

APLICACIÓN DE METAMODELOS PARA OPTIMIZAR SISTEMAS DE MANUFACTURA CON ARREGLO EN SERIE, SIN FALLAS Y CON ASIGNACIÓN FINITA DE BUFFER

APPLICATION OF METAMODELS TO OPTIMIZE MANUFACTURING SYSTEMS WITH SERIAL ARRANGEMENT, WITHOUT FAILURES AND WITH FINITE BUFFER ALLOCATION

Sonia Laguna López

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
lagunalopezsonia@gmail.com

Salvador Hernández González

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

Vicente Figueroa Fernández

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

José Alfredo Jiménez García

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

Israel de la Cruz Madrigal

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

Recepción: 7/enero/2021

Aceptación: 7/marzo/2021

Resumen

El problema de asignación del buffer (BAP, por sus siglas en inglés) es clasificado como un problema de optimización combinatorio NP-Duro en el diseño de las líneas de producción. Este consiste en definir la asignación de lugares de almacenamiento (buffers) dentro de una línea de producción, con el fin de aumentar al máximo la eficiencia del proceso. Este artículo presenta la construcción de un metamodelo para el tiempo de ciclo que ayudará a asignar el lugar y tamaño de buffer en un sistema con arreglo en serie, minimizando así el tiempo de ciclo total, suponiendo que el proceso de producción es confiable, es decir, que no hay fallas. Se busca

que entre los resultados del metamodelo y la simulación no exista mucha discrepancia.

Palabras Clave: Buffer, DOE, metamodelo, teoría de colas, simulación.

Abstract

The buffer allocation problem (BAP) is classified as a NP-Duro combinatorial optimization problem in the design of production lines. This consists of defining the allocation of storage locations (buffers) within a production line, in order to maximize the efficiency of the process. This article presents the construction of a metamodel for cycle time that will help to allocate the buffer location and size in a serial array system, thus minimizing the total cycle time, assuming that the production process is reliable, i.e. , that there are no faults. It is intended that between the results of the metamodel and the simulation there is not much discrepancy.

Keywords: Buffer, DOE, metamodel, queuing theory, simulation.

1. Introducción

Un sistema de manufactura es un conjunto de máquinas, elementos de transporte, computadoras, buffers y otros artículos que se usan juntos para la fabricación de objetos [Shi & Gershwin, 2009]. Una línea de producción consiste en máquinas conectadas en serie y separadas por buffers. Se requiere que cada parte sea procesada en cada máquina durante una cantidad de tiempo fijo llamado tiempo de proceso, [Amiri Mohtashami, 2012]. Las líneas de producción se clasifican en homogénea (o balanceada) y en no homogénea (o no balanceada).

Una línea de producción en la que los tiempos de servicio o proceso son iguales en todas las máquinas se llama línea homogénea (o balanceada). Por otra parte, en una línea no homogénea (o no balanceada), las máquinas pueden tomar diferentes períodos de tiempo realizando operaciones en partes [Nahas, Ait Kadi, & Nourelfath, 2006]. Las desigualdades de tiempo de proceso en cada estación pueden provocar que exista un cuello de botella de la demanda o un desabasto. Para esto se asignan buffers que evitara que ocurran estos problemas y con el objetivo de aumentar el rendimiento de la tasa de producción promedio de la línea [Renna, 2019].

El problema de asignación del buffer (BAP, por sus siglas en inglés) es clasificado como un problema de optimización combinatorio NP-Duro en el diseño de las líneas de producción. Este consiste en definir la asignación de lugares de almacenamiento (buffers) dentro de una línea de producción, con el fin de aumentar al máximo la eficiencia del proceso [Vázquez et al., 2019].

La importancia de repartir buffers entre las maquinas de una linea de produccion es que las maquinas operen de forma independiente entre unas y otras. De forma que no exista un bloqueo por saturacion de trabajos en proceso o que ocurra un desabasto por falta de material.

Debido a su importancia y complejidad, el BAP se ha estudiado durante más de cincuenta años y hay numerosas publicaciones disponibles en la literatura [Demir, Tunali, & Eliiyi, 2012]. El objetivo principal en tales problemas es optimizar la tasa de producción, el rendimiento o el beneficio de la línea. Sin embargo, el flujo de material puede verse interrumpido por fallas en las máquinas [Shi & Gershwin, 2009]. Una característica de clasificación de las líneas de producción es confiable y no confiable. Las líneas confiables son en las que en ninguna estación de la línea ocurrirán fallas, es decir, el servidor único de cada estación siempre estará disponible para servir inmediatamente a un elemento que espera ser procesado [Papadopoulos & O'Kelly, 2009].

El BAP es difícil de resolver por dos razones. Por un lado, la evaluación exacta del rendimiento de las líneas de flujo solo es posible para sistemas pequeños, bajo supuestos específicos; por otro lado, la asignación de capacidades de buffer es un problema de optimización NP-hard [Smith & Cruz, 2005].

La asignación de buffers requiere una inversión de capital adicional y espacio en el piso, que puede ser costoso. El buffer también aumenta el inventario en proceso. Si los buffers son demasiado grandes, entonces el costo de capital incurrido puede ser mayor que el beneficio de la mayor productividad. Si los buffers son demasiado pequeños, las máquinas estarán subutilizadas o no se satisfará la demanda. Debido a la importancia de encontrar configuraciones de buffer buenas u óptimas, el BAP es un problema importante de optimización que enfrentan los diseñadores de sistemas de fabricación [Demir, Tunali, & Eliiyi, 2012]. El problema de asignación

del buffer es uno de todos los factores importantes que se deben considerar al diseñar líneas de producción [Weiss, Arne Schwarz, & Stolletz, 2019].

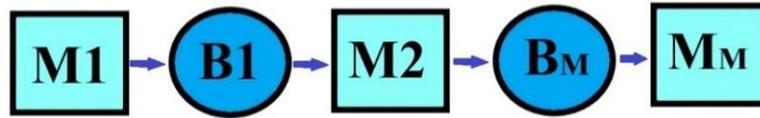
En un análisis de lectura dedicado a este problema, se ha encontrado que, en sistemas en serie confiables y con tiempos de servicio iguales, el valor de la producción sigue un comportamiento de tazón invertido de acuerdo al número de estaciones y la cantidad de espacios asignados [Papadopoulos & Vidalis, 2001]. Por otra parte, [Vázquez et al., 2019] y [Kose Simge & Kilincci, 2015], encontraron que la asignación óptima, asigna la mayor cantidad de espacios en las estaciones más cercanas al final de la línea de producción. En otro trabajo, pero con tiempos de servicio desiguales [Shaaban, McNamara, & Dmitriev, 2017] indican la conveniencia de asignar más lugares a las estaciones cercanas al final de la línea.

Los tiempos de procesamiento aleatorios y las estaciones poco confiables con fallas estocásticas y reparaciones sucesivas pueden provocar el bloqueo y la inanición de las estaciones de la línea. Una estación con inanición deja de producir a falta de material en su buffer antecesor, por otro lado, una estación bloqueada de deja de producir debido a que su buffer antecesor está lleno [Weiss, Arne Schwarz, & Stolletz, 2019]. Estos problemas pueden solucionarse con un buffer de capacidad mayor sin embargo aumentar el tamaño del buffer genera costo.

En un sistema de manufactura, la primera estación nunca se queda sin piezas ya que siempre por esa estación es la llegada de piezas, y la última estación nunca se bloquea ya que las piezas después de estar en la última estación salen del sistema. En líneas de producción en serie, existen M máquinas con $M-1$ áreas de almacén (buffers) (denotadas por B_1, B_2, \dots, B_M) entre dichas máquinas conectadas en serie, como se muestra en la figura 1. El material llega del exterior del sistema a M_1 , luego a B_2 , luego a M_2 , y así sucesivamente hasta llegar a M_M , para después salir del proceso [Vázquez et al., 2019].

La simulación es la imitación de la operación de procesos, sistemas o escenarios del mundo real a lo largo del tiempo, que se han utilizado en diferentes contextos, como probar nuevos procesos y tecnologías comerciales para la optimización del rendimiento [Au, Xu, Wang, & Fung, 2018]. Las ventajas de usar software de simulación incluyen: proporcionar una mayor comprensión, identificar los "puntos

problemáticos" o "cuellos de botella" y ser un enfoque menos arriesgado y costoso para probar las posibles soluciones [Hunt, Robson, Lemelin, & McIntyre, 2010].



Fuente: Elaboración propia

Figura 1 Línea de producción en serie con buffers.

En este trabajo se hace referencia a simulación de eventos discretos. La simulación de eventos discretos (DES) es un enfoque de simulación dirigido por eventos en el que se imita un proceso dinámico real a medida que avanza con el tiempo. Se ha reconocido como una técnica poderosa para el análisis cuantitativo de operaciones de construcción complejas. Sin embargo, se basa implícitamente en estructuras de colas que son demasiado rígidas para describir fácilmente sistemas con un comportamiento complejo común en la construcción, por ejemplo, cambios de roles de entidades [Golzarpoor et al., 2017].

Un metamodelo es un modelo matemático auxiliar de tipo analítico, es decir, es una función matemática, los metamodelos también conocidos como modelos sustitutos, se pueden usar en lugar de modelos de simulación computacionalmente costosos. Este se construye con la finalidad de apoyar la comprensión de un modelo principal más complejo [Friedman & Pressman , 1988], respecto a las relaciones de las variables de estudio y así, encontrar una relación funcional, estadísticamente significativa, entre un conjunto de variables de entrada y una variable de salida, que describa una medida de desempeño de interés para el investigador, ésta puede ser el tiempo de ciclo, el inventario en proceso o el porcentaje de demanda satisfecha, entre otras [Mejía Soto & Fernández Henao, 2011].

El uso explícito que tiene un metamodelo en análisis de simulación tiene muchos beneficios, algunos de los cuales son: simplificación del modelo; exploración, optimización e interpretación mejoradas del modelo; desenmarañar la dinámica de un modelo para comprender mejor el comportamiento del sistema; generalización a modelos de otros sistemas del mismo tipo; análisis de sensibilidad; etc [Weiser

Friedman, 1996]. El alcance del metamodelo va más allá de la comprensión de la relación funcional de las variables de estudio, ya que se puede utilizar como puente de comunicación entre las áreas de la simulación y la optimización, lo cual genera potencialmente futuras investigaciones [Mejía Soto & Fernández Henao, 2011].

La construcción de un metamodelo se lleva mediante la combinación de un diseño de experimentos, más su análisis de regresión y simulación. Además, el metamodelo implica el análisis de teoría de colas. La teoría de colas utiliza los modelos de colas para representar los tipos de sistemas de líneas de espera [Hillier, 2010]. Un sistema de líneas de espera es aquel en el que se tiene una sucesión de objetos (tales como personas, autos, trabajos, etc.) que llegan en busca de un servicio.

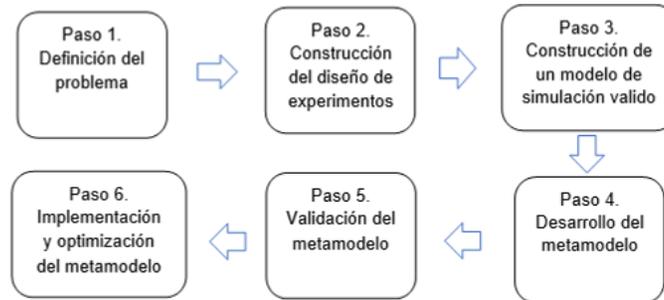
Por otro lado, el diseño de experimentos se refiere al proceso para planear un conjunto de pruebas experimentales, de tal manera que los datos generados puedan analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas y objetivas acerca del sistema o proceso [Montgomery, 2011]. Además, el diseño de experimentos es un conjunto de técnicas activas, en el sentido de que no esperan que el proceso mande las señales útiles, sino que este se “manipula” para inducirlo a proporcionar esa información que se requiere para mejorarlo [Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2004].

2. Método

En esta sección se presenta la metodología para la construcción de un metamodelo. Lo pasos para el desarrollo de un metamodelo se muestran en la figura 2, en un diagrama de flujo y tomados de referencia de [Weiser Friedman, 1996]:

- **Paso 1.** Definir el problema: Esto incluye definir el alcance del estudio, establecer los límites del sistema, definir las variables, definir los objetivos del metamodelo, identificar las variables de entrada y salida [Weiser Friedman, 1996].
- **Paso 2.** Desarrollar el diseño de experimentos: El diseño experimental determinará y, por supuesto, seguirá la forma de la función del metamodelo que finalmente se aplicará a los datos generados por la simulación. El diseño

de experimentos se construye mediante la información de la definición del problema.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Diagrama de flujo para construcción de metamodelo.

- **Paso 3.** Construcción de un modelo de simulación: Construir y validar un modelo de simulación para generar los valores de entrada. El desarrollo de este es un programa de computadora en un lenguaje informático en particular, siendo programado, verificado y validado. En este modelo de simulación se simulan las corridas del diseño experimental.
- **Paso 4.** Desarrollo del metamodelo: Utilizar los datos generados por la simulación para encontrar el metamodelo que mejor se adapte. Se verifica el metamodelo aplicando una prueba estadística de ajuste. La mayoría de los metamodelos se basan en técnicas de análisis de regresión para estimar los parámetros y para probar el metamodelo para ajustarlo a los datos.
- **Paso 5.** Validación del metamodelo: Finalmente, se valida el metamodelo de la misma manera que se validó el modelo de simulación, comparándolo con datos reales del sistema en estudio o un sistema similar.
- **Paso 6.** Este paso es adicional a la construcción del metamodelo, pues se busca tener un modelo de optimización dado el metamodelo y sus restricciones.

Definición del problema

El problema por analizar considera un sistema de cuatro máquinas en serie con su respectivo buffer, es decir, tres buffers, ya que después de la cuarta maquina no

es necesario asignar un buffer porque la entidad sale directamente como producto terminado. Los tiempos entre arribos siguen una distribución exponencial de 0.7 horas entre cada pieza y un tiempo de servicio con distribución exponencial de 0.5 horas por pieza en todas las maquinas. Al tratarse de una distribución exponencial tenemos que el coeficiente de variabilidad cuadrático a la entrada y tiempo de servicio son igual a uno ($Ca^2 = Cs^2 = 1$). Cabe mencionar que la primera estación es markoviana M/M/1 y las demás estaciones son markovianas pero con capacidad limitada M/M/1/K. El sistema en serie que se estudia considera una línea confiable, los niveles alto y bajo de los buffers son de capacidad de 2 y 10 respectivamente. Para fines de la optimización se tienen 25 buffers totales disponibles en la línea.

Construcción del modelo de simulación

El modelo de simulación (Figura 3) fue programado en el software Arena con las especificaciones del sistema a analizar, se muestra un sistema de manufactura con arreglo en serie, sin salidas lateras y con su buffer frente a la estación 2, 3 y 4. Con un tiempo entre llegadas y de servicio de 0.7 y 0.5 horas por pieza, respectivamente. Las pruebas se corren por 1000 horas con 1 hora de calentamiento.

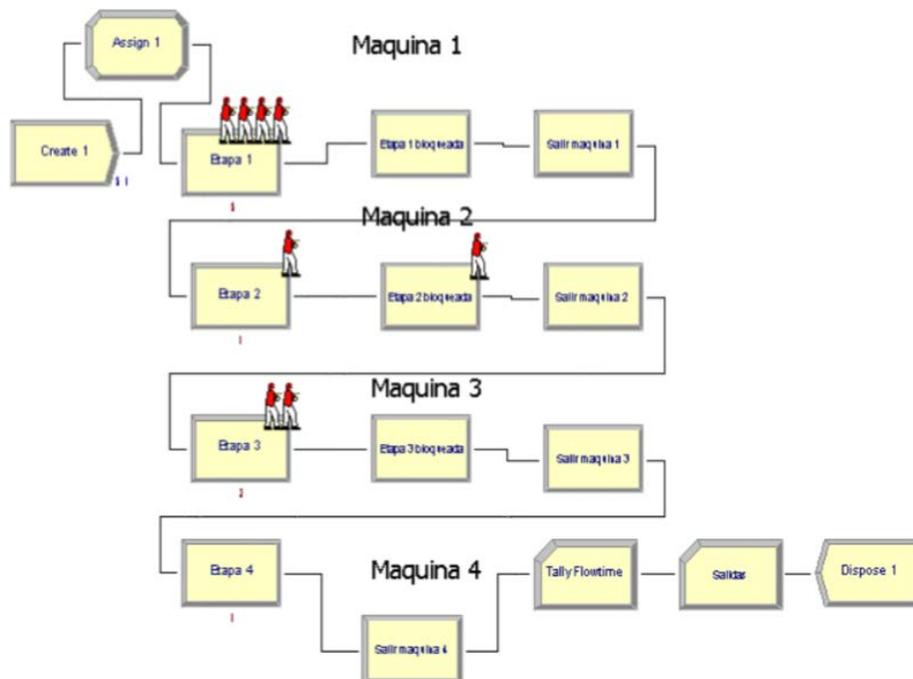


Figura 3 Modelo de simulación en Arena.

Diseño de experimentos

En un diseño experimental factorial completo 2^k se analizan K factores con 2 niveles cada uno y sus respectivas combinaciones. Se emplea principalmente para determinar las variables significativas, así como las interacciones entre ellas. Los niveles de los tres factores (B1, B2, B3) se presentan en la tabla 1. Mediante la experimentación de la combinación entre los niveles alto y bajo se obtendrá la variable de respuesta del tiempo de ciclo (Y).

Tabla 1 Niveles de los factores.

Factores	Bajo (-1)	Alto (+1)
B1 (Buffer 1)	2	10
B2 (Buffer 2)	2	10
B3 (Buffer 3)	2	10

Matriz de diseño

El diseño experimental se hizo primero mediante un diseño 2^3 con 3 réplicas, además se agregaron 5 puntos centrales para detectar la curvatura en la superficie de respuesta. Pero en el análisis de regresión los resultados muestran que hay una curvatura significativa. Por lo que se aumentó el diseño experimental para aumentar su capacidad de predicción, tomando en cuenta términos cuadráticos, corridas adicionales para estimar el Lack of fit para mejorar el análisis de la falta de ajuste, 3 réplicas y 4 puntos centrales adicionales, dando así un total de 46 corridas que se muestran en la matriz de diseño en la tabla 2 donde también se muestran los resultados obtenidos en la simulación para el tiempo de ciclo. El diseño se realizó con el paquete de software estadístico Desing-Expert.

Prueba estadística de ajuste por análisis de regresión

En este trabajo se usó un análisis de regresión donde el ANOVA se muestra en la figura 4. El coeficiente de correlación (R) para el análisis de regresión del tiempo de ciclo es de 0.83, lo que nos dice que este modelo de regresión nos explica el 83% el comportamiento del tiempo de ciclo, es decir, las tres variables explican el 83% de la variabilidad presente en este proceso, el resto se debe a variables o factores que no están considerados en el modelo de regresión.

Tabla 2 Matriz del diseño experimental.

Run	Factor B1: Buffer 1	Factor B2: Buffer 2	Factor B3: Buffer 3	Respuesta Y: Tiempo de ciclo
1	2	2	2	33.7736
2	2	2	2	19.2626
3	2	2	2	28.7021
4	10	2	2	14.3467
5	10	2	2	24.4364
6	10	2	2	9.171
7	2	10	2	11.2697
8	2	10	2	10.2673
9	2	10	2	16.6093
10	10	10	2	8.5184
11	10	10	2	7.0276
12	10	10	2	7.5224
13	2	2	10	13.4592
14	2	2	10	14.8513
15	2	2	10	14.5769
16	10	2	10	10.1366
17	10	2	10	15.8021
18	10	2	10	11.4628
19	2	10	10	7.3689
20	2	10	10	7.6541
21	2	10	10	10.7797
22	10	10	10	7.805
23	10	10	10	6.5434
24	10	10	10	7.9404
25	6	6	6	6.7679
26	6	6	6	7.9384
27	6	6	6	7.5249
28	6	6	6	6.8196
29	6	6	6	8.9563
30	6	2	2	25.5582
31	2	6	2	8.6136
32	2	2	6	9.0331
33	6	10	2	8.4956
34	10	2	6	5.975
35	6	2	10	7.7278
36	10	6	2	7.9082
37	2	10	6	7.7271
38	10	10	6	6.0511
39	2	6	10	7.6112
40	6	6	6	6.7679
41	6	6	6	7.9384
42	6	6	6	7.5249
43	6	6	6	6.8196
44	6	2	2	17.0101
45	2	6	2	11.4885
46	2	2	6	11.4351

El modelo es significativo y los términos significativos son B_1 , B_2 , B_3 , B_1B_3 , B_2B_3 , B_2^2 y B_3^2 . El estadístico R^2 ajustada es menor al estadístico R^2 por lo que sabemos

que no es necesario o conveniente agregar más términos. Como resultado del metamodelo tenemos la ecuación 1.

$$Y = 37.621 - 0.955B1 - 3.553B2 - 3.760B3 + 0.079B1B3 + 0.111B2B3 + 0.164B2^2 + 0.164B3^2 \quad (1)$$

Donde:

- B1: Buffer 1
- B2: Buffer 2
- B3: Buffer 3

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Block	77.66	1	77.66			
Model	1182.56	7	168.94	12.70	< 0.0001	significant
A-B1	119.13	1	119.13	8.95	0.0049	
B-B2	425.80	1	425.80	32.00	< 0.0001	
C-B3	200.57	1	200.57	15.07	0.0004	
AC	44.39	1	44.39	3.34	0.0759	
BC	89.03	1	89.03	6.69	0.0138	
B ²	44.54	1	44.54	3.35	0.0754	
C ²	43.89	1	43.89	3.30	0.0774	
Residual	492.29	37	13.31			
Lack of Fit	164.11	11	14.92	1.18	0.3458	not significant
Pure Error	328.18	26	12.62			
Cor Total	1752.51	45				
Std. Dev.		3.65		R-Squared	0.7061	
Mean		11.33		Adj R-Squared	0.6505	
C.V. %		32.21		Pred R-Squared	0.5459	
PRESS		760.55		Adeq Precision	13.617	

Figura 4 Análisis de regresión para el tiempo de ciclo.

Validación del metamodelo

Finalmente, validamos el metamodelo de la misma manera que el modelo de simulación fue validado. El porcentaje de error por la diferencia de resultados entre el metamodelo y análisis analítico son mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Porcentaje de error.

Factor B1: Buffer 1	Factor B2: Buffer 2	Factor B3: Buffer 3	TC total Metamodelo	TC total Analítico	% Error
10	2	10	10.536	10.137	3.94
10	10	10	6.736	6.543	2.95
6	6	6	6.666	6.767	1.49

Modelo de optimización

Para optimizar construimos el modelo de optimización que a continuación se muestra. Donde tenemos la ecuación 2 como función objetivo a minimizar el tiempo de ciclo del sistema en función de los buffers, sujeta a las restricciones en las ecuaciones 3 a 7 que describen que, la suma de los espacios en cada buffer debe ser igual a la cantidad de espacios totales en la línea (N). Además, existe un límite inferior de 2 espacios en cada buffer, ya que como mínimo debe haber 2 piezas en un buffer y un límite superior de 10 espacios en cada estación, siendo estos enteros.

Minimizar:

$$Y = 37.621 - 0.955B1 - 3.553B2 - 3.760B3 + 0.079B1B3 + 0.111B2B3 + 0.164B2^2 + 0.164B3^2 \quad (2)$$

Sujeto a:

$$N = B1 + B2 + B3 \quad (3)$$

$$2 \leq B1 \leq 10 \quad (4)$$

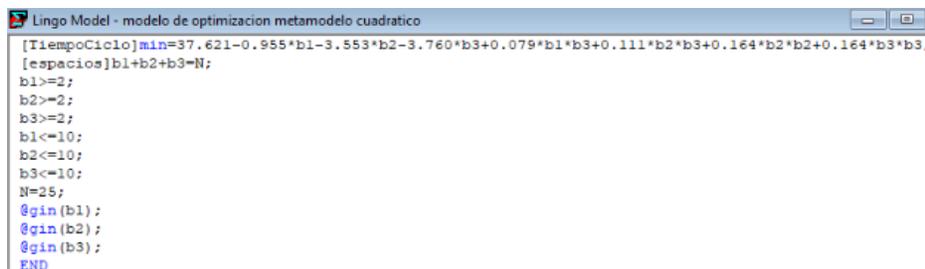
$$2 \leq B2 \leq 10 \quad (5)$$

$$2 \leq B3 \leq 10 \quad (6)$$

$$B1, B2, B3 \geq 0 \text{ y enteros} \quad (7)$$

3. Resultados

El modelo de optimización fue resuelto en Lingo como se muestra en la figura 5.



```

Lingo Model - modelo de optimizacion metamodelo cuadratico
[[TiempoCiclo]min=37.621-0.955*b1-3.553*b2-3.760*b3+0.079*b1*b3+0.111*b2*b3+0.164*b2*b2+0.164*b3*b3;
[espacios]b1+b2+b3=N;
b1>=2;
b2>=2;
b3>=2;
b1<=10;
b2<=10;
b3<=10;
N=25;
@gin(b1);
@gin(b2);
@gin(b3);
END
    
```

Figura 5 Modelo de optimización en Lingo.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos con el modelo de optimización, donde se interpreta que debemos asignar 10 espacios en el buffer 1, 9 espacios en el buffer 2 y 6 espacios en el buffer 3, con los cuales se obtiene un tiempo de ciclo total del sistema de 3.456 horas. En la figura 7, se muestra un esquema que

describe como quedarían repartidos los 25 buffers. Frente a la estación dos se tienen 10 buffers, frente a la estación tres hay 9 espacios y frente a la estación 4 hay 6 lugares.

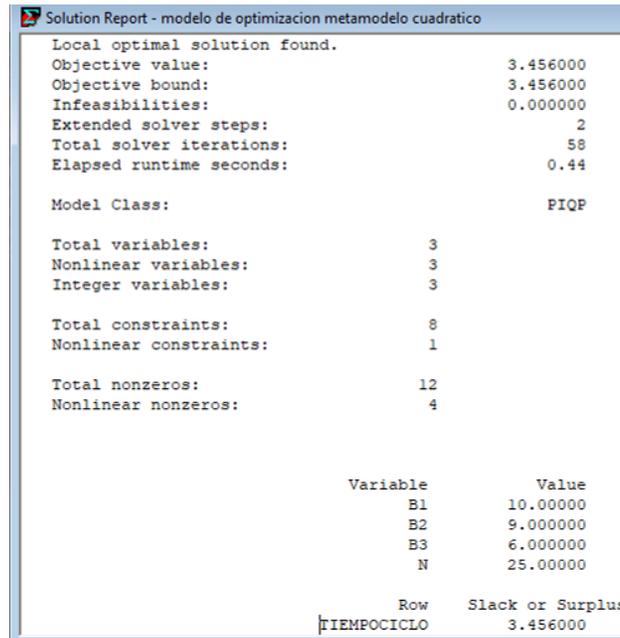
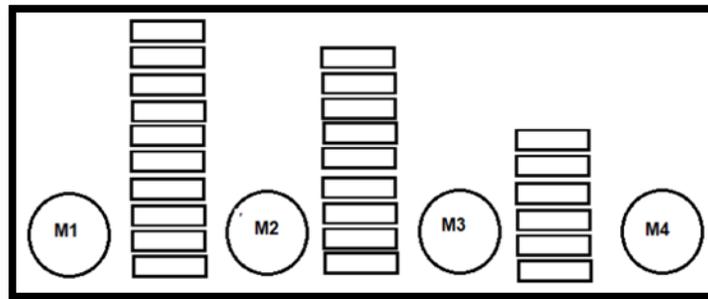


Figura 6 Resultados obtenidos en la optimización con Lingo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Esquema de repartición de los espacios para los buffers.

4. Discusión

Los resultados obtenidos de la optimización del sistema con un total de 25 lugares disponibles en la línea muestran que deben ir más espacios en el primer buffer ya que hay mayor probabilidad de que la maquina uno se bloquee. Además, en la figura 7 se puede visualizar una configuración de rampa descendente en el acomodo de

la cantidad de espacios en la línea que a diferencia en otros trabajos señalan una clara tendencia por asignar una mayor cantidad de buffers en las maquinas que se encuentran hacia el final de la línea de producción [Vázquez et al., 2019], [Kose Simge & Kilincci, 2015] y [Shaaban, McNamara, & Dmitriev, 2017].

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso la construcción de un metamodelo para asignar el tamaño de los buffers en un sistema en serie con 4 máquinas y 3 buffers con capacidad en la línea limitada a 25 lugares y con un nivel en los buffers bajo y alto de 2 y 10 respectivamente. El proceso es de tipo markoviano y tratándose de una línea confiable con tiempos de servicio homogéneos. Donde al hacer la validación del metamodelo resulto lo que se esperaba, que no hubiera mucha discrepancia entre los resultados obtenidos por el metamodelo y de forma analítica. El mayor porcentaje de error que tuvimos fue 3.94% lo que indica que el metamodelo es buen predictor, pero aún se puede mejorar más la capacidad de predicción. Este metamodelo se puede usar para optimizar sistemas de manufactura como el que se analizó en este trabajo. Por otro lado, se esperaba que el metamodelo seria de grado lineal, pero al hacer la prueba de ajuste se determinó que era necesario agregar términos cuadráticos para que el metamodelo se ajustara a los datos del sistema analizado.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amiri, M., & Mohtashami, A. (2012). Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. *Int J Adv Manuf Technol*, 62, 371-383. doi:10.1007/s00170-011-3802-8.
- [2] Demir, L., Tunali, S., & Eliiyi, D. T. (2012). The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey. *J Intell Manuf*, 25(3), 371-392. doi:10.1007/s10845-012-0687-9.
- [3] Friedman, L. W., & Pressman, I. (1988). The Metamodel in Simulation Analysis: Can It Be Trusted? *Journal of the Operational Research Society*, 39(10), 939-948. doi:10.1057/jors.1988.160.

- [4] Au, C. H., Xu, Z., Wang, J. L., & Fung, W. S. (2018). Establishing a three-step model of designing the polling stations for shorter queue and smaller waiting time: a case study using computer simulation. *Journal of Information Technology Case and Application Research*, 19(4), 225-245. doi:10.1080/15228053.2017.1433494.
- [5] Golzarpoor et al., H. (2017). A non-queue-based paradigm in Discrete-Event-Simulation modelling for construction operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 77, 49-67. doi:10.1016/j.simpat.2017.05.004.
- [6] Gutierrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2004). Analisis y diseño de experimentos. México: McGraw Hill.
- [7] Hillier, F. S. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. México: McGraw Hill.
- [8] Hunt, L. M., Robson, M., Lemelin, R. H., & McIntyre, N. (2010). Exploring the Acceptability of SpatiSimulation Models of Outdoor Recreation for Use by Participants in Public Participation Processes. *Leisure Sciences*, 32(3), 222-239. doi:10.1080/01490401003712515.
- [9] Kose Simge, Y., & Kilincci, O. (2015). Hybrid approach for buffer allocation in open serial production lines. *Computers & Operations Research*, 60, 67-78. doi:10.1016/j.cor.2015.01.009.
- [10] Mejía Soto, J., & Fernández Henao, S. (2011). Los metamodelos de regresión en simulación con aplicación en sistemas de manufactura. *Scientia Et Technica*, 1(47), 285-290. doi:10.22517/23447214.1165.
- [11] Nahas, N., Ait Kadi, D., & Nourelfath, M. (2006). A new approach for buffer allocation in unreliable production lines. *Int. J. Production Economics*, 103, 873-881. doi:10.1016/j.ijpe.2006.02.011.
- [12] Papadopoulos, C. T., & O'Kelly, M. E. (2009). Analysis and design of discrete art production lines. *Springer Optimization and Its Applications*, 31. doi:10.1007/978-0-387-89494-2.
- [13] Papadopoulos, H., & Vidalis, M. (2001). Minimizing WIP inventory in reliable production lines. *International Journal of Production Economics*, 70(2), 185-197. doi:10.1016/S0925-5273(00)00056-6.

- [14] Montgomery, D. C. (2011). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda edición ed.). New Jersey: Limusa Wiley.
- [15] Renna, P. (2019). Adaptive policy of buffer allocation and preventive maintenance actions in unreliable production lines. *J Ind Eng Int*, 15, 411-421. doi:10.1007/s40092-018-0301-7.
- [16] Shaaban, S., McNamara, T., & Dmitriev, V. (2017). Asymmetrical buffer allocation in unpaced merging assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 211-220. doi:10.1016/j.cie.2017.05.008.
- [17] Shi, C., & Gershwin, S. B. (2009). An efficient buffer design algorithm for production line profit maximization. *International Journal Production Economics*, 122, 725–740. doi:10.1016/j.ijpe.2009.06.040.
- [18] Smith, J. M., & Cruz, F. R. (2005). The buffer allocation problem for general finite buffer queueing networks. *IIE Transactions*, 4(37), 343-365. doi:10.1080/07408170590916986.
- [19] Vázquez et al., H. J. (2019). Enfoque híbrido metaheurístico AG-RS para el problema de asignación del buffer que minimiza el inventario en proceso en líneas de producción abiertas en serie. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 16, 447-458. doi:https://doi.org/10.4995/riai.2019.10883.
- [20] Weiser Friedman, L. (1996). *The simulation metamodel*. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/978-1-4613-1299-4.
- [21] Weiss, S., Arne Schwarz, J., & Stolletz, R. (2019). The buffer allocation problem in production lines: Formulations, solution methods, and instances. *IIE Transactions*, 5(51), 456-485. doi:10.1080/24725854.2018.1442031.