

DISEÑO DE UN MÉTODO DE EVALUACIÓN PARA LÍNEAS DE PRODUCCIÓN EN SERIE A TRAVÉS DE CONCEPTOS DE LÍNEAS DE ESPERA, REGRESIÓN Y SIMULACIÓN

DESIGN OF AN EVALUATION METHOD FOR SERIAL PRODUCTION LINES THROUGH CONCEPTS OF QUEUING SYSTEMS, REGRESSION AND SIMULATION

Karla Paola López Martínez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
M1903015@itcelaya.edu.mx

Salvador Hernández González

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
Salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 28/mayo/2020

Aceptación: 4/febrero/2021

Resumen

El estudio de la capacidad de producción se realiza a través de métodos de evaluación, que pueden ser de tipo analíticos o de simulación. A pesar de que estos son eficientes, pueden presentar dificultades al ser aplicados. Por lo que, el objetivo de este trabajo es diseñar un método de evaluación para líneas de producción en serie a través de conceptos de líneas de espera, simulación y regresión aprovechando las ventajas de cada uno de los enfoques. Este deberá calcular la capacidad de producción con precisión para que, posteriormente, las organizaciones tomen las decisiones adecuadas para la optimización de sus sistemas. La construcción y simulación del modelo representativo del sistema de producción se realizará a través del software Arena. De igual manera, se utilizó Minitab y Excel para el análisis de los datos.

Palabras clave: método de evaluación, líneas de espera, simulación, regresión, rendimiento.

Abstract

The study of production capacity is carried out through evaluation methods, which may be analytical or simulation. Although efficient, they can be difficult to apply. Therefore, the objective of this work is to design an evaluation method for serial production lines through queuing systems, simulation and regression concepts taking into consideration the advantages of each of the approaches. It will have to calculate production capacity precisely so that organizations can then make the right decisions for the optimization of their systems. The construction and simulation of the representative model of the production system will be carried out through the Arena software. Similarly, Minitab and Excel were used for data analysis.

Keywords: *evaluation method, queuing system, simulation, regression, throughput.*

1. Introducción

Dentro de la industria, se ha vuelto una necesidad el estudiar la capacidad de rendimiento de sus líneas de producción. Puesto que este indicador señala el número de productos buenos que emergen de un proceso productivo, comparada con la cantidad de materiales que entraron. Su análisis permite determinar a qué grado es utilizado cada uno de los recursos y así definir una estrategia de optimización. Para las empresas es importante obtener este conocimiento ya que define sus límites competitivos.

La optimización de procesos de producción se ha vuelto clave en el crecimiento de las organizaciones. Debido a que permite que las organizaciones trabajen en el punto exacto donde generen mayor utilidad, es decir, aumentar la eficiencia organizacional mejorando sus procesos. La optimización incluye, reducir costos, mejorar la comunicación, automatizar, detectar cuellos de botella, mejorar la calidad del producto, reducción en los tiempos de entrega o tiempos de proceso, eliminación de actividades que no agreguen valor, entre otras.

Existen diferentes técnicas que permiten realizar el análisis de modelos de una línea de producción para obtener su capacidad de rendimiento, se les conoce como métodos de evaluación o predicción. Estos se dividen en dos enfoques: analíticos y de simulación.

Los métodos analíticos implican soluciones matemáticas basadas en teoría de colas. Por otro lado, los de simulación se basan en representaciones reales de los sistemas de producción a través de un software [Papadopoulos, O'Kelly, Vidalis, & Spinellis, 2009].

A pesar de que los métodos descritos anteriormente son eficientes, tienden a tener ciertas limitaciones. Por ejemplo, el método analítico puede obtener la capacidad de rendimiento de la línea con buena precisión, pero se dificulta su implementación en sistemas complejos y con un gran número de estaciones. Por otro lado, el método de simulación, aunque es más eficiente para sistemas complejos, la construcción del modelo consume tiempo que un procedimiento analítico. Además, presenta problemas al momento de su validación.

Debido a lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo diseñar un método de evaluación a partir de los métodos analíticos y de simulación. Permitiendo obtener la capacidad de producción de una línea en serie sin presentar complicaciones al momento de su aplicación. Se busca que el método aproveche las ventajas de ambos enfoques, utilizando teoría de colas, realizando una simulación en el software de Arena, analizando los datos mediante un análisis de regresión y validando su eficiencia. La línea de producción a estudiar deberá estar compuesta por estaciones de trabajo con buffers para mantener el producto fluyendo a lo largo de la línea (Figura 1).



Figura 1 Línea de producción genérica.

Cada estación de trabajo se compone por una o más máquinas, uno o más operadores y un búfer. Cuando el proceso finaliza en una estación de trabajo, los

trabajos que salen se unen al búfer en la siguiente estación, siempre que haya espacio disponible; de lo contrario, estos trabajos normalmente se mantienen en la estación de trabajo actual hasta que haya espacio disponible en el siguiente búfer [Altiok & Melamed, 2007].

La aplicación del método en el sistema de producción elegido dará como resultado una ecuación de regresión, que de acuerdo con Hines y Montgomery (1996) deberá dar a conocer la forma exacta de la relación verdadera entre las variables Y y x. La adecuación de un modelo de regresión debe comprobarse, es decir, se estudia lo apropiado del modelo y la calidad del ajuste determinado [Montgomery, Peck, & Vining, 2006]. Por lo tanto, se definirán criterios, dentro del método, que comprueben dicha adecuación y se pueda elegir el modelo más apropiado.

2. Métodos

El artículo se desarrolló en base al método de investigación que se muestra en la figura 2. Este método consta de las siguientes cinco etapas:

- **Etapa 1:** consiste en describir ampliamente el problema a investigar. Esta etapa está conformada por una serie de actividades: identificación, donde se descubre el tema a abordar; valoración, evaluación de la pertinencia, importancia o relevancia; formulación, elaboración del problema en forma de pregunta; definición, revisión de los antecedentes; y delimitación, supone la precisión y delimitación de los aspectos concretos. Como resultado de este grupo de actividades obtendremos el objetivo general, objetivos específicos y la justificación.

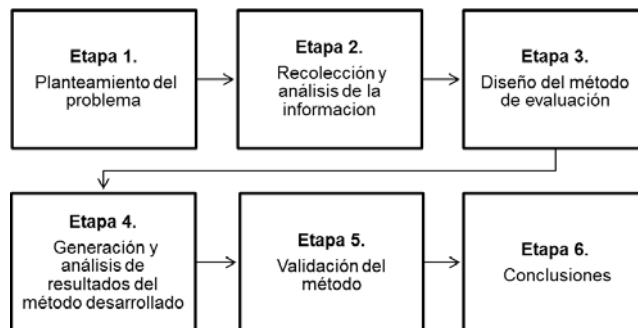


Figura 2 Método de la investigación.

- **Etapa 2:** revisión literaria de artículos científicos y libros relacionados con el tema en cuestión. Con el fin de analizar los métodos de evaluación ya existentes, y así determinar cuáles serán utilizados como base del método que se desarrollará. Esta etapa ayudará a generar o ampliar los conocimientos sobre temas como métodos de evaluación, sistemas de producción, teoría de colas, simulación, regresión lineal, metamodelos y, asimismo, nos permitirá construir el marco teórico de esta investigación.
- **Etapa 3:** una vez entendidos los conceptos de la etapa anterior, se procederá a plantear los pasos a seguir que conformarán el método de evaluación. De igual manera, será necesario contar con conocimientos en el software Arena para la construcción del modelo de simulación del sistema de producción a estudiar. Debido a que en esta etapa se construirá el modelo de simulación y se identificarán las variables de respuesta a estudiar.
- **Etapa 4:** una vez construido el modelo de simulación, se realizarán réplicas del modelo en el software Arena utilizando diferentes tamaños de búfer con valores de 10, 6 y 2 para cada estación del proceso. La variable de respuesta de nuestro modelo será el valor de throughput. Con los valores de throughput obtenidos de cada simulación se construirá la base de datos en Excel. El análisis de los datos obtenidos de la simulación se realizará en el software de Minitab a través de una regresión. Esto nos permitirá saber si el modelo estudiado es adecuado y poder identificar las variables e interacciones significativas. Como resultado tendremos una ecuación de regresión, la cual se utilizará en la siguiente etapa para la validación de nuestro método.
- **Etapa 5:** se validará el método diseñado realizando otra simulación del sistema con valores de búfer del 2 al 10. Se construirá otra base de datos a partir de los resultados obtenidos y se repetirán los pasos de la etapa anterior. Para la validación del método, se utilizarán valores al azar del 2 al 10 en la ecuación de regresión. Comparando los valores obtenidos de la ecuación y los valores de throughput del modelo simulado, se obtendrá el porcentaje de error del modelo. Este porcentaje determinará la eficacia del método diseñado.

- **Etapa 6:** se redactan opiniones finales del trabajo realizado, ya sean sugerencias de mejora, cambios al modelo, entre otras. La investigación concluirá con una contribución significativa al campo de la administración de las operaciones industriales.

3. Resultados

El sistema de producción estudiado es una línea productora de empaques tomada de Altiok y Melamed [2007]. La línea se compone de cinco estaciones de trabajo que realizan las actividades de llenado, taponado, etiquetado, sellado y empaquetado de cajas, ver figura 3. Las unidades de productos individuales se denominarán simplemente unidades.

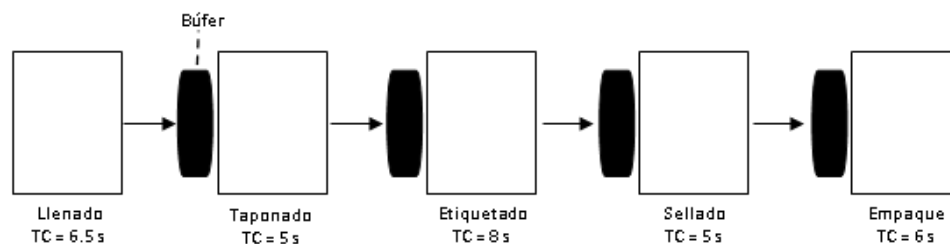


Figura 3 Sistema de producción de empaques.

La estación de llenado siempre tiene material frente a ella, para que nunca comience. El espacio intermedio entre estaciones de trabajo puede contener como máximo cinco unidades. Mientras que, una estación de trabajo se bloquea si no hay espacio en el búfer inmediato posterior. La línea es de régimen de empuje. En la cual no se ha introducido ninguna aleatoriedad, es decir, la línea de envasado es determinista.

Para modelar la línea de producción se utilizó el software Arena. El modelo se realizó mediante un módulo de proceso del panel de plantilla de proceso básico, declarando que cada proceso tiene una cola frente a él, figura 4.

Una vez construido el modelo de producción en el software se procedió a realizar la simulación. Consistió en 24 corridas de 10 réplicas, para las cuales se utilizaron diferentes tamaños de búfer con valores de 2, 6 y 10 de manera aleatoria en los

procesos de Capping (taponado), Labelling (etiquetado), Sealling (sellado) y Packing (empaquetado). Al finalizar cada corrida, se tomó el valor de throughput de la hoja de resultados estadísticos para construir la base de datos en Excel. Como siguiente paso, los datos fueron analizados en el software de Minitab utilizando el enfoque de regresión para tener un mayor control sobre las variables.

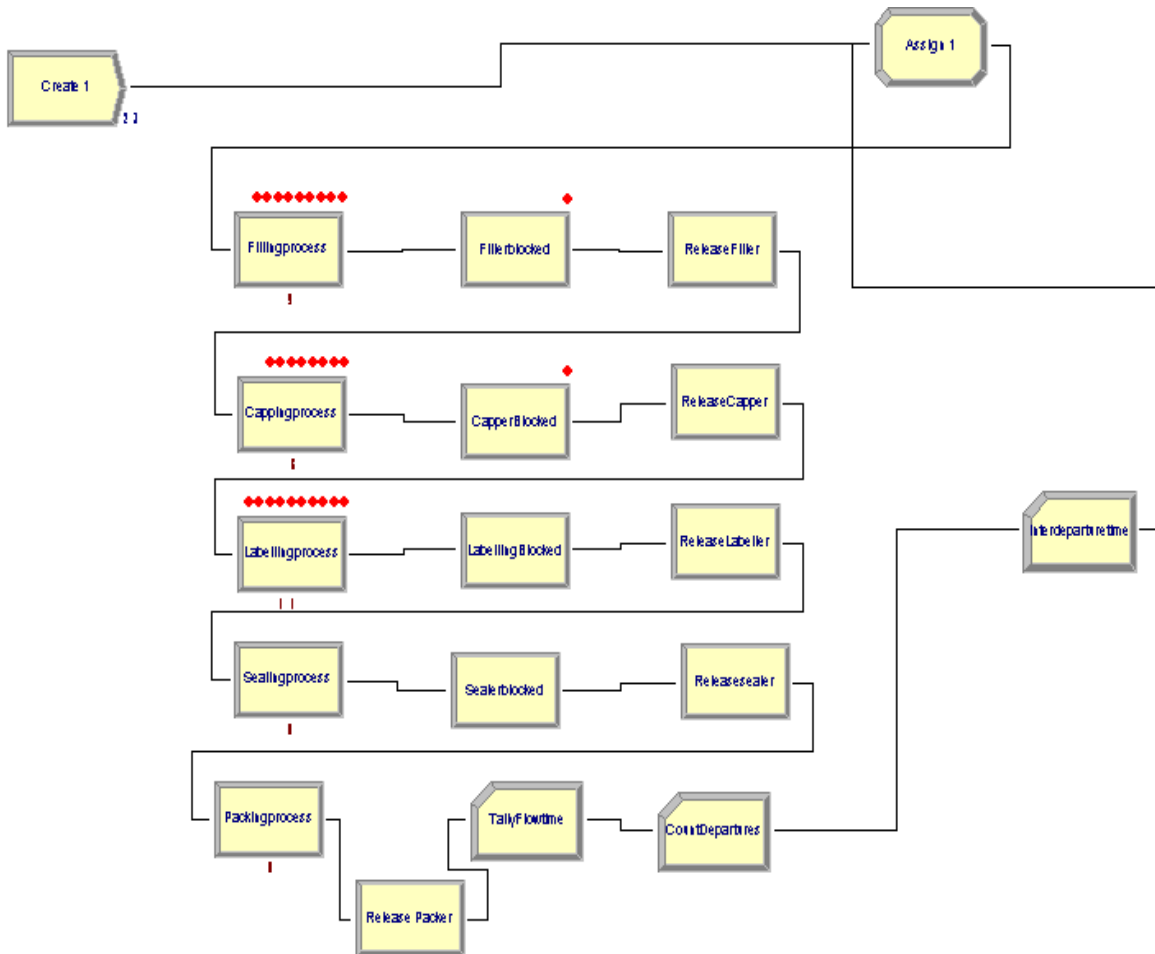


Figura 4 Modelo de simulación del sistema de producción en el software Arena.

El análisis de regresión se realizó bajo tres escenarios: variables sin interacciones, variables con interacciones y utilizando el método stepwise. De cada escenario se tomó el valor de R^2 , debido a que este es el primer criterio definido para tener el modelo que mejor se ajuste. En la tabla 1 se muestra un resumen de los análisis de varianza de los tres modelos de regresión.

Tabla 1 Resumen ANOVAs.

	Variable	Símbolo	P-value	R ²
Escenario 1	Capping	C	0.091	71.30%
	Labelling	L	0	
	Sealing	S	0	
	Packing	P	0.549	
Escenario 2	Capping	C	0.678	91.82%
	Labelling	L	0.331	
	Sealing	S	0.533	
	Packing	P	0.069	
	CappingXLabelling	CXL	0.409	
	CappingXSealing	CXS	0.363	
	CappingXPacking	CXP	0.317	
	LabellingXSealing	LXS	0.001	
	LabellingXPacking	LXP	0.242	
SealingXPacking	SXP	0.028		
Escenario 3	Capping	C	0.002	88.57%
	Labelling	L	0.803	
	Sealing	S	0.199	
	Packing	P	0.005	
	LabellingXSealing	LXS	0	
	SealingXPacking	SXP	0.027	

La tabla 1 muestra los valores de P-value para cada una de las variables. Las marcadas con verde hacen referencia a las variables que impactan en el modelo ya que sus valores son menores a 0.05. Y como se puede observar, hay una variable marcada con amarillo con un valor de 0.069 que se tomará como significativa ya que su diferencia entre 0.05 es mínima. Con los resultados de los tres ANOVAs se descarta el primer análisis donde únicamente se toman en cuenta las variables sin sus interacciones, ya que nos da una R2 del 71.30%. Sin embargo, aún se tienen dos posibles modelos de regresión y para obtener el que se ajuste de mejor manera y nos de mayor precisión, se procedió a realizar su validación. Para la validación del modelo, se realizó una segunda simulación con 24 corridas de 10 réplicas. En esta simulación se utilizaron valores del 2 al 10 de manera aleatoria para los buffers. Se tomaron nuevamente los valores de *throughput* de cada corrida y se obtuvo una segunda base de datos. Estos se sustituyeron, primeramente, en la ecuación de regresión del escenario 2, ecuación 1 y sus resultados, así como su porcentaje de error promedio se muestran en la tabla 2.

$$throughput_{e2} = \begin{cases} 0.106540 + 0.000127 C + 0.000363 L + 0.000204 S + \\ 0.000636 P - 0.000023 CXL + 0.000026 CXS + 0.000028 CXP \\ + 0.000116 LXS - 0.000033 LXP - 0.000071 SXP \end{cases} \quad (1)$$

Tabla 2 Validación modelo de regresión escenario 2.

Capping	Labelling	Sealing	Packing	Capping X Labelling	Capping X Sealing	Capping X Packing	Labelling X Sealing	Labelling X Packing	Sealing X Packing	c	TH modelo	TH simulado	Diferencia	Error
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	0.10654				
0.00013	0.00036	0.0002	0.00064	-0.000023	0.000026	0.000028	0.000116	-0.000033	-0.000071		0.120001		0.120001	-
6	8	9	7	48	54	42	72	56	63		0.119931	0.1248	-0.004869	-3.90%
9	9	7	5	81	63	45	63	45	35		0.114211	0.1228	-0.008589	-6.99%
5	6	2	8	30	10	40	12	48	16		0.11968	0.1196	8E-05	0.07%
10	6	9	8	60	90	80	54	48	72		0.116529	0.1187	-0.002171	-1.83%
5	5	9	4	25	45	20	45	20	36		0.115291	0.1211	-0.005809	-4.80%
2	9	4	4	18	8	8	36	36	16		0.113618	0.1199	-0.006282	-5.24%
8	2	6	5	16	48	40	12	10	30		0.114341	0.1146	-0.000259	-0.23%
5	5	3	8	25	15	40	15	40	24		0.117101	0.1189	-0.001799	-1.51%
10	7	5	6	70	50	60	35	42	30		0.117745	0.1252	-0.007455	-5.95%
7	8	5	10	56	35	70	40	80	50		0.119161	0.1175	0.001661	1.41%
6	7	9	4	42	54	24	63	28	36		0.116093	0.1236	-0.007507	-6.07%
7	4	8	8	28	56	56	32	32	64		0.12068	0.1205	0.00018	0.15%
8	10	7	10	80	56	80	70	100	70		0.117477	0.1222	-0.004723	-3.86%
7	9	5	6	63	35	42	45	54	30		0.116583	0.1206	-0.004017	-3.33%
10	3	2	10	30	20	100	6	30	20		0.11456	0.1126	0.00196	1.74%
4	8	4	2	32	16	8	32	16	8		0.115861	0.1181	-0.002239	-1.90%
4	6	7	3	24	28	12	42	18	21		0.114317	0.1152	-0.000883	-0.77%
6	3	5	8	18	30	48	15	24	40		0.122681	0.1192	0.003481	2.92%
3	10	10	5	30	30	15	100	50	50		0.114541	0.1226	-0.008059	-6.57%
3	5	7	2	15	21	6	35	10	14		0.121081	0.1173	0.003781	3.22%
3	10	10	10	30	30	30	100	100	100		0.119549	0.1234	-0.003851	-3.12%
7	7	9	2	49	63	14	63	14	18		0.113285	0.1183	-0.005015	-4.24%
7	4	2	6	28	14	42	8	24	12		0.112732	0.1161	-0.003368	-2.90%
2	3	10	9	6	20	18	30	27	90		ERROR PROMEDIO		-2.34%	

De igual manera, se sustituyeron los datos obtenidos de la segunda simulación en la ecuación de regresión del escenario 3, ecuación 2. Sus resultados y porcentaje de error promedio se muestran en la tabla 3.

$$throughput_{e3} = \begin{cases} 0.106410 + 0.000357 C + 0.000049 L + 0.000372 S + \\ 0.000616 P + 0.000120 LXS - 0.000071 SXP \end{cases} \quad (2)$$

El porcentaje promedio de error es el segundo criterio de selección definido para el método de evaluación. El porcentaje deberá de ser igual o menor al 5% para que el modelo sea aceptado. El escenario 2 nos da un porcentaje de error del 2.34%, mientras que, el escenario 3 nos da un porcentaje del 2.45%. Ambos valores son menores al 5%, con una diferencia mínima entre ellos. Por lo tanto, habrá que comparar los valores de los criterios de selección establecidos para poder escoger el mejor modelo de regresión, tabla 4.

Comparando los resultados de la tabla 4, se concluye que el mejor modelo de regresión para evaluar el rendimiento del sistema de producción es el escenario 2. Debido a que sus valores de R^2 son $91.82 > 88.57\%$ y el error promedio son $2.35 <$

2.45%. Por lo tanto, el modelo de regresión que mejor se ajusta al sistema de producción de empaques, está dado por ecuación 3.

$$throughput = \begin{cases} 0.106540 + 0.000127 C + 0.000363 L + 0.000204 S + \\ 0.000636 P - 0.000023 CXL + 0.000026 CXS + 0.000028 CXP \\ + 0.000116 LXS - 0.000033 LXP - 0.000071 SXP \end{cases} \quad (3)$$

Siendo las interacciones de LabellingxSealing y SealingxPacking las variables significativas. El proceso de Packing también se considera significativa, debido a que es la única variable con valor más cercano a 0.05.

Tabla 3 Validación modelo de regresión escenario 3.

Capping	Sealing	Labelling	Packing	Labelling X Sealing	Sealing X Packing	C	TH modelo	TH simulado	Diferencia	Error
B1	B2	B3	B4	B5	B6					
0.00036	0.00037	-0.000049	0.00062	0.00012	-0.00007	0.10641				
6	8	9	7	72	56		0.120119		0.120119	-
9	9	7	5	63	45		0.120118	0.1248	-0.004682	-3.75%
5	6	2	8	12	48		0.113337	0.1228	-0.009463	-7.71%
10	6	9	8	54	48		0.119819	0.1196	0.000219	0.18%
5	5	9	4	45	20		0.116078	0.1187	-0.002622	-2.21%
2	9	4	4	36	36		0.11454	0.1211	-0.00656	-5.42%
8	2	6	5	12	10		0.113536	0.1199	-0.006364	-5.31%
5	5	3	8	15	40		0.113836	0.1146	-0.000764	-0.67%
10	7	5	6	35	42		0.117295	0.1189	-0.001605	-1.35%
7	8	5	10	40	80		0.117	0.1252	-0.0082	-6.55%
6	7	9	4	63	28		0.118779	0.1175	0.001279	1.09%
7	4	8	8	32	32		0.116533	0.1236	-0.007067	-5.72%
8	10	7	10	70	100		0.120203	0.1205	-0.000297	-0.25%
7	9	5	6	45	54		0.117328	0.1222	-0.004872	-3.99%
10	3	2	10	6	30		0.115778	0.1206	-0.004822	-4.00%
4	8	4	2	32	16		0.11457	0.1126	0.00197	1.75%
4	6	7	3	42	18		0.115355	0.1181	-0.002745	-2.32%
6	3	5	8	15	24		0.114471	0.1152	-0.000729	-0.63%
3	10	10	5	100	50		0.122291	0.1192	0.003091	2.59%
3	5	7	2	35	10		0.11373	0.1226	-0.00887	-7.23%
3	10	10	10	100	100		0.121871	0.1173	0.004571	3.90%
7	7	9	2	63	14		0.118884	0.1234	-0.004516	-3.66%
7	4	2	6	8	24		0.113275	0.1183	-0.005025	-4.25%
2	3	10	9	30	27		0.115004	0.1161	-0.001096	-0.94%
ERROR PROMEDIO									-2.45%	

Tabla 4 Resumen de criterios.

ANÁLISIS	CRITERIOS	
	R ²	ERROR PROMEDIO
Escenario 2	91.82%	2.34%
Escenario 3	88.57%	2.45%

Método de evaluación

El método de evaluación para líneas de producción en serie que se obtuvo como resultado de la presente investigación, se describe en los siguientes siete pasos. De igual manera, se muestra en la figura 5 mediante un diagrama de proceso:

- **Descripción del sistema de producción.** Primer paso donde se describe el sistema que se quiere estudiar. Se identifican estaciones de trabajo, tamaños de buffers, número de operadores, número de máquinas, tiempos de servicio, tiempos de llegada, entre otros, así como la (s) variable (s) de respuesta.

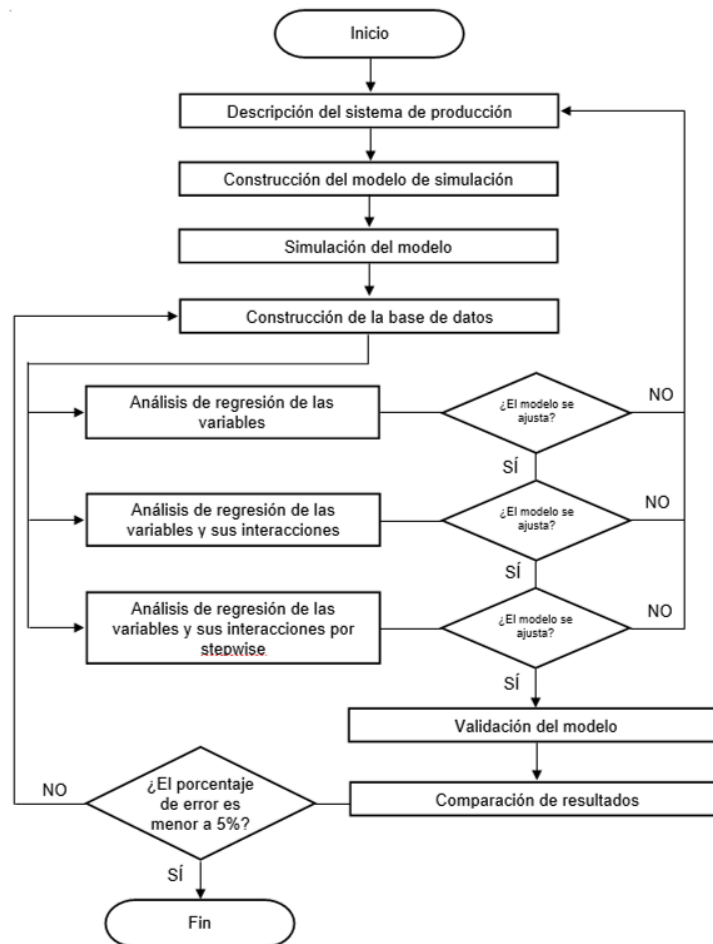


Figura 5 Diagrama de proceso del método de evaluación.

- **Construcción del modelo de simulación.** Representación del sistema de producción a estudiar, utilizando el software de simulación de preferencia del investigador.

- **Simulación del modelo.** Corrida del modelo de simulación en el software elegido.
- **Construcción de la base de datos.** Recopilación de los resultados obtenidos de la simulación o de datos históricos.
- **Análisis de regresión.** Análisis de la base de datos bajo tres escenarios: variables sin interacciones, variables con interacciones y utilizando el método stepwise. De cada uno de los ANOVAs resultantes se toma el valor de R^2 . Siendo este el primer criterio para seleccionar el modelo que mejor se ajuste, ya que se comparan los valores de R^2 obtenidos y se descarta el modelo con el valor más bajo.
- **Validación del modelo.** Segunda corrida de la simulación con un distinto conjunto de datos y se construye una segunda base de datos. Posteriormente, se sustituyen los valores de la segunda base de datos en las ecuaciones de regresión resultantes del paso anterior y se calcula el porcentaje de error promedio del modelo.
- **Comparación de resultados.** Revisión de los porcentajes de error promedio obtenidos del paso 6. Los porcentajes deberán ser menores al 5%, y en caso de que los valores de los dos modelos sean menores, se deberá de escoger el modelo con el porcentaje de error más bajo. Este será el segundo criterio de selección del modelo de regresión para evaluar el sistema de producción.

2. Discusión

Actualmente existe una amplia variedad de técnicas y herramientas que permiten evaluar el rendimiento de una línea de producción. Sin embargo, existen ciertas limitaciones al momento de aplicarlas. Debido a esto, se tiene la necesidad de seguir diseñando métodos que reduzcan sus limitaciones y sean sencillos de aplicar. Con la presente investigación tenemos como resultado un método de evaluación que consta de siete pasos, sencillo de aplicar y validado mediante la aplicación en una línea de producción de empaques. El método muestra buenos resultados, ya que durante su aplicación en la línea de producción arrojó como resultado un modelo de regresión para calcular su rendimiento, con valores de R^2 igual a 91.82% y error

promedio de 2.34%. Estos valores indican que el modelo se ajusta de buena manera al sistema. Igualmente, demostró que las variables significativas son las interacciones de LabellingxSealing y SealingxPacking y el proceso de Packing. A pesar de, que la investigación se limitó a estudiar únicamente líneas de producción en serie, se espera que el método de evaluación pueda tener los mismos resultados prometedores en líneas de producción más complejas. Sin embargo, el estudio de métodos aún no termina y no se descarta la posibilidad de realizar cambios al método dependiendo de las necesidades del sistema que se quiere analizar o del investigador. Asimismo, se puede concluir que, es posible diseñar un método de evaluación para líneas de producción en serie que aproveche las ventajas de los métodos analíticos, como teorías de colas y regresión, y de simulación. El método diseñado es sencillo de aplicar y da como resultado el modelo de regresión con el mayor porcentaje de ajuste para poder medir el rendimiento de una línea de producción. Por último, se considera que el desarrollo de esta investigación puede dar la pauta a estudiantes y/o empresas sobre como diseñar métodos de evaluación, o en el mejor de los casos la aplicación del método para sus propios fines. Además, nos dice que, para que el método sea efectivo es necesario tener conocimientos amplios sobre los conceptos a aplicar y cuente con un sistema de producción bien definido. Es decir, si es una línea en serie o en paralelo, confiable o no confiable, con buffer de capacidad finita o infinita, entre otras consideraciones.

3. Bibliografía y referencias

- [1] Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modeling and analysis with Arena*. Estados Unidos: Elsevier.
- [2] Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros*. (Duodécima ed.). México: McGraw Hill.
- [3] Curry, G. L., & Feldman, R. M. (2011). *Manufacturing systems modeling and analysis* (Segunda ed.). New York: Springer.
- [4] Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. Ciudad de México: McGraw Hill.

- [5] Demir, L., Tunali, S., & Eliiyi, D. T. (2014). The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(3), 371-392.
- [6] Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2008). *Fundamentals of queueing theory* (Cuarta ed.). Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [7] Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (1996). *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración* (Segunda ed.). México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- [8] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2011). *Applied statistics and probability for Engineers* (Quinta ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introducción al análisis de Regresión Lineal* (Tercera ed.). México: Compañía Editorial Continental.
- [10] Papadopoulos, C. T., O'Kelly, M. E., Vidalis, M. J., & Spinellis, D. (2009). *Analysis and Design of Discrete Part Production Lines*. Nueva York: Springer.
- [11] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myres, S. L., & Ye, K. (2007). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia* (Octava ed.). Ciudad de México: Pearson.