema  $n_0$  veces obteniendo los resultados de cada simulación, dicho valor en nuestro caso es 40. Mediante estos resultados calculamos las medias y las varianzas muestrales de cada sistema. Posteriormente calculamos los valores de  $N_i$  de cada sistema, siendo este  $N_i = \max(n_0 + 1, \frac{h_1^2 * s_i^2(n_0)}{d^2})$ . En la segunda etapa, realizamos  $N_i - n_0$  simulaciones adicionales, además calculamos las medias muestrales de los resultados. A continuación, calculamos los pesos  $W_{i1}$  y  $W_{i2}$ , mediante la fórmula especificada en la teoría. Por último calculamos las medias muestrales ponderadas resultantes. Para este método he utilizado el valor de  $d=0.01$  y  $P=0.95$  por lo que el valor de  $h_1$  es igual a 3.003. Las simulaciones adicionales se han calculado a priori. Dichas operaciones se han realizado mediante un programa en python llamado *comp<sub>k</sub>sistemas.py*.

Modelo	Media Muestral Ponderada
Remolcador sin afectarle las tormentas	0.9692013191060687
Remolcador más rápido	0.932809749018249
Mayor puntos de atraque = 4	0.08655833148297973
Mayor puntos de atraque = 5	0.04682557646193427

Cuadro 32: Medias muestrales ponderadas

Como podemos ver en la tabla 32, el valor de media muestral ponderada menor es obtenida por el programa el cual cuenta con 5 puntos de atraque, por lo que concluimos que la alternativa que aporta un mayor beneficio sobre el sistema original es el aumento de puntos de atraque a 5. Por otro lado, si variamos los valores de  $h_1$ ,  $d$ ,  $n_0$  y  $P^*$  puede que los resultados se vean afectados.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

Tema 5: Análisis de las Salidas. Experimentación y Optimización con Modelos de Simulación.

<https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/probability-and-statistics/confidence-interval/>