Simulaciones NetLogo Análisis Cola M/M/1/K/∞

Simulación 1:

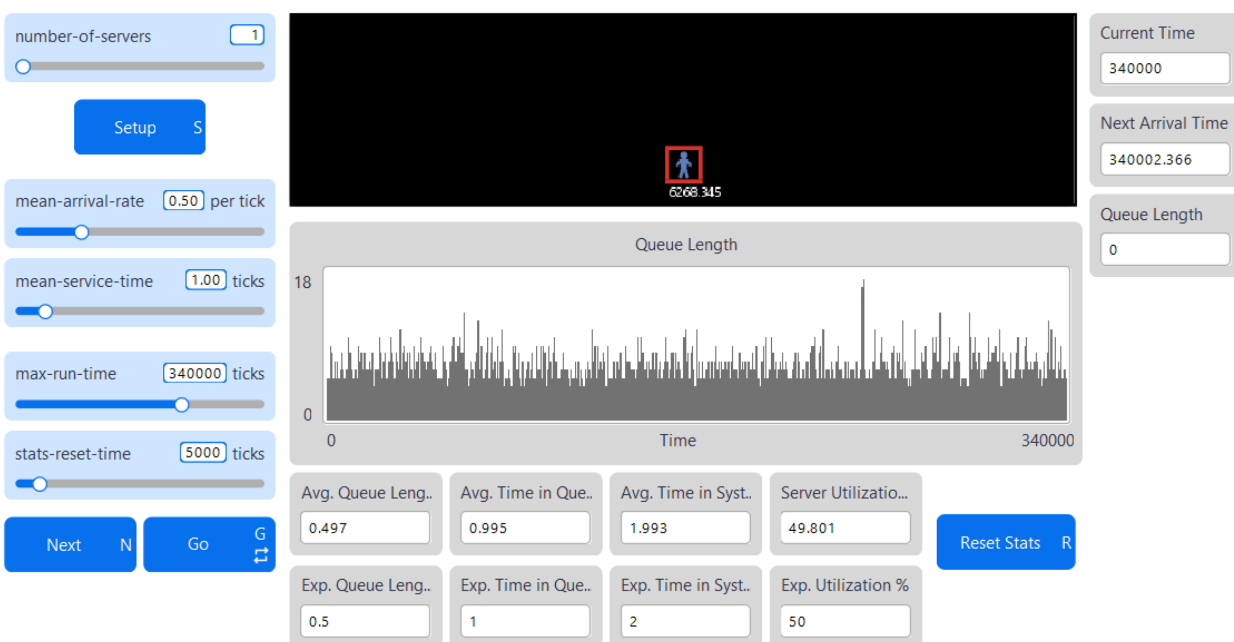
- $\lambda = 0.5$
- $\mu = 1.0$
- $\rho = \lambda / \mu = 0.5$

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} = 1.0$$

$$T_S = \frac{1}{\mu - \lambda} = 2.0$$

$$N_W = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 0.5$$

$$T_W = \frac{\rho}{\mu - \lambda} = 1.0$$



$$N_s = \lambda_{efectiva} \cdot T_s = 0.5 * 1.993 = 0.9963$$

Variable	Teórico	Simulado
N_W	0.5	0.497
T_W	1.0	0.995
N_S	1.0	0.996
T_S	2.0	1.993
Exp. Utilization %	50%	49.801%

Simulación 2:

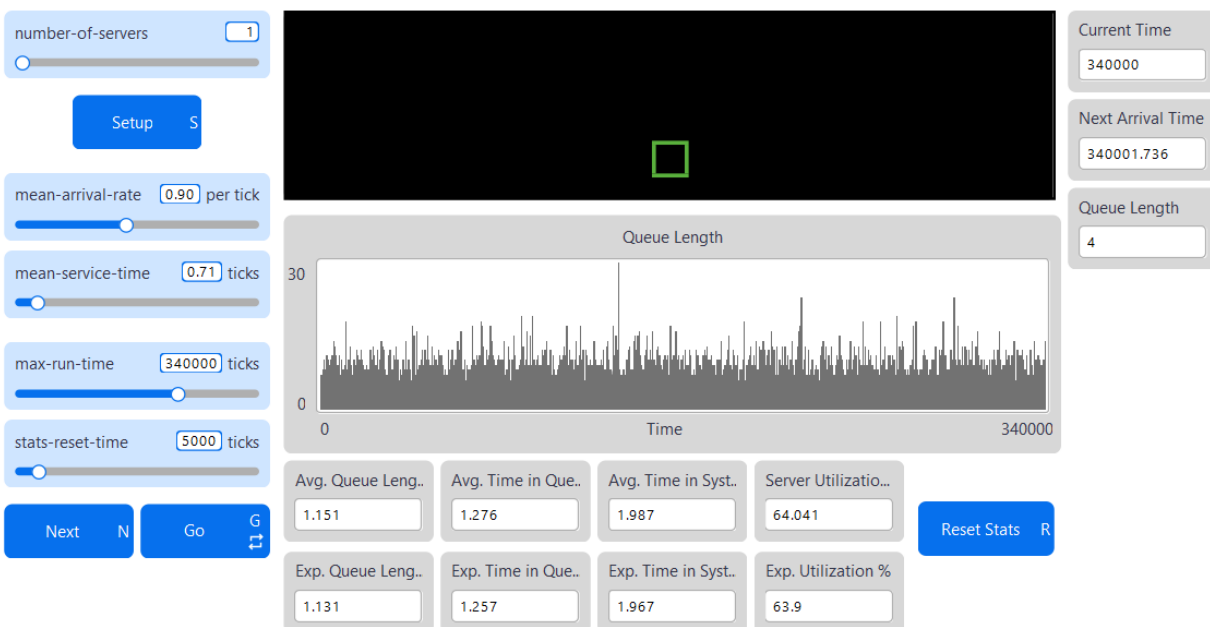
- λ = 0.9
- μ = 1.408 (porque tiempo de servicio es 0.71 ticks)
- ρ = λ / μ = 0.639

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} = 1.768$$

$$T_S = \frac{1}{\mu - \lambda} = 1.967$$

$$N_W = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 1.131$$

$$T_W = \frac{\rho}{\mu - \lambda} = 1.257$$



$$N_s = \lambda_{efectiva} \cdot T_s = 0.9 * 1.987 = 1{,}7883$$

Variable	Teórico	Simulado
N_W	1.131	1.151
T_W	1.257	1.276
N_S	1.768	1,788
T_S	1.967	1.987
Exp. Utilization %	63.9%	64.041%

Simulación 3:

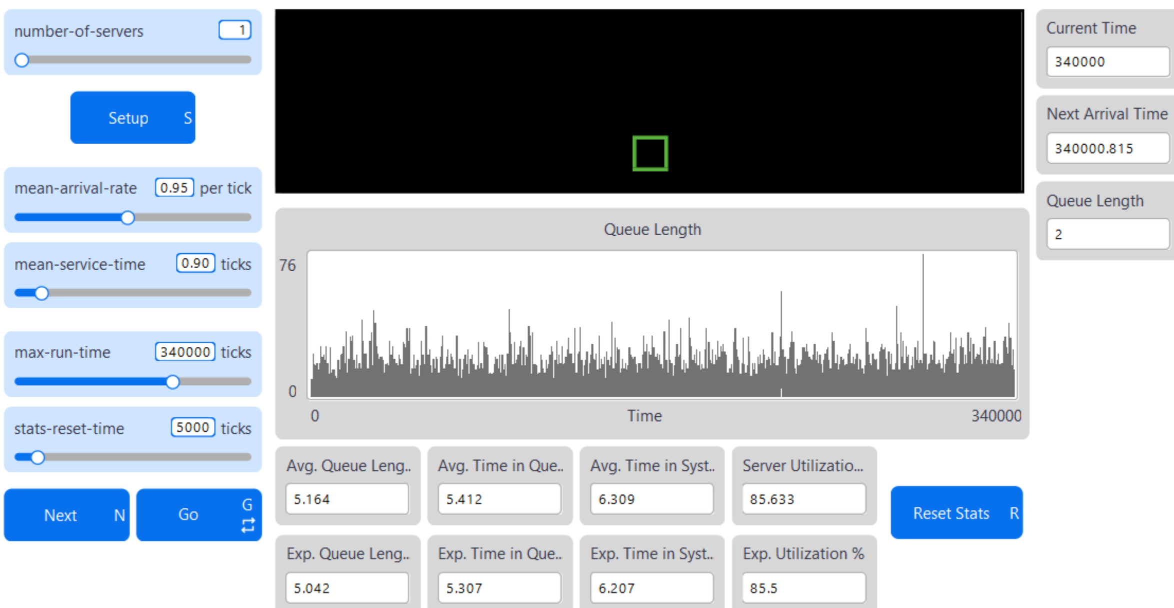
- $\lambda = 0.95$
- $\mu = 1.111$ (porque tiempo de servicio es 0.90 ticks)
- $\rho = \lambda / \mu = 0.855$

$$N_S = \frac{\rho}{1-\rho} = 5.896$$

$$T_S = \frac{1}{\mu - \lambda} = 6.211$$

$$N_W = \frac{\rho^2}{1-\rho} = 5.054$$

$$T_W = \frac{\rho}{\mu - \lambda} = 5.264$$



$$N_s = \lambda_{efectiva} \cdot T_s = 0.95 * 5.896 = 5{,}6012$$

Variable	Teórico	Simulado
N_W	5.054	5.164
T_W	5.264	5.412
N_S	5.896	5,601
T_S	6.211	6.309
Exp. Utilization %	85.5%	85.633%

Conclusiones

Los hallazgos de la simulación con NetLogo presentan una gran coincidencia con los valores teóricos del modelo de colas M/M/1/∞. Las métricas principales son: número medio de clientes en cola (N_w), tiempo medio de espera en cola (T_w), tiempo medio en el sistema (T_s) y utilización del servidor (ρ)— tienen errores relativos menores al 3% en los tres escenarios estudiados: baja, media y alta carga. Esto confirma que el modelo computacional reproduce de manera precisa lo que se anticipa en teoría.

El incremento de la duración de las colas y el tiempo de espera es un primer elemento importante que se presenta cuando la intensidad del tráfico (ρ) aumenta. Este comportamiento es exactamente lo que el modelo teórico anticipa: cuando la tasa de llegadas se acerca a la capacidad del servidor, el sistema se congestiona y los clientes sufren más retrasos. El análisis muestra que la simulación refleja este fenómeno de forma consistente.

Principalmente, tres elementos explican las pequeñas discrepancias entre los valores teóricos y los resultados simulados: el carácter estocástico del modelo, la duración finita de la simulación y la etapa de calentamiento. Ya que las simulaciones se fundamentan en procesos de servicios y llegadas aleatorios, siempre existirá una cierta variabilidad con respecto a los valores anticipados. Aunque se utilizó un tiempo de corrida extenso (340,000 ticks), la duración sigue siendo finita y las oscilaciones estadísticas continúan, especialmente en situaciones de alta carga. Por último, a pesar de que se estableció un intervalo para reiniciar las estadísticas (5,000 ticks) con el fin de reducir los impactos transitorios iniciales, todavía puede haber efectos de la fase de arranque en las mediciones.

Para concluir, el ejercicio muestra que la teoría y la simulación son muy similares, lo que confirma que el modelo M/M/1/∞ es un instrumento exacto para estudiar sistemas de colas con un solo servidor. Asimismo, enfatiza la relevancia de sumar a la indagación matemática la simulación por computadora, porque esta última facilita una representación concreta del comportamiento del sistema y una mejor comprensión de su variabilidad real. Para las implementaciones futuras, se aconseja desarrollar numerosas réplicas con semillas distintas, calcular intervalos de confianza y ampliar el tiempo de simulación, especialmente al analizar situaciones con alta demanda, para conseguir estimaciones más sólidas y representativas.