

# **TEORÍA DE COLAS Y SIMULACIÓN**

**UN ENFOQUE FUNDAMENTAL Y  
PRÁCTICO**

HUMBERTO GUERRERO SALAS  
MÓNICA NATALIA GUERRERO VELASCO

Guerrero Salas, Humberto, autor

Teoría de colas y simulación: un enfoque fundamental práctico / Humberto Guerrero Salas, Mónica Natalia Guerrero Velasco. -- Primera edición. -- Bogotá: Ecoe Ediciones, 2024.

170 páginas, 17X24 cm (Matemáticas y ciencia. Cálculo y análisis matemático).

Incluye datos curriculares del autor -- Incluye referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-508-292-2 (impreso) - 978-958-508-293-9 (pdf) -- 978-958-508-294-6 (digital)

1. Análisis estocásticos 2. Teoría de las colas -- matemáticas 3. Investigación operativa 4. Análisis de costos 5. Métodos de simulación 6 . Modelos matemáticos I. Guerrero Salas, Humberto, autor, II. Guerrero Velasco, Mónica Natalia, autora.

CDD: 519.82 Ed. 23

nla-



**Área:** Matemáticas y ciencia

**Subárea:** Cálculo y análisis matemático

**ECOE**  
**EDICIONES**

© Humberto Guerrero Salas

© Mónica Natalia Guerrero Velasco

© Ecoe Ediciones S.A.S.  
info@ecoeediciones.com  
www.ecoeediciones.com  
Carrera 19 # 63 C 32  
Teléfono: (+57) 321 226 46 09  
Bogotá, Colombia

► Cita sugerida: Guerrero Salas, H. Guerrero Velasco, M.N. (2024). Teoría de colas y simulación. Ecoe Ediciones.

**Primera edición:** Bogotá, agosto del 2024

**ISBN:** 978-958-508-292-2  
**e-ISBN (PDF):** 978-958-508-293-9  
**e-ISBN (EPUB):** 978-958-508-294-6

Coordinadora editorial: Ana María Rueda G.  
Coordinadora de producción editorial:  
Alejandra Rondón Forero  
Editora junior de contenidos: Alejandra Cely R.  
Corrección de estilo: Oscar Andrés Díaz Vásquez  
Carátula: Natalia Herrera Farfán  
Diagramación: Sindy Nicol Pulido  
Impresión: Carvajal Soluciones  
de Comunicación S.A.S.  
Carrera 69 #15-24

*La reproducción total de esta obra, ya sea en formato físico o digital, está estrictamente prohibida sin la autorización expresa del titular de los derechos. Asimismo, cualquier reproducción parcial de este libro, con o sin fines comerciales, en formato físico o digital, requiere la autorización previa.*

# DEDICATORIA

Humberto Guerrero Salas dedica este texto:

A Dios.  
A mi chiquitica, Angélica Rocío Guerrero Velasco (q. e. p. d.).  
A mi madre, Laura María Salas Reyes (q. e. p. d.).  
A mi padre, Saúl Guerrero Martín (q. e. p. d.).  
A mi hermana, María Elena Guerrero Salas (q. e. p. d.).  
A mi hija, Mónica Natalia.  
A mis hermanos, Hernando y Libardo.

Mónica Natalia Guerrero Velasco dedica este texto:

A Dios.  
A mi madre, María Patricia Velasco Cortés.  
A mi hermana, Angélica Rocío (q. e. p. d.).  
A mis hermanos, Yury Maritza y Julián David.

## AGRADECIMIENTOS

Luego de terminar esta obra, de mucho trabajo y sacrificio, nos gustaría nombrar a muchas personas; lamentablemente no se puede hacer. Nos perdonan a quienes no nombramos.

Humberto Guerrero Salas agradece y da todos los méritos especiales a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Institución para la cual labora como docente de carrera desde el 15 de febrero de 2010.

Al ingeniero Orlando de Antonio Suárez, un gran amigo y colega. Sin su apoyo y opiniones hubiera sido difícil llegar al final.

Al profesor Wilmar Alberto Díaz Ossa, sus conocimientos matemáticos fueron fundamentales en las demostraciones.

A todo el equipo de trabajo de Ecoe Ediciones; ellos han hecho posible esta publicación.

A todos los estudiantes de las instituciones universitarias que ayudaron a enriquecer la vida profesional.

# CONTENIDO

<b>PRÓLOGO</b> .....	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XIX
<b>CAPÍTULO 1. TEORÍA DE COLAS O LÍNEAS DE ESPERA</b> .....	1
1.1 Presentación.....	1
1.1.1 Objetivo general .....	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	1
1.1.3 Competencias .....	2
1.1.4 Indicadores de logro .....	2
1.1.5 Conocimientos previos.....	2
1.2 Generalidades de la teoría de colas.....	2
1.2.1 Clasificación de los modelos de colas.....	3
1.2.2 Parámetros de entrada y medidas de rendimiento .....	6
1.2.3 Distribución exponencial.....	7
1.2.4 Relación de la distribución exponencial con la distribución de Poisson .....	10
1.3 Costos asociados a un sistema de colas.....	18
1.4 Notación general de Kendall-Lee para los sistemas de colas.....	20
1.5 Modelo con una cola, un servidor y población infinita (MM1).....	22
1.5.1 Suposiciones del modelo .....	22
1.5.2 Estructura matemática del modelo.....	23

1.5.3 Aplicaciones del modelo.....	28
1.6 Modelo con una cola, servidores múltiples en paralelo y población infinita (MMS).....	36
1.6.1 Suposiciones del modelo .....	36
1.6.2 Estructura matemática del modelo .....	37
1.6.3 Aplicaciones del modelo.....	40
1.7 Modelo con una cola, un servidor y población finita (MM1m).....	45
1.7.1 Suposiciones del modelo .....	45
1.7.2 Estructura matemática del modelo.....	46
1.7.3 Aplicaciones del modelo.....	48
1.8 Modelo con una cola, servidores múltiples en paralelo y población finita (MMSm).....	52
1.8.1 Suposiciones del modelo .....	52
1.8.2 Estructura matemática del modelo.....	52
1.8.3 Aplicaciones del modelo.....	55
Ejercicios propuestos .....	59
<b>CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN .....</b>	<b>81</b>
2.1 Presentación.....	81
2.1.1 Objetivo general .....	81
2.1.2 Objetivos específicos.....	81
2.1.3 Competencias .....	82
2.1.4 Indicadores de logro .....	82
2.1.5 Conocimientos previos.....	82
2.2 Generalidades de la simulación.....	82
2.2.1 Definición de simulación .....	82
2.2.2 Etapas de un estudio de simulación.....	82
2.2.3 Ventajas y desventajas de la simulación .....	84
2.2.4 Usos de la simulación .....	85
2.3 Generación de números aleatorios .....	86
2.3.1 Método congruencial mixto .....	86
2.3.2 Método congruencial multiplicativo .....	88
2.3.3 Método de los cuadrados medios.....	89
2.3.4 Método del producto medio .....	90
2.3.5 Características de los números aleatorios.....	90
2.3.6 Pruebas estadísticas de los números aleatorios.....	90
2.4 Simulación Montecarlo .....	98
2.4.1 Método de la simulación Montecarlo.....	98
2.4.2 Aplicaciones de la simulación Montecarlo .....	98
2.5 Simulación con variables aleatorias.....	115
2.5.1 Distribución uniforme o rectangular.....	116
2.5.2 Distribución exponencial.....	118

---

2.5.3 Distribución triangular.....	120
2.5.4 Distribución normal .....	125
2.5.5 Distribución de Poisson.....	127
2.6 Tamaño de la muestra.....	129
2.7 Lenguajes de simulación .....	130
Ejercicios propuestos .....	130
<b>RESPUESTA A EJERCICIOS PROPUESTOS.....</b>	<b>141</b>
Capítulo 1.....	141
Capítulo 2.....	147
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>153</b>
<b>ACERCA DE LOS AUTORES .....</b>	<b>155</b>
Humberto Guerrero Salas .....	155
Mónica Natalia Guerrero Velasco .....	155

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de colas con servidores múltiples en paralelo.....	5
Figura 2. Modelo de colas con servidores múltiples en serie .....	5
Figura 3. Tasas del proceso de nacimiento y muerte .....	15
Figura 4. Estructura de costos de un modelo de colas.....	19
Figura 5. Características de la notación de Kendall-Lee .....	21
Figura 6. Distribución uniforme o rectangular .....	116
Figura 7. Distribución triangular .....	120
Figura 8. Distribución triangular generalizada .....	123



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ejemplos clásicos de colas .....	3
Tabla 2.	Relación entre las distribuciones exponencial y Poisson .....	13
Tabla 3.	Fórmulas del modelo de una cola, un servidor y población infinita.....	27
Tabla 4.	Fórmulas del modelo de una cola, servidores múltiples en paralelo y población infinita .....	40
Tabla 5.	Fórmulas del modelo de una cola, un servidor y población finita.....	48
Tabla 6.	Cálculo de probabilidades.....	50
Tabla 7.	Fórmulas del modelo de una cola, servidores múltiples en paralelo y población finita .....	54
Tabla 8.	Cálculo de probabilidades para los taxis .....	56
Tabla 9.	Números aleatorios obtenidos con el método congruencial mixto .....	86
Tabla 10.	Números aleatorios obtenidos con el método congruencial multiplicativo .....	88
Tabla 11.	Frecuencias observadas y esperadas .....	94
Tabla 12.	Cálculo del estadístico .....	95
Tabla 13.	Demanda del producto .....	99

Tabla 14.	Probabilidad acumulada y rangos de simulación .....	99
Tabla 15.	Demanda simulada .....	100
Tabla 16.	Distribución de probabilidad para los pilotos enfermos .....	101
Tabla 17.	Rangos de simulación para los pilotos enfermos .....	101
Tabla 18.	Simulación de los pilotos enfermos .....	101
Tabla 19.	Datos de precio, utilidad y comisión .....	103
Tabla 20.	Rangos de simulación del concesionario .....	103
Tabla 21.	Simulación de los automóviles vendidos en una semana .....	103
Tabla 22.	Distribución de probabilidad de la demanda de periódicos .....	105
Tabla 23.	Rangos de simulación de la venta de periódicos .....	105
Tabla 24.	Rangos de simulación de la venta de periódicos .....	106
Tabla 25.	Tiempo entre llegadas .....	107
Tabla 26.	Tiempo del servicio .....	107
Tabla 27.	Rangos de simulación para el tiempo entre llegadas .....	107
Tabla 28.	Rangos de simulación para el tiempo de servicio .....	108
Tabla 29.	Simulación del sistema de colas .....	109
Tabla 30.	Rangos de simulación para la demanda .....	111
Tabla 31.	Rangos de simulación para el tiempo de anticipación .....	111
Tabla 32.	Proceso de simulación de inventarios de revisión continua .....	112
Tabla 33.	Proceso de simulación de inventarios de revisión periódica .....	114
Tabla 34.	Proceso de simulación del tiempo en sierra circular.....	117
Tabla 35.	Proceso de simulación del tiempo entre llegadas .....	119
Tabla 36.	Proceso de simulación del tiempo de soldadura .....	125
Tabla 37.	Proceso de simulación del contenido de gaseosas .....	126
Tabla 38.	Proceso de simulación de la vida útil de los televisores .....	128



# PRÓLOGO

Los avances desarrollados en la aplicación del conocimiento, donde la tarea es encontrar proposiciones en los métodos operacionales de producción de bienes y servicios que sean más inteligentes y automatizados, y que faciliten la comunicación de las cosas en forma digital, han desembocado el desarrollo de la Cuarta Revolución Industrial, llamada también la “Industria 4.0”. Esta revolución en el modo de gestionar las operaciones pretende fortalecer un cambio en el sector industrial orientado a encontrar espacios más inteligentes (Industria 5.0), donde las personas y las máquinas unifiquen sus capacidades para converger en óptimas oportunidades de mejoramiento en la productividad y la competitividad organizacional.

Para el logro de estos objetivos es indispensable tener principios y técnicas administrativas eficaces, que garanticen la parametrización de las decisiones operacionales en desarrollo. Una parte importante de estas técnicas son el manejo de la teoría de colas y la simulación, materias que plasman en este texto el conocimiento y experiencia a nivel de docencia y práctica empresarial del ingeniero Humberto Guerrero Salas y la ingeniera Mónica Natalia Guerrero Velasco (un gran equipo que reúne dos generaciones), a lo largo de su amplia trayectoria laboral.

El tema tratado en este libro permitirá a estudiantes de ingeniería, administración, economistas y profesionales que se desempeñan en el campo, el poder consultar de manera sencilla y sin perder profundidad en el manejo de los diferentes modelos matemáticos, ilustrados con ejemplos y casos a seguir a lo largo de cada uno de

los temas propuestos, con la posibilidad de implementar mejoras tendientes a la optimización de las operaciones que se administran.

Es de importancia resaltar que el tema tratado en el presente trabajo es complemento de las producciones interdisciplinarias del ingeniero Guerrero, donde el esfuerzo de su labor se orienta a la divulgación y aprendizaje hacia las nuevas generaciones de profesionales, de los principios de la ingeniería industrial y de la administración de operaciones.

Ing. Orlando de Antonio Suárez

Magíster en Ingeniería Industrial

# INTRODUCCIÓN

Con base en una larga experiencia como docente de investigación de operaciones y producción, y en la continuación de publicaciones que permitan al estudiante pasar los obstáculos que se presentan en su aprendizaje matemático con mayor facilidad, y además con aplicaciones prácticas y de diario vivir en la ingeniería, se lanza el presente libro titulado *Teoría de colas y simulación. Un enfoque fundamental y práctico*.

Luego de haber publicado textos sobre programación lineal, inventarios y teoría de la decisión, se sigue con la inquietud de avanzar en el campo de la investigación de operaciones. El interés es escribir textos que hagan claridad en las explicaciones y procesos para obtener un resultado óptimo, que se ajuste a las verdaderas necesidades de la ingeniería en la sociedad de hoy. Resultado que necesariamente debe ser interpretado a la luz de las aplicaciones; y no solo en términos de variables. Por esta razón, en la presente obra se abordan de forma aplicativa y práctica las temáticas de la teoría de colas y la simulación. Estos dos temas son de mucha utilidad y aplicación dentro de la investigación de operaciones y la realidad de un mundo en pleno y constante cambio y desarrollo. Por este motivo, a través de todo el texto se tiene en cuenta la formulación del problema, construcción del modelo matemático, obtención de una solución óptima aplicando un procedimiento establecido dentro del texto, para finalmente realizar una interpretación práctica de la solución óptima.

Tal como se ha mencionado, el libro se divide en dos capítulos que llevan una secuencia lógica en el desarrollo y avance en la adquisición de los conocimientos. Estos capítulos se resumen de la siguiente manera:

- Capítulo 1. Hace referencia a la estructura general, estudio y aplicación de los modelos de teoría de colas a los fenómenos donde se presenten demoras en tiempos de la prestación de un determinado servicio.
- Capítulo 2. Se adentra en la solución de problemas organizacionales que no puedan ser interpretados fácilmente a través de un modelo matemático. Se explican los pasos a tener en cuenta en un estudio de simulación; desde la generación de números aleatorios, pasando por la generación de variables aleatorias y obtención de mejores soluciones al problema estudiado.

Vale la pena mencionar que este texto en su estructura es muy sencillo de comprender, pero se requiere obviamente de conocimientos elementales de matemáticas y estadística. Además, el texto puede ser básico no solo para ingeniería, sino también para cualquier profesión que esté interesada en el tema.

Para terminar, queremos agradecer a todas las personas que deseen colaborar con el mejoramiento de este texto enviando sus sugerencias a:

- [hguerreros@udistrital.edu.co](mailto:hguerreros@udistrital.edu.co)
- [azhguerrero@yahoo.com.mx](mailto:azhguerrero@yahoo.com.mx)
- [natikaguerrero4@gmail.com](mailto:natikaguerrero4@gmail.com)

Los autores