



Aplicación de modelos de simulación a líneas de espera, riesgos e inventarios

Application of simulation models to waiting lines, risks and inventories

Carlos Ernesto Flores-Tapia^I

 <http://orcid.org/0000-0002-1892-6309>

Karla Lissette Flores-Cevallos^{II}

 <http://orcid.org/0000-0003-0851-5319>

^I*Pontificia Universidad Católica del Ecuador*

correo electrónico: cflores@pucesa.edu.ec

^{II}*Fundación Los Andes, Ecuador*

correo electrónico: karla.floresceva@alum.uca.es

Recibido: 15 de septiembre del 2020.

Aprobado: 25 de agosto del 2021.

RESUMEN

El objetivo del presente artículo es aplicar modelos de simulación a: problemas de líneas de espera, riesgos e inventarios en diversos casos objeto de estudio; mediante la estimación de algunas medidas de desempeño matemáticas y relaciones lógicas para calcular el valor de los datos de salida dados los valores de deseables que describan el comportamiento del sistema simulado. Se emplearon modelos contienen expresiones entrada, obteniéndose resultados que permiten recomendar datos de entrada controlables para sistemas reales deseados. Se comprueba que los modelos de simulación generan estimaciones estadísticas con resultados optimizados, contribuyendo con información útil para la toma de decisiones empresariales. La simulación se apoya en herramientas informáticas especializadas que agilizan los tiempos de procesamiento y ahorran costos significativos a las organizaciones, particularmente en escenarios complejos.

Palabras Clave: empresas, simulación, riesgos, inventarios, líneas de espera.

ABSTRACT

The objective of this article is to apply simulation models to problems of waiting lines, risks and inventories to various cases under study, by estimating some desirable performance measures that describe the behavior of the simulated system. These models contain mathematical expressions and logical relationships to calculate the value of the output data given the input values, obtaining results that allow recommending controllable input data for desired real systems. It is verified that the simulation models generate statistical estimates with optimized results, contributing with useful information for making business decisions. Furthermore, if the simulation is supported by specialized computer tools that speed up processing times and save significant costs for organizations, particularly in complex scenarios.

Key Words: *business, simulation, risks, inventories, waiting lines.*

I. INTRODUCCIÓN

La Investigación de Operaciones consiste en un conjunto de técnicas que contribuyen a la solución de problemas de una amplia gama de actividades, mediante la aplicación de diversas técnicas sustentadas en modelos matemáticos. Es el caso de la simulación, caracterizada por modelos lógico- matemático, que imitan el desempeño de un determinado sistema real aplicando distribuciones de probabilidad para generar aleatoriamente los distintos eventos que ocurren en el sistema y, por lo general, se llevan a cabo utilizando software informático.

La simulación surge inicialmente con el trabajo de John Von Neumann y Stanislaw Ulam, hacia finales de la década de los años 40, quienes utilizan técnicas precursoras de la técnica de simulación, tales como el método Montecarlo y otras técnicas matemáticas. Con el advenimiento de las computadoras, en los primeros años de la década de los 50, las técnicas de simulación experimentaron avances significativos y hoy, se puede decir que, su aplicación prácticamente aborda diversos ámbitos tales como la ingeniería, los negocios, la enseñanza, el medio ambiente, la agricultura y la medicina, entre otros [1].

Por su parte, la teoría de simulación se genera en las variables que necesitan constantemente medir su estado y fluctúan como reacción de las interacciones que se producen entre las partes, como por ejemplo, las ventas, la producción, los empleados, entre otros aspectos[2;3]. A la vez que la teoría de simulación opera de conjunto con otras teorías, tales como: la teoría dinámica de sistemas, la teoría de servomecanismos y la teoría de riesgos, entre otras.

En este sentido, en el ámbito de las organizaciones, la simulación pretende la asignación eficiente de los recursos disponibles con el objetivo de satisfacer las metas deseadas: maximizar ganancias y minimizar costos. Pues, el principal problema de dichas organizaciones, como es el caso de la empresas objeto de estudio, consiste en establecer un modelo matemático que facilite soluciones óptimas en cuanto a problemas relacionados con líneas de espera, gestión de inventarios y riesgos financieros [4].

En el ámbito de las organizaciones, el principal problema es la asignación deficiente de los recursos disponibles, de tal manera que no se satisfacen dichas metas deseadas. Por tanto, mediante los modelos de simulación aquí aplicados a las empresas objeto de estudio, se calculan soluciones óptimas a los problemas relacionados con líneas de espera, gestión de inventarios y riesgos financieros [4].

En consecuencia, el objetivo de la investigación es aplicar modelos de simulación a problemas de líneas de espera, riesgos e inventarios en diversos casos objeto de estudio, mediante la estimación de algunas medidas de desempeño deseables que describan el comportamiento del sistema simulado. Siendo la hipótesis planteada la siguiente: Existen datos de entrada controlables para sistemas reales deseados que generan estadísticas con resultados optimizados, contribuyendo con información útil para la toma de decisiones empresariales.

La utilidad de la técnica de la simulación radica en su capacidad para anticipar la reacción de un sistema en estudio a las variaciones inherentes a la realidad empresarial y entorno socioeconómico y ambiental a bajos costos con respecto a la experimentación en condiciones reales. Esta técnica excepcional se puede usar para investigar virtualmente cualquier tipo de sistema estocástico convirtiéndose en la técnica de IO que más se usa en estudios que manejan este tipo de sistemas [5]. Asimismo, el investigador puede incorporar cambios en los parámetros de entrada del modelo y evaluar el impacto en los resultados de salida [6].

Entre las áreas de aplicación de la técnica de simulación se destaca la simulación de riesgos financieros, siendo ésta una de las primeras áreas de aplicación de simulación. y continúa muy activa. Definiéndose el análisis de riesgo como el uso sistemático de la información disponible para determinar la frecuencia con la que determinados eventos se pueden producir y la magnitud de sus consecuencias. Por lo tanto, mediante la exploración de todo el espacio de posibles resultados para una situación determinada, un buen análisis de riesgo puede identificar peligros y descubrir oportunidades [7].

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

La simulación de riesgo considera, por ejemplo, la evaluación de una propuesta de inversión de capital con flujos de efectivo inciertos; pues, a medida que se van generando observaciones aleatorias a partir de distribuciones de probabilidad de los flujos de efectivo en cada uno de los periodos [8; 10]. Se consideran las relaciones existentes entre periodos. Se pueden generar escenarios simulados que permiten medir y analizar el resultado de esa inversión, proporcionando una distribución de rendimiento de la inversión que permita a los administradores evaluar el riesgo de dicha inversión y su viabilidad [8; 9; 10].

Otra de las áreas de aplicación de la técnica de simulación es la gestión de inventarios. Se utiliza para conseguir mejoras en el área de entrega y almacenamiento de inventarios, vinculada en las empresas con la necesidad de entregar los productos (materia prima, en proceso y terminados) de manera eficaz, en virtud de la cada vez mayor competitividad en los mercados [5; 11]. En este contexto, la simulación de varios diseños de gestión de inventarios contribuye a tomar decisiones que mejoran la posición competitiva. Este modelo se basa en la suposición de que, tanto la demanda del producto, así como el tiempo de entrega son variables, de tal manera que el análisis preciso se vuelve extremadamente difícil con otros medios que no sea la técnica de simulación. Permite que el usuario considere políticas de operación diferentes y cambios en los parámetros del modelo y luego observe el impacto de estos cambios en los resultados de salida, tales como: la utilidad y el nivel de servicio [12]. Una tercera área de aplicación de la técnica de simulación es la línea de espera o colas, por cuanto en los sistemas de manufactura o servicios se presentan frecuentemente situaciones de líneas de espera o colas en las que las unidades que llegan a recibir servicio deben esperar antes de que puedan obtenerlo [13]. Por ejemplo: las unidades que llegan pueden formar una línea y recibir servicio a través de una sola estación, como en el proceso de maquinado de una pieza. Pueden formar una línea y recibir servicio a través de varias estaciones, como en el caso de un banco; o pueden formar varias líneas y recibir servicio a través de muchas estaciones, como en las cajas de un supermercado, tiendas, bancos, entre otros [1]. El resultado buscado es el incremento de la productividad porque cuando las colas son muy grandes los clientes se desesperan y abandonan el sistema, ocasionando pérdidas de dinero y de imagen institucional por las transacciones no realizadas [14].

Según Render, et al, (2016), en un sistema de líneas de espera, los componentes o entidades son los clientes, los servidores y los canales o filas [15]. Los eventos que pueden ocurrir son los arribos de clientes, que un cliente entre a recibir servicio o que salga de él, que un cliente salga del sistema. El estado del sistema se conforma por el conjunto de estados en que pueden estar los componentes: un cliente puede estar formado en la cola, siendo atendido por el servidor o partiendo del servidor o sistema; el servidor puede estar ocupado u ocioso, la fila puede estar vacía o contener un número identificado de clientes. El sistema puede estar funcionando o no.

Siendo la simulación una de las técnicas de análisis cuantitativo más utilizadas, se han desarrollado herramientas de software para ayudar a los analistas en la implementación de modelos computarizados.

Entre los estudios que aplican la técnica de simulación, se destaca: Portilla, Arias y Fernández, (2010). Quienes presentan un contraste entre los modelos de la Teoría de Colas y la Simulación, evidenciando su complemento mediante un estudio de caso en un sistema bancario conformado por una línea de espera preferencial y un cajero [16]. Zuñiga (2005) revisa la literatura contemporánea en el área de operaciones con el fin de conceptualizar la Investigación de Operaciones y los diversos enfoques que pueden utilizarse como el holístico y estratégico; finaliza explicando el tema de la simulación en operaciones y de la simulación de la estrategia de operaciones [17]. Olhager y Persson (2006), estudian la naturaleza de las operaciones de fabricación y la elección del sistema de control de producción e inventario adecuado. Ellos informan sobre el diseño y los efectos de aprendizaje del uso de la simulación para investigar el comportamiento y el impacto de diferentes sistemas de producción y control de inventario en un sistema de fabricación y discuten la estructura y las perspectivas de simulación de los sistemas de producción y control de inventario mediante simulación [18].

Por su parte, Gutiérrez, Recalde, Guevara y Rivadeneira (2009), explican cómo se pueden mejorar los procesos de atención a los pacientes de un centro hospitalario disminuyendo los tiempos de espera

utilizando la simulación de eventos discretos y en un estudio complementario estiman la demanda satisfecha e insatisfecha para cada especialidad; utilizan software y evalúan varios escenarios definidos a partir de las necesidades de cobertura de la demanda, de los costos asociados al incremento o disminución de médicos especialistas y de la disminución del tiempo de espera de los pacientes [19]. Mientras, Mustafa, Pratt y Dessureault (2019), señalan que en la industria minera se requiere una adecuada gestión de los cuellos de botella y proponen un enfoque de solución basado en un sistema holístico para identificar y gestionar el cuello de botella en toda la cadena de valor de la minería, mediante técnicas de simulación [20]. Finalmente, se destaca el trabajo de Lei, Lim, Cui y Wang (2019), quienes señalan que la cadena de suministro transnacional está aumentando drásticamente y el efecto dominó del riesgo se está volviendo cada vez más importante, de allí la necesidad de comprender y predecir la tendencia dinámica de la transmisión de riesgos dentro de la cadena de suministro transnacional y sus impactos es importante para evitar la propagación de riesgos; en consecuencia proponen un modelo mejorado "*susceptible-infeccioso-susceptible*" combinado con un modelo de red complejo y un enfoque optimizado para la selección de estrategias de control de riesgos verificado mediante la simulación de un escenario del mundo real basado en el terremoto y tsunami japonés de 2011 [21].

No obstante, en los estudios antes referidos no se aplica un procedimiento metodológico de la técnica de simulación de operaciones aplicado en un mismo estudio a las líneas de espera, gestión de inventarios y análisis de riesgos ni se realizan simulaciones de aproximación a distribuciones estocásticas óptimas calculadas como se realizan en la presente investigación. Por lo anterior, este trabajo se propone: aplicar modelos de simulación a: problemas de líneas de espera, riesgos e inventarios en diversos casos objeto de estudio.

II. MÉTODOS

La presente investigación es de tipo cuantitativo, caracterizado por el uso de datos cuantitativos analizados mediante técnicas estadísticas y modelación matemática computacional [8; 22]. El alcance de la investigación es explicativo. El estudio analiza las causas, condiciones y resultados en cada uno de los casos de estudio aplicando el método simplex de PL [23]. A la vez que sigue la metodología de la IO, la cual contempla, de acuerdo con los autores Alzate (2018), Flores-Tapia y Flores-Cevallos (2017), Hillier y Lieberman (2015), entre otros [5, 24, 25]. Las siguientes etapas o fases se aplicaron utilizando la técnica de simulación:

- Formulación del problema: queda claramente establecida la problemática y objetivo de la simulación.
- Definición del sistema: el cliente y el desarrollador deben acordar la frontera del sistema en estudio y las interacciones con el entorno.
- Formulación del modelo: capturando los aspectos relevantes del sistema real, incluye la estimación de distribuciones de probabilidad (iteraciones) con la finalidad de generar escenarios representativos de la forma en que un sistema se desempeñará.
- Recolección de datos: la naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo.
- Implementación del modelo en la computadora: el modelo es implementado utilizando algún lenguaje de computación.
- Verificación: en esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores durante la implementación del modelo. Para ello, se utilizan técnicas estándar o las herramientas de *debugging* provistas por el entorno de programación.
- Validación: se comprueba la exactitud del modelo desarrollado.
- Planeación de simulaciones, corridas de simulación y análisis: se decide la caracterización de los experimentos a realizar, por ejemplo, el tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones, entre otros. Se destaca que, si se simula dos veces el mismo experimento bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos no tienen por qué coincidir; aunque si se efectúan un

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

número grande de veces, deben acabar arrojando las mismas conclusiones de acuerdo con el teorema estadístico del límite central.

Presentación de recomendaciones a la administración: mediante un informe por escrito y una presentación formal a los administradores responsables para la toma de decisiones con respecto al sistema estudiado [5], [25], [26], [27] [28].

III. RESULTADOS

Siguiendo la metodología antes indicada, se desarrolla la aplicación de la simulación en tres estudios de casos empresariales relacionados, respectivamente con: análisis de riesgos, gestión de inventarios y líneas de espera. Se presentan los correspondientes resultados.

Caso 1. Simulación de Riesgo para la Empresa de Suministros Proaño Maya-Poliuretanos (ESPRM)

La empresa ESPROM ubicada en Ambato – Ecuador se dedica a la fabricación de productos para la industria de carrocerías. La gerencia está interesada en producir un nuevo modelo de asientos para vehículos y considera oportuno analizar el riesgo antes de tomar una decisión, mediante un ensayo de simulación para el cálculo de potenciales utilidades o pérdidas antes de actuar. Se considera como variables más relevantes: el precio de venta unitario dólar estadounidense (USD) de 700, los costos administrativos de 420.000,00 por año y los costos de publicidad 672.000,00 por año que permanecen fijos mientras se realiza la simulación. El costo de mano de obra directa, el costo de las partes y la demanda durante el primer año para dichos asientos se desconocen, por lo tanto, se consideran datos de entrada estocásticos. No obstante, las mejores estimaciones establecen un costo de mano de obra directa de \$120 por unidad, \$340 por costo de las partes y 8.400,00 unidades probables de demanda el primer año.

Con esta información, el modelo para el cálculo de la utilidad se formula como sigue:

$$Utilidad = (700 - c_1 - c_2)8400 - 460 \quad (1)$$

Las distribuciones de probabilidad para el costo de mano de obra directa se muestran en la tabla 1. Siendo el valor mínimo unitario de las partes \$ 320 y el valor máximo \$360 distribución uniforme. Se supone una distribución normal de la demanda siendo el valor esperado medio de 8.400,00 unidades, la desviación estándar de 1.800 unidades.

Tabla 1. Distribución de probabilidad del costo de la mano de obra directa –ESPRM

Número aleatorio Menor	Número aleatorio Mayor	Costo unitario USD.
0,0	0,1	95,00
0,1	0,3	110,00
0,3	0,7	120,00
0,7	0,9	130,00
0,9	1	145,00

Notas: el intervalo de valores aleatorios 0 y menor que 0,1 tiene correspondencia con un costo de mano de obra directa de USD. 95,00; al intervalo 0,1 y 0,3 se asocia un costo de USD. 110,00 y así sucesivamente. Con esta asignación de intervalos de números aleatorios a los posibles valores del costo de mano de obra directa, la probabilidad de generar un número aleatorio en cualquier intervalo es igual a la probabilidad de obtener el valor correspondiente del costo de mano de obra directa. De tal manera que, para seleccionar un valor del costo de mano de obra directa se genera un número aleatorio entre 0 y 1 y si el número aleatorio es 0,1 y menor que 0,3 le corresponde el costo de mano de obra directa de USD. 95,00 y así sucesivamente.

Se procede luego con la generación de valores para los datos de entrada probabilísticos y se calcula la utilidad resultante. Se calcula un segundo valor de la utilidad, hasta que los ensayos sean suficientes para describir la distribución de probabilidad de la utilidad, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados ensayos de riesgo - ESPROM

Ensayo	Costo unitario de mano de obra USD.	Costo unitario de las partes USD.	Demanda durante el primer año	Utilidad USD.
1	120	326,84	8906,5	1162781,14
2	110	330,21	8188,9	1035400,54
3	120	347,57	5996,9	301840,36
4	130	347,02	9634,6	1056340,61
5	120	335,59	10473,7	1467845,40
6	120	342,89	8957,7	1031994,54
497	110	323,13	6432,3	624610,95
498	120	353,05	7364,3	579300,63
499	145	338,08	8181,7	682735,63
500	120	341,84	8160,5	851476,86

Notas: se simulan 500 ensayos para la empresa ESPROM, los resultados de la utilidad del ensayo 1 al 6 y del 497 al 500 se muestran aquí, mientras que los ensayos del 7 al 496 se ocultan de manera que la tabla se muestre en un tamaño razonable.

Para este estudio de caso como para los otros dos contemplados en el presente artículo que, si se simulan dos veces o más el mismo experimento bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos no tienen por qué coincidir, aunque si se efectúan un número grande de veces, deben arrojar las mismas conclusiones de acuerdo con el teorema estadístico del límite central. Se destaca que cada réplica modifica los valores calculados, esto es así porque se generan aleatoriamente los distintos eventos que ocurren en el sistema. Por lo tanto, a continuación, se muestran los resultados de uno de los eventos generados aleatoriamente. Al finalizar el proceso de simulación, se pueden obtener también medidas relacionadas con los resultados del evento analizado, tales como: la utilidad promedio y la probabilidad de una pérdida, como refleja la tabla 3.

Tabla 3. Estimaciones estadísticas ensayos de riesgo
-ESPROM

Medida		
Utilidad media	USD.	909648,22
Desviación estándar	USD.	452109,04
Utilidad mínima	USD.	-269617,69
Utilidad máxima	USD.	2306600,16
Número de pérdidas		10

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

Probabilidad de pérdida		0,02
-------------------------	--	------

Notas: las estadísticas de las simulaciones que aparecen en la tabla informan sobre el riesgo asociado con el nuevo modelo de asientos para vehículos de la empresa ESPROM, obteniéndose el peor resultado en el experimento analizado, con una simulación de 500 ensayos, una pérdida de USD. -26.917,69 y obteniéndose como mejor resultado una utilidad de USD. 2.306.600,16. La utilidad media es de USD. 909.648,22 anualmente. Diez de los 500 ensayos arrojaron pérdida, por tanto, la probabilidad estimada de una pérdida es $10/500 = 0,02$, esto es el 2%.

Caso 2. Simulación de Inventarios para la tienda musical Casa Brasil

Casa Brasil es una tienda especializada en la comercialización de instrumentos musicales, cuenta con 8 locales comerciales, uno de ellos está ubicado en la ciudad de Ambato, Ecuador. Tienda musical Casa Brasil quiere establecer una política de inventarios para un su producto estrella. Cada producto cuesta USD. 130 y se vende en USD. 215 por lo que se obtiene una utilidad de USD. 85 por cada producto vendido. La demanda mensual de su producto estrella queda descrita por una distribución de probabilidad normal, con una media de 100 unidades y una desviación estándar de 18 unidades.

Tienda música Brasil recibe entregas mensuales de su proveedor y reabastece su inventario a un nivel Q o de reposición, al inicio de cada mes. Si la demanda mensual es inferior al nivel de reposición, se carga un costo de \$25 por cada unidad no vendida, mientras que, si la demanda mensual es superior al nivel de reposición, ocurre un carente de inventario y se incurre en un costo de faltante o de escasez. Por cuanto, Casa Brasil asigna un costo de \$ 50 por cada cliente que tiene que rechazar, se carga ese costo por escasez por unidad. El administrador del local comercial en Ambato necesita determinar la utilidad neta mensual promedio resultante de utilizar un nivel particular de reposición, por ejemplo, de 96 unidades, y contar con información sobre el porcentaje de la demanda total que se satisfará o lo que se conoce como su nivel de servicio.

Con estos datos se empieza a construir el modelo de simulación para la Casa musical Brasil, identificando que el dato de entrada del modelo es el nivel Q de reposición, esto es 96 unidades. El dato estocástico es la demanda mensual D y las medidas de salida del modelo son la utilidad neta mensual promedio y el nivel de servicio. Este último se calcula dividiendo las unidades totales para la demanda total. Para el experimento que se analiza en el presente artículo, cada ensayo de simulación representa un mes de operación y se ejecutará la simulación para 290 meses. En el caso en el cual la demanda es menor o igual que el nivel de reposición, la utilidad neta se calcula así:

$$Utilidadneta = Utilidadbruta - Costoderetención = \$85D - \$25(Q - D) \quad (2)$$

Utilidad bruta: USD. 85

Costo de retención: USD. 25 (Q - D)

Mientras que, si la demanda es mayor que el nivel de reposición del producto estrella de la Casa musical Brasil, se incurre en un costo de faltante o escasez, el cálculo de la utilidad neta es:

$$Utilidadneta = Utilidadbruta - Costoderetención = \$85D - \$50(D - Q) \quad (3)$$

Donde:

Utilidad bruta: USD. 85

Costo de retención: USD. 50 (D - Q)

Los resultados de los ensayos de inventario para el cálculo de la utilidad neta para el producto estrella de la Casa musical Brasil en Ambato, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados ensayos de inventario - Casa Brasil

Mes	Demanda	Ventas	Utilidad bruta	Costo Retención	Costo Escasez	Utilidad neta
1	133	96	8160	0	1854	6306

Mes	Demanda	Ventas	Utilidad bruta	Costo Retención	Costo Escasez	Utilidad neta
2	83	83	7013	337	0	6675
3	110	96	8160	0	681	7479
4	114	96	8160	0	883	7277
5	81	81	6913	367	0	6546
6	94	94	7997	48	0	7949
7	90	90	7639	153	0	7486
8	77	77	6530	480	0	6050
9	85	85	7203	282	0	6921
10	59	59	5051	914	0	4136
282	77	77	6577	466	0	6111
283	126	96	8160	0	1475	6685
284	100	96	8160	0	201	7959
285	93	93	7939	65	0	7875
286	78	78	6622	452	0	6170
287	108	96	8160	0	613	7547
288	88	88	7461	206	0	7255
289	132	96	8160	0	1825	6335
290	102	96	8160	0	323	7837
Totales	29289	26390				

Notas: se simula la operación del inventario para el cálculo de la utilidad neta del producto estrella de la Casa musical Brasil en Ambato para los 290 meses, con un nivel Q de 96, notándose que los resultados de la simulación de los meses 11 a 281 se ocultaron para que puedan indicarse en una figura de tamaño razonable. La demanda total fue de 29.289 unidades/mes y el total de ventas realizadas es de 26.390 unidades/mes.

Al finalizar el proceso de simulación, se pueden obtener también medidas relacionadas con los resultados del evento analizado, tales como: la utilidad promedio, la utilidad máxima, utilidad mínima y nivel de servicio, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Estimaciones estadísticas ensayos de inventario - Casa Brasil

Medida	USD.
Utilidad media	7110
Desviación estándar	870
Utilidad mínima	3847
Utilidad máxima	8159
Nivel de servicio	90,10%

Notas: las estadísticas resumidas de las simulaciones que aparecen en la tabla señalan lo que ocurre durante 290 meses para el evento analizado, con respecto a la operación del sistema de inventario con un nivel de reposición de 96 unidades. La utilidad neta promedio mensual es de USD. 7.110,00 con un nivel de servicio de 90,10%. La utilidad mínima esperada es de USD. 3.847,00 y la máxima esperada es de USD. 8.159,00.

Caso 3. Simulación de línea de espera para Produbanco

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

Produbanco cuenta con una de sus agencias en la ciudad de Ambato – Ecuador, la cual tiene a disposición de sus clientes un cajero automático en el ingreso al centro comercial Mall de Los Andes. La administración está interesada en averiguar si durante los períodos de mayor actividad sus clientes tendrán que esperar o no para usar el cajero automático y si un cajero resulta suficiente para atender con un nivel aceptable de calidad a los usuarios. Se establece como política que un cliente debe esperar para usar el cajero en promedio un minuto o menos.

El dato de entrada estocástico para el modelo en estudio se refiere a los tiempos de llegada de los clientes al cajero, determinados aleatoriamente considerando el tiempo entre dos llegadas sucesivas o tiempo entre llegadas. Para este caso, los tiempos se distribuyen uniformemente entre 0 y 6 minutos; no obstante, puede suponerse cualquier distribución de probabilidad de simulación de línea de espera sin que ocurran cambios en el modelo. El cálculo del tiempo entre llegadas de dos clientes sucesivos puede simularse con la siguiente fórmula:

$$Tiempo\ entre\ llegadas = a + r(b - a) \quad (4)$$

Donde:

r: número aleatorio entre 0 y 1.

a: tiempo entre llegadas mínimo.

b: tiempo entre llegadas máximo.

Siendo el tiempo entre llegadas calculado con la fórmula (4), tomando en cuenta el tiempo entre llegadas mínimo $a=0$ y el máximo $b=6$ minutos.

$$Tiempo\ entre\ llegadas = 0 + r(6 - 0) = 6r \quad (5)$$

Otro dato de entrada estocástico en el modelo de simulación del cajero automático de Produbanco es el tiempo de servicio, determinado por el tiempo que el cliente utiliza el cajero. Para este cálculo se aplica una distribución de probabilidad normal con una media de 3 minutos y una desviación estándar de 0,8 minutos. En cuanto a los datos de entrada estocásticos del modelo del cajero de Produbanco son el tiempo entre llegadas y el tiempo de servicio. El dato de entrada controlable es el número de cajeros utilizados. El resultado se conformará de varias características de operación como la probabilidad de espera, el tiempo de espera promedio, el tiempo de espera máximo, entre otras variables.

Los resultados de los ensayos de línea de espera o colas del cajero automático Produbanco, ubicado en el centro comercial Mall de Los Andes de la ciudad de Ambato, se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados ensayos de línea de espera - Cajero automático Produbanco

Cliente	Minutos						
	Tiempo entre llegadas	Tiempo de llegada	Tiempo de inicio del servicio	Tiempo de espera	Tiempo de servicio	Tiempo de finalización	Tiempo en el sistema
1	4,1	4,1	4,1	0,00	2,34	6,41	2,34
2	1,5	5,6	4,1	1,52	2,65	6,73	1,13
3	2,8	8,4	8,4	0,00	4,01	12,37	4,01
4	0,9	9,3	8,4	0,93	3,10	11,46	2,16
5	4,6	13,9	13,9	0,00	3,33	17,25	3,33
6	5,3	19,2	19,2	0,00	2,83	22,08	2,83
7	4,9	24,1	24,1	0,00	2,88	27,02	2,88
8	1,0	25,1	24,1	0,99	2,58	26,71	1,59
9	5,9	31,0	31,0	0,00	1,70	32,71	1,70

10	2,2	33,2	33,2	0,00	2,10	35,31	2,10
11	0,7	33,9	33,2	0,66	3,49	36,70	2,83
1090	5,4	3207,4	3207,4	0,00	3,91	3211,34	3,91
1091	5,7	3213,1	3213,1	0,00	2,43	3215,57	2,43
1092	3,1	3216,3	3216,3	0,00	3,45	3219,71	3,45
1093	1,4	3217,6	3216,3	1,40	2,73	3218,99	1,34
1094	0,8	3218,4	3217,6	0,80	4,50	3222,15	3,70
1095	2,6	3221,0	3218,4	2,56	4,44	3222,89	1,88
1096	5,0	3226,0	3226,0	0,00	2,99	3228,98	2,99
1097	2,9	3228,9	3226,0	2,88	3,91	3229,90	1,03
1098	3,6	3232,4	3232,4	0,00	2,76	3235,19	2,76
1099	1,3	3233,7	3232,4	1,30	4,37	3236,81	3,07
1100	0,9	3234,6	3233,7	0,91	1,59	3235,33	0,68

Notas: se simula la operación del sistema de línea de espera del cajero automático de Produbanco con 1.100 clientes. La tabla muestra los resultados del tiempo en el sistema –en minutos- del ensayo 1 al 11 y del 1.090 al 1.100, mientras que los ensayos de la simulación de los clientes 12 a 1.089 se ocultaron para que puedan indicarse en una tabla de tamaño razonable.

Se obtiene de la simulación medidas tales como: el número de clientes en espera, la probabilidad de esperar, el tiempo de espera promedio, el tiempo de espera máximo, el uso de cajero, el número de clientes en espera mayor a un minuto y la probabilidad de esperar superior a un minuto, que se refleja en la tabla 7. Las estadísticas mostradas toman en cuenta los resultados de los primeros 100 clientes como el período de inicio. Esto asegura que las condiciones de inicio no se incluyan en los cálculos de operación constante, ya que es un caso de simulación de sistema dinámico, que se lleva a cabo durante un tiempo especificado sin tomar en cuenta datos sobre la operación del sistema. La duración del período de inicio varía según la aplicación, siendo para este caso los 100 primeros clientes y los 1.000 restantes los que corresponden al período de operación constante.

Tabla 7. Estimaciones estadísticas ensayos de línea de espera
– Cajero automático Produbanco-

Estimaciones	Medida
Número de clientes en espera	418
Probabilidad de esperar	0,418
Tiempo de espera promedio	0,59
Tiempo de espera máximo	4,54
Uso de cajero	0,9262
Número de clientes en espera mayor a 1 min	249
Probabilidad de esperar mayor a 1 min	0,249

Notas: las estimaciones estadísticas muestran que 418 clientes del cajero automático de Produbanco en la agencia del Mall de los Andes, de la ciudad de Ambato, tuvieron que esperar antes de acceder al servicio, existiendo una probabilidad de 41,8% de que un cliente tenga que esperar para usar el cajero porque está ocupado por otro cliente. El tiempo de espera promedio es de 0,59 minutos por cliente, con por lo menos un usuario esperando el tiempo máximo de 4,54 minutos. La tasa de uso de 0,9262 indica que el cajero está en uso 92,62% del tiempo. Por último, 249 de los 1.000 clientes esperaron más de 1 minuto, consecuentemente la probabilidad de esperar más de un minuto para ocupar el cajero es del 24,9%.

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

Lo anterior, confirma que la agencia de Produbanco ubicada en el Mall de Los Andes de la ciudad de Ambato (Ecuador), tiene el servicio de cajero automático ocupado el 92,6% del tiempo y un tiempo promedio de espera de 0,59 minutos que satisface la directriz de servicio al cliente del banco. No obstante, se recomienda prever la instalación de un segundo cajero automático si la afluencia de clientes aumentase.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de la aplicación de simulación de Investigación de Operaciones en los casos analizados evidencian la potencialidad de esta herramienta para el cálculo de modelos probabilísticos para la toma de decisiones por parte de los gerentes y administradores de estas empresas.

En la simulación de riesgos para la empresa ESPROM se destaca que, si se compara el método de simulación con el método de análisis de sensibilidad de programación lineal se obtiene mayor información. Siendo la ventaja del método de simulación la información generada sobre los posibles valores de los resultados. Pues, con esta técnica se calcula la probabilidad de una pérdida, cómo están distribuidos los valores de utilidad dentro de su intervalo y qué valores de utilidad son más probables. Resultados que son útiles para tomar la decisión más apropiada con respecto a los intereses de las empresas. Inicialmente el análisis de riesgos mediante simulación se conoció como simulación Monte Carlo.

Los estudios de simulación para tomar decisiones sobre la política de inventario contribuyen a mejorar las decisiones de operación de la empresa Casa Brasil. La gerencia está en condiciones de utilizar la simulación para: seleccionar el nivel de reposición, explorar la sensibilidad de esta decisión con respecto a determinados parámetros. Variables del modelo, tales como: el costo de incumplimiento o faltante para cualquier demanda del cliente no satisfecho y el nivel de servicio. En este sentido, cabe señalar que la simulación es una técnica de optimización, esto significa que se utiliza para seleccionar un nivel de reposición que garantiza que dicha selección es óptima. Pues pueden someterse a prueba todos los eventos posibles de reposición, y observar que otros tantos valores de demandas generadas aleatoriamente no cambian la utilidad máxima. Se atiene al teorema estadístico del límite central, con un gran número de ensayos de simulación es posible encontrar por lo menos una solución óptima.

Cabe destacar que los modelos de simulación aplicados al análisis de riesgos y gestión de inventarios estudiados, en este artículo, se basan en ensayos independientes en los que, los resultados de un evento no afectan a los subsiguientes. Se logra que el modelo aplicado (simulación estática) no cambie ni evolucione con el tiempo.

El caso del cajero automático de Produbanco es de modelo de simulación dinámica de eventos discretos, porque incorpora un reloj o cálculo del tiempo para registrar la hora en que cada cliente llega en busca de servicio, así como la hora en que cada cliente termina el uso del cajero. Adicionalmente, una ventaja de los modelos de línea de espera, como dicho caso basado en tiempos de llegada y tiempos de servicio uniformemente distribuidos, es la flexibilidad para estimar diferentes distribuciones de probabilidad. Todo lo anterior, corrobora la fundamentación teórica que sustenta esta investigación, principalmente lo señalado por Banks et al. (2005); Flores-Tapia & Flores-Cevallos (2017); Taha (2017); Vergara & Maza, entre otros [11], [25], [26], [29].

V. CONCLUSIONES

1. Se encontraron soluciones óptimas a los problemas de: líneas de espera, riesgos e inventarios en los tres casos de estudio empresariales, mediante la estimación de algunas medidas de desempeño deseables que describan el comportamiento del sistema simulado.
2. Se comprueba que existen datos de entrada controlables para sistemas reales deseados que generan estadísticas con resultados optimizados, contribuyendo con información útil para la toma de decisiones empresariales.
3. La aplicación de los modelos cuantitativos de investigación de operaciones, con el apoyo de herramientas informáticas, como las hojas de cálculo y programas especializados de simulación: agilizan los

tiempos de procesamiento y ahorran costos significativos para las organizaciones que necesitan información oportuna para la toma de decisiones técnicas. No obstante, la simulación conduce a sistemas deseables, en la medida que proporciona soluciones óptimas. De tal manera que los decisores organizacionales utilizan los resultados obtenidos para diseñar, principalmente, estrategias, estructuras y estilos de gestión que permitan la consecución de los objetivos institucionales. 

VI. REFERENCIAS

1. A. López-Sánchez, A. González-Lara, and S. Alcará-Corona, Simulación para la optimización de la producción de ejes en la línea de ensamblaje de una empresa de manufactura. *Ing. Investig. y Tecnol.* 2019; (XX) 1:1-9, 2019. ISSN 2594-0732. doi:[10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.005](https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.005).
2. E. Martínez, C. González, G. Rosario, and C. Hernández. Integración de la simulación, la regresión y la optimización multiobjetivo para determinar recursos en un banco. 2018; 39(1):140-150, 2018. ISSN 2224-5405
3. A. Sarmiento-Vásquez and E. López-Sandoval. Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes, *Ing. Ind.* 2017; 35(1): 27. ISSN 1025-9929. doi: [10.26439/ing.ind2017.n035.1789](https://doi.org/10.26439/ing.ind2017.n035.1789).
4. J. Heizer and B. Render, *Process Strategy*, 7ma. México: Prentice Hall Inc., 2020. ISBN 979-84-923846-8-6.
5. F. Hillier and G. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, 10th ed. New York: McGraw Hill, 2015. ISBN 978-1-83862-436-437-7
6. D. Anderson, D. Sweeney, and T. Williams. *Métodos cuantitativos para los negocios*, 13th ed. México: Cengage Learning, 2016. ISBN 979-84-16062-32-4.
7. A. Barañano, I. De La Peña, and A. Garayeta. Medición del riesgo de suscripción mediante modelos internos en Solvencia II. *Innovar.* 2016; (26)62: 113-128. ISSN 0121-5051, doi: [10.15446/innovar.v26n62.59392](https://doi.org/10.15446/innovar.v26n62.59392).
8. C. Flores-Tapia and L. Flores-Cevallos. Herramientas para simulación de matrices productivas óptimas del Ecuador. *Econ. Adm.* 2016; (7) 2:101-112. ISSN 2219-6722. J.
9. Inquilla-Mamani and O. Rodríguez-Limachi. Análisis de riesgo mediante el método de simulación de Montecarlo aplicado a la inversión pública en el sector educativo peruano: el caso del departamento de Puno," *Praxis (Bern. 1994).* 2019(15)2:163-176. ISSN 1409-309X .
10. H. Banguero, H. Duque, P. Garizado, and D. Parra. Estimación de la matriz insumo producto simétrica para el Valle del Cauca - año 1994. Cali, pp. 1-21, 2006. [Fecha de consulta: 27 de agosto del 2021]. Disponible: <https://editorial.uao.edu.co/estimacion-de-la-matriz-insumo-producto-simetrica-para-el-valle-del-cauca-ano-1994-economia.html>.
11. H. Vergara. *Investigación de operaciones*, vol. 10. México: Pearson Educación, 2017. ISBN 968-6223-25-8.
12. K. Chicaiza, A. Gómez, P. Ruiz, and L. Cevallos-Torres. Modelo de simulación para la optimización del inventario de una distribuidora, basado en Simulación Monte Carlo y Algoritmo Metaheurístico Genético. *Ecuadorian Sci. J.* 2019; (3)2: 33-38, 2. ISSN 2602-8077.
13. F. Jiménez, J. Vargas, J. Toro, and Y. Rodríguez. Comparación por simulación de sistemas de manufactura tipo push y pull. *Cienc. e Ing. Neogranadina.* 2019;(29) 1:81-94. ISSN 0124-8170, doi: [10.18359/rcin.3075](https://doi.org/10.18359/rcin.3075).
14. J. Narváez-Gómez, W. Ordoñez-Luna, and N. Paz-Ruiz. Analysis and simulation of waiting times by applying queuing theory in a transport terminal. *Publicaciones e Investig.* 2018; (12) 2:35-43, 2018. ISSN 1900-6608.
15. B. Render, R. Stair, M. Hanna, and T. Hale, *Métodos cuantitativos para los negocios*. México D.F.: Pearson, 2016.
16. L. Portilla, L. Arias, and E. Fernández. Análisis de líneas de espera a través de teoría de colas y

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN A LÍNEAS DE ESPERA, RIESGOS E INVENTARIOS

simulación. *Sci. Tech.* 2010; (3)46:56–6. ISSN 0122-1701.

17. R. Zuñiga. Operaciones: concepto, sistema, estrategia y simulación. *Acad. Rev. Latinoam. Adm.* 2005; (34)1:1–24. ISSN 1012-8255.
18. J. Olhager and F. Persson. Simulating production and inventory control systems: a learning approach to operational excellence. *Prod. Plan. Control.* 2006; (17) 2:113–127. ISSN 1366-5871.
19. S. Gutiérrez, D. Recalde, A. Guevara, and G. Rivadeneira. Optimización del sistema hospitalario ecuatoriano: Estudio, modelización, simulación y minimización de tiempos de espera de pacientes de consulta externa. *Rev. Politécnica.* 2009; (30)1:83–90. ISSN 1390-0129.
20. M. Mustafa, W. Pratt, and S. Dessureault. Bottleneck identification and ranking model for mine operations. *Production Plan. Control.* 2019; 1. ISSN 1366-5871, doi: [10.1080/09537287.2019.1701231](https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1701231).
21. Z. Lei, M. Lim, L. Cui, and Y. Wang. Modelling of risk transmission and control strategy in the transnational supply chain. *Int. J. Prod. Res.* 2019; (10). ISSN 1366-588X.
22. S. Robbins, *Administración*, 12th ed. México: Pearson Educación, 2015. ISBN 978-607-4423-884
23. M. Galindo. Producción de alimentos apoyada con programación lineal. Universidad Rafael Landívar, 2016. ISBN 978-958-9386-3-7.
24. P. Alzate, *Investigación de operaciones: conceptos fundamentales*. Bogotá D.C.: Ediciones de la U, 2018. ISBN 9789587627497.
25. C. Flores-Tapia and L. Flores-Cevallos. *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones*. Ambato: Fundación Los Andes, 2017. ISBN 978-84-17583-40-8
26. J. Banks, J. Carson, B. Nelson, and D. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 4th ed. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2005. ISBN 9780136062127.
27. A. Acevedo, G. Vilma, P. Duwanmg, H. Fernández. Estudios cuantitativos sobre correlación de la TRM y el precio del petróleo referencia WTI con base en la prueba de normalidad Jarque- Bera y del método de coeficiente de Hurst, in *Congreso Internacional en Administración de Negocios Internacionales*, 2019, no. October 2017, pp. 225–237. ISBN 978-84-16286-59-1
28. J. Vergara and F. Maza. Structural Equation Models Applied for Evaluating Service Quality and Satisfaction in the Healthcare System of Cartagena de Indias D. T. y C. (Colombia). *Econ. Sociol.* 2018; (11)2:200–215. ISSN 2071-789X. doi: [10.14254/2071-789X.2018/11-2/14](https://doi.org/10.14254/2071-789X.2018/11-2/14).

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de cada autor es:

Carlos Ernesto Flores-Tapia: participó en el análisis de los datos, definición de discusión y revisión bibliográfica. Colaboró en la redacción del texto.

Karla Lissette Flores-Cevallos: participó en el análisis de los datos, definición de discusión y revisión bibliográfica. Colaboró en la redacción del texto.