

Beneficio obtenido en una línea de transferencia estocástica con ocurrencia de fallas por la incorporación de *buffers*

Laila Cure Vellojín*, Adriana Salcedo Ortiz** y
Carlos Paternina Arboleda***

Resumen

El desempeño de una línea de producción siempre será un foco importante de análisis. En este artículo se realiza un análisis progresivo, en su grado de complejidad, un análisis experimental con base en la simulación de una variedad de escenarios compuestos por la combinación de distintas variables en niveles determinados, con el fin de observar la interacción entre éstas e incluyendo el término de estocasticidad en tiempos de procesamiento para la definición de dichos escenarios, con el objetivo de indagar y observar la relación la variable del coeficiente de variación de los tiempos de procesamiento en la obtenida previamente.

Palabras claves: Línea de producción, *buffers*, *wip*, eficiencia, fallas en sistemas de producción, estocasticidad.

Abstract

The performance of a production line will always be an important subject of analysis. In this document, a progressive analysis is experimentally made, based on the simulation of several scenarios That consist of a combination of some variables in different levels. In order to appreciate their interaction, stochasticity in processing times are taken into account for the definition of each scenario, with the objective of observing and inquiring into the relation of the variation coefficient of processing times with the one previously obtained in prior research.

Key words: Production line, buffers, wip, stochasticity.

Fecha de recepción: 14 de noviembre de 2004
Fecha de aceptación: 2 de noviembre de 2005

* Ingeniería Industrial, M.Sc. Grupo Product. y Compet. lailac@cartagena.biofilm.com.co.

** Ingeniería Industrial, M.Sc. Grupo Product. y Compet. adriana.salcedo@cerrejoncoal.com

*** Ingeniería Industrial, Ph.D. Grupo Product. y Compet. cpaterni@uninorte.edu.co.

Dirección: Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Norte, Km 5 vía a Puerto Colombia, Barranquilla (Colombia)

1. INTRODUCCIÓN

El desempeño de una línea de producción siempre será un foco importante de análisis, pero nunca se podrá decir que todo lo concerniente a éstas se encuentra perfectamente esclarecido, especialmente cuando el problema inicialmente puede adoptar variables que pueden influir en su respuesta.

Conway, Maxwell, Malain y Thomas en 1987 [3] trataron el tema de las líneas de producción en serie, incluyendo en el estudio, como factor principal, el trabajo en proceso (WIP). En este artículo se realiza un análisis progresivo, en su grado de complejidad, en el cual se analizan varios escenarios.

El estudio comienza con estaciones idénticas, sin lugar a buffers, en las que compara la eficiencia del sistema teniendo en cuenta la "longitud" de la línea y discriminando según su coeficiente de variación de tiempo de procesamiento. Luego, se agrega capacidad de buffers a estas líneas de manera uniforme para, subsiguientemente, determinar cuál y cómo es la localización más adecuada de estas capacidades dependiendo de la ubicación de la estación en el proceso. Una segunda parte del estudio dirige la atención a estaciones no idénticas, es decir, sus tiempos de procesamiento promedio son desiguales, al igual que sus variabilidades. Por último, hace referencia a estaciones de trabajo sujetas a falla; en esta fase realiza un análisis de la interacción entre todos los factores antes mencionados, trayendo, además, a colación la variable de tiempos de falla y su correspondiente variabilidad, pero asumiendo tiempos de procesamiento constante.

Blumenfeld *et al.* [2] desarrollaron un modelo para estimación del *throughput* de un sistema serial con tiempos variables y capacidad limitada en los buffers. Dallery y Frein [4] proponen una metodología para analizar bloqueos en líneas de producción en serie. Simon y Hoop [6] [7] estudian, mediante simulación, las medidas de desempeño en líneas de transferencia. Paternina-Arboleda y Das estudian el comportamiento de líneas de producción seriales, mediante simulación, bajo diferentes políticas de control de producción. Este estudio proporciona extensiones a los modelos propuestos en [2] [6] [7].

En este artículo se realiza un análisis experimental con base en simulación, de una variedad de escenarios compuestos por la combinación de distintas variables en niveles determinados, con el fin de observar la interacción entre éstas e incluyendo el término de estocasticidad en tiempos de procesamiento para la definición de dichos escenarios. La idea principal consiste en tomar como punto de partida y fuente de validación la información proporcionada

por Conway *et al.* [3] para sacar conclusiones válidas acerca del comportamiento de sistemas de este tipo.

Objetivos

- Observar el beneficio en la eficiencia al aumentar el tamaño de los buffers (idénticos) en una línea de 5 estaciones idénticamente distribuidas¹.
- Obtener una medida del efecto de este tamaño de buffer.
- Indagar y observar la relación variable del coeficiente de variación de los tiempos de procesamiento en la obtenida por Conway [3] .

2. NOTACIÓN

Antes de hacer referencia al experimento realizado en este estudio se procede a especificar las variables que se van a utilizar. Se comenzará por especificar las variables de entrada, las cuales son base en la definición de los escenarios:

P	tiempo de procesamiento promedio (minutos)
cv_p	coeficiente de variación del tiempo de procesamiento
$a\bar{d}$	tiempo entre fallas (minutos)
D	tiempo de reparación promedio (minutos)
cv_b	Coeficiente de variación del tiempo entre fallas
Z	tamaño de los buffers a lo largo de la línea de producción

Como variable de respuesta se buscará obtener los valores de la eficiencia, E , resultantes en el sistema productivo seleccionado para el análisis. Además, se obtendrá el trabajo en proceso promedio de los buffers entre cada par de estaciones consideradas.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir los objetivos de este análisis se realizó una investigación de tipo experimental, construyendo un modelo de simulación de un sistema productivo en línea de cinco estaciones idénticas, haciendo uso de la herramienta para simulación Arena 5.0.

El sistema de producción simulado trabajó bajo el concepto “push”, considerando disponibilidad de materia prima y demanda ilimitada. Por medio

¹ Balanceadas.

de la simulación y de acuerdo a distintos escenarios evaluaremos las variables de respuesta antes especificadas.

3.1. Condiciones experimentales

Como ya se dijo, se simuló un sistema de producción en línea de cinco estaciones idénticas. Entre cada par de éstas fue colocado un *buffer* o amortiguador con objeto de apreciar el beneficio en la eficiencia obtenido por la incorporación y aumento del tamaño de estos buffers.

Para el número de réplicas se utilizó un nivel de confianza de $\alpha = 5\%$ y una potencia estadística del 99% , y se obtuvo como resultado un aproximado de 54 réplicas, que para efectos prácticos se fijó en 60. Otros parámetros que se tuvo en cuenta para este cálculo fueron la varianza obtenida de una prueba piloto realizada a los datos, y la diferencia estimada que se podría considerar significativa para el análisis; esta última fue igual a 5% .

La variable de respuesta del modelo de simulación son las unidades procesadas que salen del sistema. Estos datos se transforman en eficiencia, dividiéndolos entre el valor ideal de *throughput* en el periodo simulado. Para obtener el valor adecuado de simulación, se realizó una réplica con 15.000 minutos, y por medio de una gráfica de eficiencia se pudo ver en qué tiempo esta variable se estabilizaba; este valor resultó ser 8.500 minutos para el coeficiente de procesamiento igual a 0.3, y de 6.000 minutos para el igual a 0.3, con el valor de D , mayor de los considerados.

Cada una de las réplicas fue simulaba en el sistema de producción durante 310.000 minutos, 10.000 de los cuales corresponden al tiempo de calentamiento, por lo cual los datos obtenidos durante este periodo fueron excluidos del análisis. Las estaciones representadas por el modelo, idénticamente distribuidas, siempre con un tiempo promedio de 10 minutos por unidad, por lo cual se considera el *throughput* "ideal" como 900 unidades en el periodo efectivo de 9.000 minutos, con base en el cual se realizará el cálculo de la eficiencia del sistema en cuestión.

3.2. Escenarios considerados

Primero que todo, las variables que se colocarán a variar en el modelo de simulación serán: D , C_{vd} , U , C_{vp} y Z . En la tabla 1 se muestran los niveles que se consideraron para tales variables.

Tabla 1
Niveles en los cuales las variables de interés fueron simuladas

Variable	Niveles
D	40 – 80
Cvp	0,3 – 0,5
Cvd	0 -1 (Exponencial)
U	600 (Exponencial)
Z	4 – 8 - 12

Se debe tener en cuenta que los buffers deben ser diseñados para cubrir con inventario los tiempos de reparación promedio; esto es, a pesar de que una estación se encuentre en estado de falla y no pueda procesar partes para pasar a la siguiente estación, esta última debe tener material para procesar sin perder tiempo, y consiga para que la línea no pierda capacidad. En el experimento actual se utilizará como mínimo tamaño de buffer entre estaciones, el dado por la relación D/P y hasta dos veces este valor². También se tuvo en cuenta el escenario cuando el tamaño del buffer es cero y cuando la capacidad de éstos es infinita; en todos los casos, éste fue uniforme entre las estaciones. En investigaciones previas se ha demostrado que buffers pequeños (con tamaño menor a 10 unidades) son suficientes y que además, cuando éste depende de presupuestos u otros factores que lo limitan, la eficiencia mejora cuando la mayor parte son localizados entre las estaciones centrales.

El tiempo de procesamiento promedio se mantuvo constante (10 min.), y el correspondiente coeficiente de variación fue considerado en dos niveles: 0.3 y 0.5, como fue mostrado en la tabla anterior. El tiempo entre fallas fue fijado a lo largo del experimento, con una distribución exponencial; este valor (600 unidades de tiempo) fue escogido por experiencia. El tiempo de reparación, D , fue simulado con distribución exponencial y constante, con el objetivo hacerlo más parecido a la realidad; las medias fueron variadas entre los niveles 40 y 80, con coeficientes de variación iguales a 1 y 0, para cada uno de ellos.

Como se puede observar, fueron 40 escenarios considerados en la investigación experimental.

² Para el caso actual, y con el fin de darle equidad al análisis, se consideró el promedio entre los b/P mínimos para cada uno de los escenarios evaluados.

3.3. Validación

En primera instancia se comparará las eficiencia obtenida en el escenario sin buffer y sin fallas con el obtenido por Conway; esta comparación es presentada en la tabla 2.

Tabla 2
 Eficiencia obtenida “vs” la obtenida por Conway

Cvp	Obtenida	Conway
0,3	76.60%	77%
0,5	67,10%	68%

Una prueba estadística que nos confirma lo anteriormente obtenido es la prueba Chi cuadrado de las medias, esto con la intención de validar estadísticamente el modelo utilizado. La hipótesis de la prueba consistió en comparar los datos mostrados en la tabla 2, es decir, ver si existe evidencia para afirmar que son iguales. Los resultados se muestran en la tabla 3, y como se puede observar, fue aceptada la hipótesis, es decir, no hay evidencia suficiente para asegurar que las medias son diferentes. Esta prueba fue elaborada para los tres coeficientes de variación del tiempo de procesamiento tenidos en cuenta en el modelo. Con este resultado validamos el modelo con respecto al obtenido por Conway.

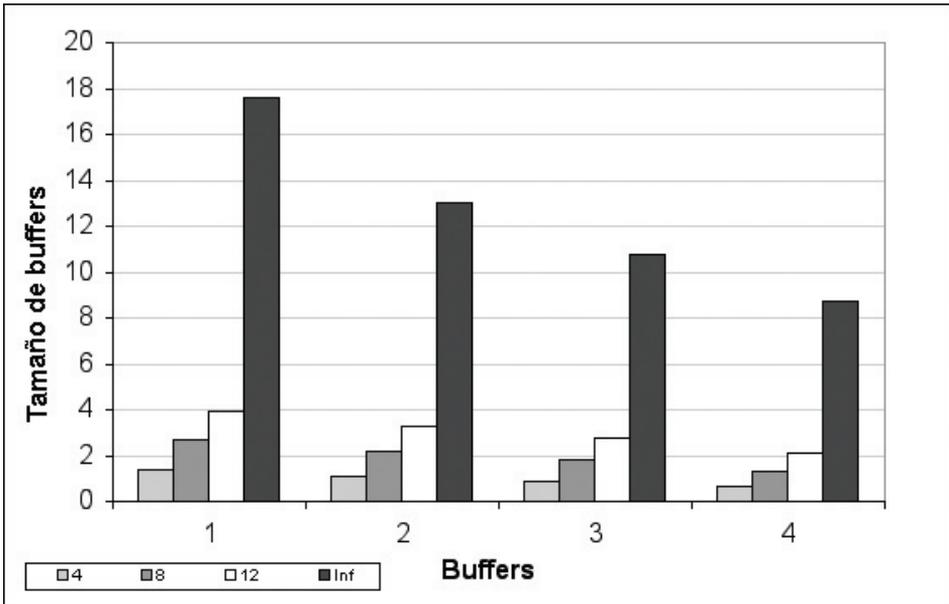
Tabla 3
 Resultado de la prueba Chi-cuadrado para los Cvp considerados en el modelo

	0,1	0,5
C	1,68	2,83
Dof	57	57
$\chi_{0,05}^2$	75,4	75,4
Resultado	Acepta	Acepta

Otro resultado comparable con lo obtenido por Conway, y lógico en una línea de producción, es la utilización de los buffers en el inicio, centro y final del la línea. En el principio de la línea es lógico asegurar que el buffer tendrá una utilización promedio mayor que en los demás *buffers*, en los buffers centrales menor que el inicial pero mayor que el buffers final; esto debido a que los centrales reciben la influencia de las fallas de las estaciones anteriores y afectan las siguientes; con el último *buffers*, al tener éste tan solo atraso por su

incapacidad de trabajar cuando falla y no depender de una estación próxima, es el menor promedio.

Lo expresado se muestra en la gráfica 1; para esta gráfica se tomó D igual a 40, constante. Con base en la gráfica se puede asegurar que en una línea con fallas entre mayor sea el tamaño del buffers entre estaciones, se obtendrá mayor eficiencia. Aunque en la gráfica no se muestran los valores, mientras más aumenta la media del tiempo de reparación, se puede asegurar que se necesitará mayor tamaño entre estaciones.



Gráfica 1. Utilización promedio de los buffers. El valor obtenido por los buffers cuando su tamaño es infinito fue dividido por 4, para conveniencia en la gráfica

Al validar el modelo con fallas y buffers, con respecto al obtenido por Conway, se generaron dos corridas en las condiciones semejantes a los escenarios que se tuvo en cuenta; esta corrida se realizó con D igual a 15.63, constante, Cvp de 0.5, P igual a 10, tiempo entre falla (U) 62.5, y se obtuvo una relación U/D igual a 4, con tamaño de buffers de 0, 2, 8, que fueron los escogidos por Conway. Para cuando Cvp es igual a 0.3, D fue igual a 5.63, y U, 22.50. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4
 Validación de resultados del modelo con fallas

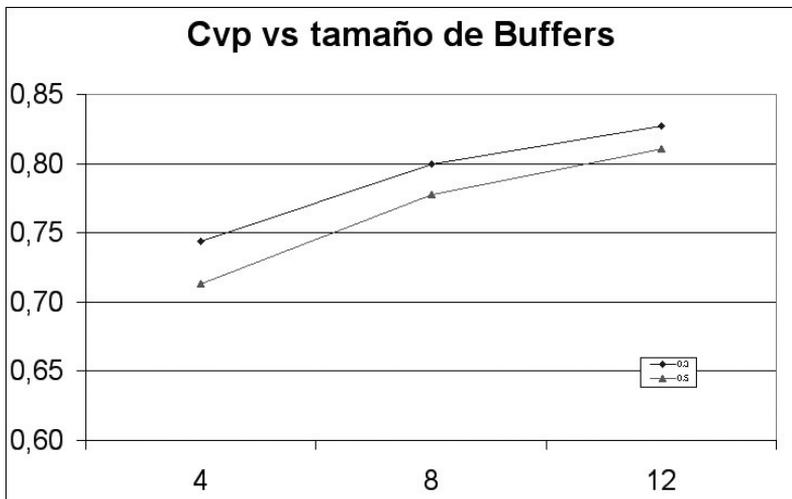
Z	Cvp	D	U	Conway	Modelo
0	5,63	0,3	22,5	78,43%	79,51%
4	5,63	0,3	22,5	94,30%	94,22%
8	5,63	0,3	22,5	98,02%	98,31%
0	15,63	0.5	62,5	71,20%	69,73%
4	15,63	0.5	62,5	87,97%	86,84%
8	15,63	0.5	62,5	95,72%	95,59%

Por las diferencias tan pequeñas encontradas entre estos datos, se puede asegurar que el modelo simula de manera adecuada los escenarios que se tienen para este tipo de análisis.

Con estas cuatro comparaciones podemos dar por aceptado el buen desempeño del modelo construido.

3.4. Resultados y análisis

Los primeros resultados que se pueden mostrar fueron las eficiencias obtenidas en cada uno de los Cvp simulados versus el tamaño de *buffers* evaluados (gráfica 2).



Gráfica 2. Eficiencia obtenida para los Cvp modelos en los tamaños de *buffers* considerados

En esta gráfica se puede observar que entre mayor sea el tamaño de *buffer* la eficiencia aumenta; esto es lógico, puesto que los *buffers* compensan la disminución de la capacidad de la línea cuando la estación se encuentra en estado de falla o de reparación, es decir, la posibilidad de las estaciones de estar en estado de *starvation* es menor, por ende, la capacidad de la línea no se ve afectada tanto como si no existieran. Esos resultados se pueden comprobar en la gráfica 3, en la que se muestran para un C_{vp} (0.5) las eficiencias obtenidas con *buffer*, comparándolas con las resultantes sin *buffers*.

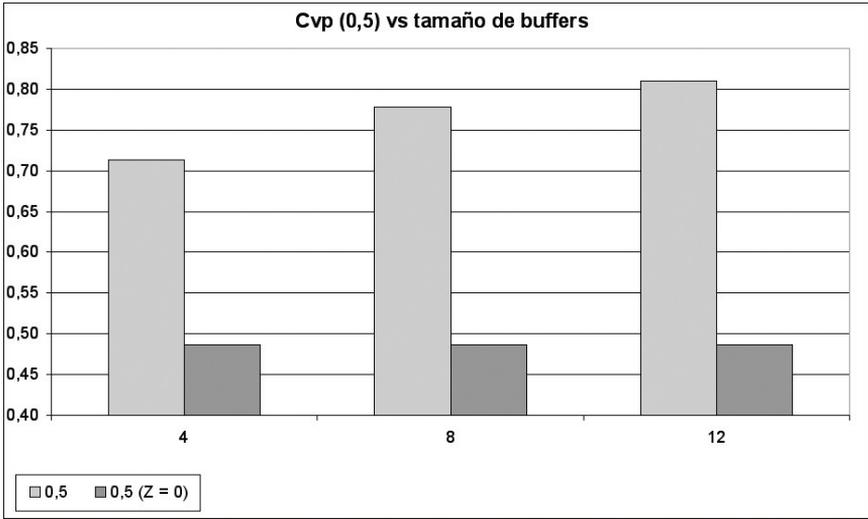
El aumento en la capacidad del sistema de producción al incorporar los *buffers* son considerablemente mayor al obtenido sin éstos, siendo cada vez mejor si se le aumenta el tamaño. Como se sabe, entre los dos C_{vp} , el más constante es el igual a 0.3, y si se hubiera analizado un tiempo exponencial, éste hubiera sido el más inestable y con peores resultados.

Las eficiencias máximas, promedio y mínimas encontradas en el experimento se muestran en la tabla 5.

Como se puede ver en la tabla anterior, entre más sea el coeficiente de variación del tiempo de procesamiento, es decir, entre más variable sea el tiempo de procesamiento, se obtienen menores eficiencias. Por ello debemos tratar de que nuestro sistema de producción tenga la variabilidad menor posible; sin embargo, esto último es muy difícil de controlar, mucho más cuando en el proceso existe alguna intervención humana, puesto que por las características humanas, hay muchos factores que intervienen en el desempeño de los operarios. Por medio de ésta también se puede confirmar que entre más sea el tamaño del *buffers* se va a obtener mayor eficiencia.

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza³ (ANOVA), con el fin de observar qué tan significativos resultan los factores considerados con respecto a la variable de respuesta. Según éste, con un nivel de confianza de 5%, todos los factores son significativos, es decir, contribuyen en alguna medida al cambio en el *throughput*.

³Se utilizó el software Matlab 6.5. La función "anovan" arroja las sumas de cuadrados, los cuadrados medios, el estadístico F y el valor p.



Gráfica 3. Eficiencia obtenida cuando la línea tuvo *buffers* y cuando éste fue igual a cero con fallas

Tabla 5
 Resultados de eficiencias máximas, promedio y mínimas

Cvp	Z	Promedio	Máx.	Mín.
0,3	4	74,38%	83,92%	62,96%
	8	79,96%	87,92%	69,27%
	12	82,79%	89,77%	73,01%
0,5	4	71,32%	80,98%	60,19%
	8	77,78%	86,20%	67,11%
	12	81,06%	88,53%	71,53%

Tomando como base la expresión hallada por Conway *et al.*, la cual relaciona el tamaño del buffer, el tiempo de reparación y su correspondiente coeficiente de variación, se procedió a incluir el factor coeficiente de variación del tiempo de procesamiento.

Gracias a los datos obtenidos del experimento se pudo apreciar cómo afectaban las variables analizadas en el gradiente de la eficiencia.

En la tabla 6 se pueden observar todas las variables, en los niveles considerados, y las respuestas obtenidas en cada escenario, resultado de una combinación de estas variables de entrada. Por observación de las interacciones entre las variables de entrada y salida, se llegó a la conclusión de que el coeficiente

de variación del tiempo de procesamiento, al ser menor que uno, se sumará a la ecuación de Conway, como un factor que aumenta el numerador.

Tabla 6
Resultados obtenidos en el experimento.
Variables consideradas y valores resultantes de sus interacciones

D	Cvd	Cvp	Z	Efic	Efic _o	Efic _{inf}	(Efic-Efic _o)/(Efic _{inf} -Efic _o)
40	0	0,3	4	83,28%	59,93%	92,90%	70,82%
			8	87,80%	59,93%	92,90%	84,52%
			12	89,63%	59,93%	92,90%	90,07%
		0,5	4	79,65%	53,21%	92,36%	67,55%
			8	85,26%	53,21%	92,36%	81,87%
			12	87,58%	53,21%	92,36%	87,80%
80	0	0,3	4	67,34%	40,88%	86,86%	57,56%
			8	74,86%	40,88%	86,86%	73,90%
			12	78,40%	40,88%	86,86%	81,61%
		0,5	4	64,46%	45,80%	86,37%	45,99%
			8	72,56%	45,80%	86,37%	65,97%
			12	76,58%	45,80%	86,37%	75,87%
40	812	0,3	4	83,92%	62,27%	93,33%	69,32%
			8	87,92%	62,27%	93,33%	82,36%
			12	89,77%	62,27%	93,33%	88,38%
		0,5	4	80,98%	56,09%	93,17%	67,11%
			8	86,20%	56,09%	93,17%	81,19%
			12	88,53%	56,09%	93,17%	87,49%
80	1	0,3	4	62,97%	44,63%	86,46%	43,82%
			8	69,27%	44,63%	86,46%	58,92%
			12	73,01%	44,63%	86,46%	67,84%
		0,5	4	60,19%	39,43%	85,89%	44,67%
				67,11%	39,43%	85,89%	59,57%
				71,53%	39,43%	85,89%	69,09%

Con ensayos de prueba y error, partiendo de este supuesto, se prosiguió a experimentar con posibles formas de relacionar esta nueva variable a la expresión existente.

Una primera alternativa evaluada se muestra en la ecuación (3.1); ésta fue ideada con la intención de colocar en la expresión el peor escenario teniendo en

cuenta la estocasticidad del tiempo de procesamiento, considerado inicialmente como determinístico.

$$\frac{2p(1 + Z_{\alpha} \sqrt{Cvp^2 \times P})}{(1 + Cvd^2)D} \quad (3.1.)$$

La segunda alternativa se aprecia por medio de la ecuación (3.2):

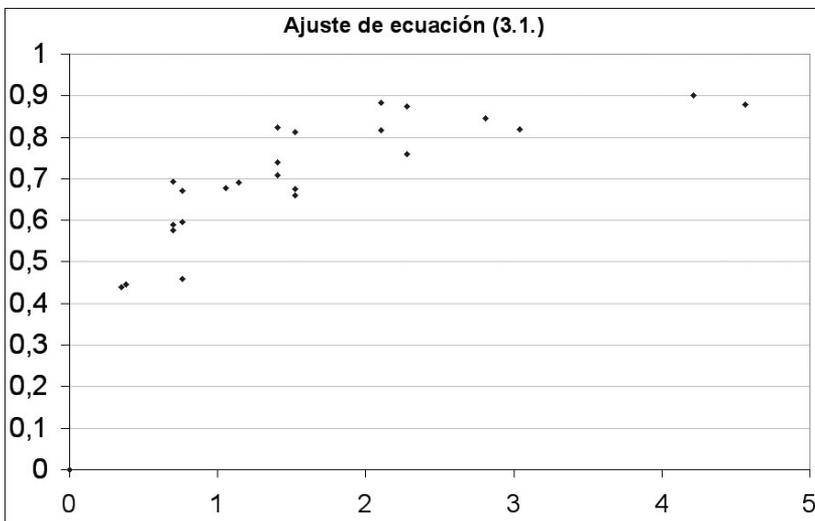
$$\frac{2p(1 + Cvp^2)}{(1 + Cvd^2)D} \quad (3.2.)$$

Por último se tuvo en cuenta la ecuación (3.3):

$$\frac{2p(1 + Cvp^2)}{(1 + Cvp^2 + Cvd^2)D} \quad (3.3.)$$

Para evaluar el ajuste de las ecuaciones antes propuestas a los datos experimentales, se utilizó la herramienta Excel, y se obtuvo como resultado el coeficiente de correlación de los datos a cada una de estas expresiones.

La expresión con mayor coeficiente de correlación fue la (3.3), con un R² igual a 96.92%, un poco mayor que el obtenido por la ecuación (3.1) (R²=95.87%); sin embargo, por la forma como se llegó a esta última expresión, se considera que ésta es la que mejor representa la relación buscada. La gráfica 4 muestra la forma de interacción en los puntos y la línea de tendencia.



Gráfica 4. Datos arrojados por la ecuación (3.1.)

Existe una gran semejanza entre la gráfica anteriormente mostrada con la obtenida por Conway, más aun teniendo en cuenta que su gráfica comprende valores determinístico, mientras la encontrada en este artículo es estocástica.

La ecuación antes encontrada se puede representar en equivalencias entre las dos proporciones; esta tabla es mostrada a continuación.

Existen muchas formas de llegar a establecer una relación entre una variable y una expresión, demostrada u obtenida previamente. Una forma muy confiable es por medio de una regresión lineal o no lineal, dependiendo del tipo de la relación existente, y la sospecha de la nueva variable, respecto a las demás ya dadas.

Tabla 7

Tabla de equivalencias encontradas en la relación buscada

Ecuación 3,1	Beneficio en la eficiencia
0	0,0
0,25	0,25
0,5	0,43
0,75	0,57
1	0,67
2	0,83
3	0,78
4	0,80
4,5	0,92

CONCLUSIONES

Como se pudo observar a lo largo de este artículo, implementar buffers entre estaciones trae un creciente beneficio en la capacidad del sistema productivo, amortiguando fallas, errores, y factores externos que afectan naturalmente a una línea de producción. Sin embargo, los productos que se pueden encontrar y estacionarse en los buffers tienen un valor para la entidad responsable de la línea, limitante que en muchas ocasiones hace disminuir o eliminar los *buffers*, esto debido a la tardanza en el retorno de lo invertido en los productos, más aun cuando los procesos son duraderos y los productos cuestan mucho. Por ejemplo, para aquellas líneas seriales en donde se producen partes de automóviles,

una falla en una de las máquinas centrales o iniciales de la línea pararía la línea, se detendría la producción y generaría un atraso en la programación antes fijada con la demanda; esto es un ciclo que sin la existencia de *buffers* se vuelve de cierta forma riesgoso. Para la prevención de estos acontecimiento existen muchas alternativas, entre ellas, tener una máquina paralela sin carga constante, que aguarde a cualquier mantenimiento o avería de la máquina principal para poder procesar, sin embargo, por obvias razones, esto saldría muy costoso y sería poco eficiente. Con esto se quiere concluir que en la vida real las decisiones en un sistema productivo se basan en costo-beneficio, el costo de tener producto estancado de cierta forma en la línea, o el beneficio que esto produce en el momento de algún percance, varía dependiendo del tipo de producto y de lo arriesgado de los directivos.

Otra forma de evitar disminuciones en la capacidad de la línea es establecer un plan preventivo que disminuya el riesgo de alguna falla catastrófica.

Luego de tener bien claro la situación del sistema productivo, se procede a escoger el tamaño y la localización de los buffers. Para esto existen muchas teorías; una de ellas afirma y comprueba que entre más simétricos se encuentren los *buffer* en su tamaño, mayor será el beneficio en la eficiencia. Y para el tamaño del *buffers*, Conway presenta una tabla de equivalencia para procesos determinísticos. Este artículo halló de manera experimental la relación entre lo encontrado por Conway y los sistemas estocásticos; por medio de esta relación se puede calcular el mínimo beneficio en la eficiencia si se incorpora Z como tamaño de buffers, de forma simétrica a lo largo de la línea. Es el mínimo beneficio, puesto que la relación trabaja con el peor escenario.

A pesar de que la relación de Conway se cumple en la gran mayoría de casos que corresponden al tema, la equivalencia hallada mediante este procedimiento no siempre es lo más sencillo de utilizar en la relación, por algo Conway presenta una tabla de equivalencias.

Se conoce de los múltiples procedimientos para encontrar la relación encontrada; para futuros estudios se deberán tomar varios de estos métodos, para así evaluar el desempeño de la actualmente encontrada.

En el caso específico de Conway, se pudo haber trabajado para encontrar desde un inicio una nueva relación que incluya el coeficiente de variación del tiempo de procedimiento, partiendo de un tiempo de procesamiento efectivo del cual se deduce la varianza, y por ende el coeficiente de variación en término de los otros factores o variables. Una u otro deben ser complementados por el

conocimiento profundo del problema y el apoyo de las bases teóricas y manejo de las herramientas necesarias.

REFERENCIAS

- [1] ASKIN, R. G. & STANDRIGDE, C.R. (1993). *Modeling and Analysis of manufacturing systems*. John Wiley & Song.
- [2] BLUMENFELD, D.E. (1990). A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable processing times and limited *buffer* capacity. *International Journal of Production Research*, 28 (6), 1163-1182.
- [3] CONWAY, R., MAXWELL, W., MCCLAIN, J.O. & THOMAS, J.L. (1988). "The role of work-in-process inventory in serial production lines". *Operations Research*, 36(2), 238-240.
- [4] DALLERY, Y. & FREIN, Y. (1993) On Decomposition Methods for Tandem Queuing Networks with Blocking. *Operations Research*, 41(2), 386-399.
- [5] PATERNINA-ARBOLEDA, C. D. & DAS, T. K. (2001). Intelligent Dynamic Control Policies for Serial Production Lines. *IIE Transactions*, 33(1), 65-77.
- [6] SIMON, J. T. & HOPP, W.J. (1991). Availability and Average Inventory of Balanced Assembly-like Flow Systems. *IIE Transactions*, 23(2), 161-168.
- [7] VANDERHENST, P., VAN STEELANDT, F. V. & GELDERS, L. F. (1981). Efficiency Improvement of a Transfer Line via Simulation (in Euro IV Papers). *The Journal of the Operational Research Society*, 32(7), 555-562.