

# LOS METAMODELOS DE REGRESIÓN EN SIMULACIÓN CON APLICACIÓN EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

## Regression Metamodeling in Simulation with Application to Manufacturing System

### RESUMEN

Con base en la información obtenida a través de la simulación de un caso hipotético de un sistema de manufactura tipo Pull, se presenta en este artículo el desarrollo y la validación de un modelo matemático auxiliar "Metamodelo" que sirve como apoyo en la comprensión del comportamiento de algunas variables del modelo principal. En la fase de construcción de dicho modelo auxiliar, se presenta la utilización de técnicas de Regresión que permiten elegir el Metamodelo de mejor ajuste. Finalmente se determina la relación funcional existente entre la cantidad de "Kanbans de Producción" (asignados a las estaciones de trabajo) y el porcentaje promedio de demanda satisfecha para todos sus productos ("% de Throughput").

**PALABRAS CLAVES:** Eficiencia, Kanban, Metamodelo, Throughput.

### ABSTRACT

It is presented in this article the development and the validation of an auxiliary mathematical model "Metamodel" based in information obtained through the simulation of a hypothetical case of a Pull Manufacturing System. This Metamodel is used like support in the understanding of the behavior of some variables of the main simulation model. In the phase of construction of this auxiliary model, the use of the Regression Technique is presented. This statistic tool allows choosing the Metamodel of better statistical adjustment. Finally, the functional relation between the quantity of "Production Kanbans" and the "% of Throughput" (Percentage average of satisfied demand for all products) is determined.

**KEYWORDS:** Efficiency, Kanban, Metamodel, Throughput.

### 1. INTRODUCCIÓN.

El uso de la simulación para analizar diferentes escenarios en el área de la manufactura es muy común hoy en día. La simulación permite describir el comportamiento de determinado sistema de manufactura y comparar diferentes configuraciones de dicho sistema sin incurrir en costos elevados.

Sin embargo, el analista con frecuencia se encuentra con diferentes grados de complejidad en los modelos de simulación.

Es ahí, cuando podría ser apropiado apoyarse en un modelo matemático auxiliar que permita 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.

De esta manera, se puede a través de dicho modelo auxiliar entender mucho mejor el comportamiento del modelo complejo simulado [1].

### JOSÉ SOTO MEJÍA

Ph. D. Ingeniería de Computación  
Magíster en Investigación Operativa  
y Estadística.

Docente Titular

Universidad Tecnológica de Pereira  
jomejia@utp.edu.co

### SERGIO FERNÁNDEZ HENAO

Magíster en Investigación Operativa  
y Estadística.

Ingeniero Industrial.

Universidad Tecnológica de Pereira

Docente Asistente.

sfernandez@utp.edu.co

Este modelo auxiliar es conocido como "Metamodelo", el cual, se puede estimar a través de técnicas de Regresión en donde las variables independientes son los parámetros de entrada del modelo de simulación y la variable dependiente se refiere a una medida de desempeño del modelo simulado. Ésta puede ser el tiempo de ciclo, el inventario en proceso o el porcentaje de demanda satisfecha, entre otras. Dada la importancia que toma el Metamodelo para el análisis integral del caso de estudio, esta investigación se enfoca en la construcción y validación de diferentes modelos de regresión, que permitan identificar la relación significativa entre los parámetros de entrada del modelo de simulación y su variable de desempeño [2].

Para lo anterior, se utilizó un modelo de simulación de un sistema de manufactura tipo Pull [3] en donde los parámetros de entrada (variables independientes) son la cantidad de Kanbans asignados a cada estación de trabajo los cuales están encargados de dar la autorización de fabricar un producto y la variable de desempeño (variable

dependiente) evalúa el porcentaje de demanda satisfecha (% de Throughput)<sup>1</sup>.

Con base al modelo de simulación arriba mencionado, se evaluaron varios escenarios. La variable de desempeño (% de Throughput) fue calculada para diferentes combinaciones del número de Kanbans en cada estación de trabajo. La información obtenida al correr el modelo de simulación fue utilizada para evaluar el ajuste de los datos a varios modelos de regresión, los cuales serán presentados la sección 3 de este documento. Allí se presenta el Metamodelo que mejor explica la relación entre las variables de entrada y de salida del sistema de manufactura tipo Pull citado en esta investigación y se realiza su validación respectiva.

## 2. CONCEPTOS GENERALES.

### 2.1. Sistema de Manufactura Tipo Pull.

Este sistema de manufactura hace parte integral de la filosofía de producción conocida como “Just In Time” (JIT), la cual hace parte fundamental del Sistema de Producción Toyota (conocido hoy en día como “Lean Manufacturing”) creado por los Japoneses después de la segunda guerra mundial y expandido en la década de los 70’s como respuesta a la dinámica de su situación mundial en relación a la calidad y niveles de producción de sus empresas [4].

El concepto de “Just In Time”, busca evitar exceso de equipos y operarios, por medio de sistemas flexibles que puedan adaptarse a las modificaciones debidas a problemas y fluctuaciones de la demanda. El principal enfoque de la filosofía “Just in Time” es que todos los procesos producen las piezas necesarias en el tiempo necesario y se deben tener disponibles únicamente las existencias mínimas necesarias para mantener unidos los procesos [5].

El Sistema Pull es uno de los elementos más importantes de esta filosofía de producción, ya que evita la sobreproducción y apoya en gran medida el logro de contar con cero inventarios en proceso. Éste, consiste en “halar” la producción desde el final del ciclo productivo hacia atrás, tomando como referencia el pedido del cliente, es decir que solo se produce lo que se demanda, evitando los cuellos de botella.

Dado lo anterior, se cuenta con un flujo de información que viaja en sentido contrario al proceso de fabricación (ver figura 1). Para generar dicho flujo, se utilizan tarjetas o sistemas de señal conocidos como “Kanbans”.

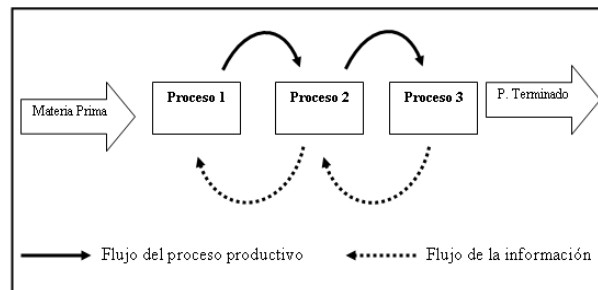


Figura 1. Flujo de información en el Sistema Pull.

El sistema de kanbans utiliza las tarjetas de instrucción o algún tipo de señal, para controlar la producción y el transporte de materia y/o productos. Éstas se colocan en distintos contenedores que se trasladan entre estaciones consecutivas, conllevando a la toma de decisiones locales generando así un sistema PULL.

Por lo tanto, el enfoque que tiene el Kanban en el proceso de producción es dar instrucciones basadas en las condiciones actuales del área de trabajo y prevenir que se agregue trabajo innecesario a aquellas órdenes ya empezadas.

Es así, como se evidencia el papel relevante que juega la asignación de “Kanbans” a cada estación de trabajo, ya que de ello depende en gran medida el funcionamiento del sistema Pull y por ende la consecución de todos los beneficios que trae consigo este sistema de producción a la empresa.

### 2.2. Metamodelos.

El término “Metamodelo” se utiliza para referirse a un modelo auxiliar de tipo analítico. Éste se construye con la finalidad de apoyar la comprensión del modelo principal respecto a las relaciones de las variables de estudio y así, poder tener una explicación más detallada de su funcionamiento. Desde la década de los 70’s los Metamodelos han venido tomando cada vez más fuerza en el área de la Simulación y la Optimización, no solo por las ventajas mencionadas en la sección anterior, sino, por el puente de comunicación que se logra al insertar el Metamodelo en una fase intermedia entre la Simulación y la Optimización [1].

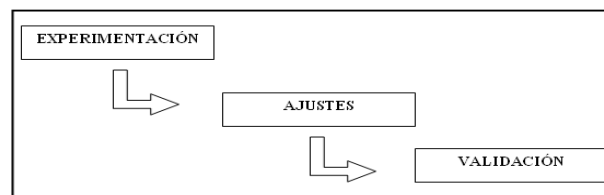


Figura 2. Fases de un Metamodelo.

La figura 2 presenta las fases básicas por las cuales debe pasar un Metamodelo. La fase de *experimentación* requiere en primer lugar, establecer ciertas variables relevantes de entrada, las cuales alimentan el modelo de

<sup>1</sup> Throughput, se define acá como demanda satisfecha diferente a como lo define Goldratt “la velocidad a las cual los pedidos se convierten en ventas” lo cual involucra variables de tiempo de permanencia en el sistema, precio de venta, costos de operación. No obstante no afecta esta definición la evaluación de los escenarios de simulación

simulación. También se debe tener al menos una variable de salida que se encarga de medir el desempeño de dicho modelo. En segundo lugar, se requiere el planteamiento de unos escenarios a través de diferentes combinaciones de las variables de entrada, para luego ser simulados y tomar el valor de la variable de desempeño. Estos escenarios deben ser planteados de forma aleatoria de tal manera que la experimentación no quede sesgada hacia algún extremo de los posibles valores que pueden tomar las variables de entrada.

La segunda fase, consiste en tomar la tabla de resultados de la fase anterior y realizar cierto tipo de ajuste matemático que permita encontrar una ecuación que explique lo mejor posible la relación existente entre las variables de entrada y la variable de desempeño. Gran parte de estos ajustes son realizados a través de “Técnicas de Regresión” en donde son planteados modelos de diferente orden (Lineales, Cuadráticos, Exponenciales, Logarítmicos, Potenciales, entre otros) los cuales son sometidos a las correspondientes pruebas de los supuestos de la regresión como lo son: Independencia, Normalidad, Homoscedasticidad y Significancia de los Parámetros [6].

Luego de tener el Metamodelo que mejor se ajusta a los datos de estudio, se pasa a la última fase (Validación del Metamodelo). Esta fase es de suma importancia ya que por medio de los resultados de la validación respectiva, se sustenta la confiabilidad del ajuste obtenido y por ende se demuestra un buen desempeño del Metamodelo sobre el caso de estudio.

Este proceso de validación, consiste en primera medida, en generar unos escenarios adicionales, también de manera aleatoria. Luego simularlos con el modelo original y registrar los correspondientes resultados. También se aplica el Metamodelo a los escenarios planteados y se registra el valor de la variable de desempeño para cada uno. Por último, se evalúa la diferencia existente entre los resultados del modelo simulado y los resultados del Metamodelo para cada escenario a través de la siguiente fórmula:

$$\% \text{Error} = \frac{\text{Modelo Simulado} - \text{Meta modelo}}{\text{Modelo Simulado}} \quad (1)$$

Con la fórmula 1 se obtiene para cada escenario el porcentaje de error que presenta el Metamodelo respecto al Modelo simulado. Con base a dichos porcentajes se encuentra el “Porcentaje Promedio de Error” que maneja el Metamodelo. Cumpliendo estas tres fases el Metamodelo tendrá la capacidad de explicar la relación funcional existente entre las variables de estudio. De esta manera, el Metamodelo se convierte en una ayuda para explicar el sistema estudiado. Además, también se convierte en un instrumento adicional de soporte para avanzar en el análisis del sistema, utilizando otras técnicas de búsqueda exploratoria o de optimización.

### 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

#### 3.1. Descripción del Modelo Principal.

En esta investigación se presenta el desarrollo de un caso hipotético de una línea de producción que maneja doce tipos de productos y tres celdas de manufactura [3], ver figura 3. Ésta opera bajo las condiciones del Sistema de Producción tipo Pull controlado por Kanbans de Producción (KP’s). Cada celda de manufactura puede realizar diferentes procesos dependiendo de la tarea asignada en relación a la orden de producción que se reciba en determinado momento.

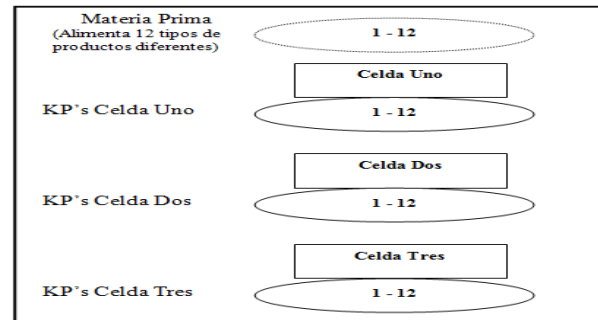


Figura 3. Línea de manufactura controlada por Kanbans de Producción.

Los tiempos de procesamiento en cada celda de manufactura para cada artículo se observan en la tabla 1. Se asumió una cantidad de demanda constante de una unidad cada dos minutos.

Tiempo de Procesamiento (Minutos)			
PRODUCTO	CELDA 1	CELDA 2	CELDA 3
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	4	5
4	4	5	6
5	5	6	7
6	6	7	8
7	7	8	9
8	8	9	10
9	9	10	11
10	10	11	12
11	11	12	13
12	12	13	14

Tabla 1. Tiempos de procesamiento para cada artículo en su correspondiente celda de manufactura.

El tamaño de cada contenedor es de una unidad para todas las partes. Luego, cada Kanban de Producción es reemplazado tan pronto su contenedor está vacío. La capacidad de las maquinas se tomó como infinita, ya que, son los Kanbans de Producción los que irían a regular dicha capacidad.

#### 3.2. Desarrollo del Metamodelo.

Para generar la información necesaria para construir el Metamodelo presentado en el numeral anterior, se corrió el modelo de simulación bajo diferentes escenarios los cuales se presentan en la tabla 2. Para establecer dichos escenarios, se utilizó un diseño factorial en donde cada factor corresponde al total de kanbans asignados a cada una de las 3 celdas de manufactura [7]. Los kanbans controlan la autorización de la producción de los doce artículos

Para generar la información con el modelo de simulación se establecieron combinaciones de solo tres niveles (uno, tres y seis) para cada factor, cada nivel se encarga de autorizar la fabricación de una, tres o seis unidades del respectivo artículo, correspondiendo a la cantidad de Kanbans asignados al artículo *i* en la celda de manufactura *j*.

Escenario	Alternativas Individuales			Numero Totales de kanbans		
	Ki1	Ki2	Ki3	TK1	TK2	TK3
1	3	1	3	36	12	36
2	3	6	3	36	72	36
3	6	6	3	72	72	36
4	3	1	1	36	12	12
5	3	1	6	36	12	72
6	3	3	6	36	36	72
7	1	3	1	12	36	12
8	6	3	6	72	36	72
9	1	6	3	12	72	36
10	3	3	3	36	36	36
11	1	3	6	12	36	72
12	6	1	6	72	12	72
13	6	1	3	72	12	36
14	1	1	1	12	12	12
15	1	1	3	12	12	36
16	6	6	1	72	72	12
17	6	1	1	72	12	12
18	6	3	1	72	36	12
19	6	6	6	72	72	72
20	1	3	3	12	36	36
21	1	6	6	12	72	72
22	3	3	1	36	36	12
23	1	6	1	12	72	12
24	3	6	1	36	72	12
25	6	3	3	72	36	36
26	1	1	6	12	12	72
27	3	6	6	36	72	72

**Tabla 2.** Escenarios generados a través del diseño de experimento factorial.

Como se puede ver en la tabla 2, se simularon 27 escenarios diferentes a través de un diseño factorial completo de 3<sup>3</sup>. Cada escenario cuenta con tres factores (uno por cada celda y con la posibilidad tres niveles de número de kanbans: 1 kanban ó 3 kanbans ó 6 kanbans) [7]. En las columnas 2, 3 y 4 se indica la cantidad de Kanbans de Producción que se asigna a cada celda de manufactura para cada artículo y en las últimas tres columnas se presenta el total de Kanbans permitido en cada celda (TK1, TK2 y TK3) cuando se alimenta el modelo de manera sucesiva con los doce artículos.

Con base en los parámetros arriba mencionados se adelantaron 27 corridas de simulación. La tabla 3 contiene para cada uno de los 27 escenarios simulados, su respectivo porcentaje promedio de demanda satisfecha (% Throughput).

Tomando como variables de entrada (variables independientes) el número de Kanbans totales asignados a cada celda de manufactura y como variable de desempeño (variable dependiente) el porcentaje promedio de demanda satisfecha “% Throughput”, (calculado dividiendo el total de entregas sobre el total de pedidos para un tiempo determinado de simulación) se busco el ajuste de los datos a los modelos de regresión presentados en las ecuaciones 2, 3 y 4.

Estas ecuaciones corresponden a: El Modelo Polinomial (ec.2), Modelo Exponencial (ec.3) y Modelo en Potencias (ec.4). Cada uno de ellos fue sometido a las pruebas estadísticas necesarias que corroboraban el cumplimiento de los supuestos de Normalidad, Independencia, Multicolinealidad y Homoscedasticidad de los datos. Finalmente, el mejor ajuste de los datos se logró con el modelo exponencial( ec. 3). En la sección 3.3 se presentan la estimación de los parámetros del modelo exponencial y las pruebas estadísticas correspondientes.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i \tag{2}$$

$$\ln(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \chi_i \tag{3}$$

$$\ln(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \ln(\chi_i) \tag{4}$$

ESCENARIO	TK1	TK2	TK3	% THROUGHPUT
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	36	12	36	36,64
2	36	72	36	73,37
3	72	72	36	73,37
4	36	12	12	29,68
5	36	12	72	36,64
6	36	36	72	78,39
7	12	36	12	29,68
8	72	36	72	78,39
9	12	72	36	43,65
10	36	36	36	73,37
11	12	36	72	43,65
12	72	12	72	36,64
13	72	12	36	36,64
14	12	12	12	29,68
15	12	12	36	36,64
16	72	72	12	29,68
17	72	12	12	29,68
18	72	36	12	29,68
19	72	72	72	97,53
20	12	36	36	43,65

21	12	72	72	43,65
22	36	36	12	29,68
23	12	72	12	29,68
24	36	72	12	29,68
25	72	36	36	73,37
26	12	12	72	36,64
27	36	72	72	82,72

**Tabla 3.** Resultados de los escenarios simulados.

**3.3. Análisis de Regresión.**

Como se mencionó en el numeral anterior, el modelo exponencial fue el que tuvo el mejor ajuste. En la ec. 5 se pueden observar los parámetros del Metamodelo exponencial.

$$\text{Ln}(Y) = 2,46 + 0,0133TK_1 + 0,0213TK_2 + 0,0354TK_3 - 0,000166TK_1^2 - 0,000238TK_2^2 - 0,000360TK_3^2 + 0,000003 TK_1TK_2TK_3$$

(5)

La inspección de la ecuación (5) permite observar el hecho de que cada vez que se aumenta el número de Kanbans (variables TKi) en cada estación, se incrementa exponencialmente el porcentaje promedio de demanda satisfecha (aunque con un poco de retraso causado por los términos de segundo orden que tienen parámetros con valores negativos muy pequeños).

Para juzgar sobre la calidad de la relación funcional estimada (ec. 5) se realizaron las siguientes pruebas estadísticas [8]:

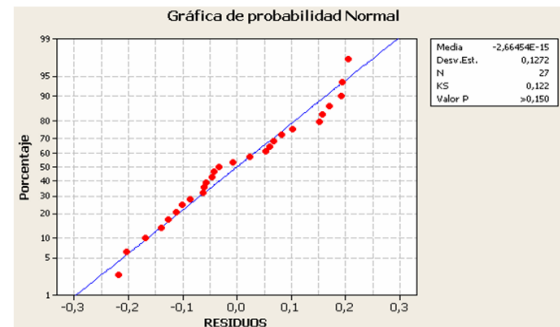
1. *Significancia de los estimadores:* Esta prueba permite inferir sobre la significancia de los parámetros estimados y de esta manera concluir si una variable independiente debe o no mantenerse en el modelo. La tabla 4 contiene en su quinta columna los “P-value” para cada parámetro de la ecuación. Ya que ninguno es mayor a 0.05, se puede inferir que cada estimador aporta información significativa para estimar el porcentaje promedio de Throughput con un nivel de confianza de al menos 95 %.

Predictor	Parámetros	Coef. de EE	T	P
Constante	2,4626	0,1915	12,86	0,000
TK <sub>1</sub>	0,013293	0,006274	2,12	0,048
TK <sub>2</sub>	0,021327	0,006274	3,40	0,003
TK <sub>3</sub>	0,035366	0,006274	5,64	0,000
TK <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-0,00016621	0,00007078	-2,35	0,030
TK <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-0,00023752	0,00007078	-3,36	0,003
TK <sub>3</sub> <sup>2</sup>	-0,00035995	0,00007078	-5,09	0,000
TK <sub>1</sub> TK <sub>2</sub> TK <sub>3</sub>	0,00000323	0,00000064	5,04	0,000

**Tabla 4.** Análisis de significancia para los coeficientes del Metamodelo.

2. *Prueba de normalidad:* Esta prueba verifica si los residuos se distribuyen normalmente. En la figura 4 se puede observar el cumplimiento del supuesto de “Normalidad” dado el comportamiento gráfico de los residuos. Igualmente al observar el estadístico de “Kolmogorov-Smirnov” y su correspondiente valor P de

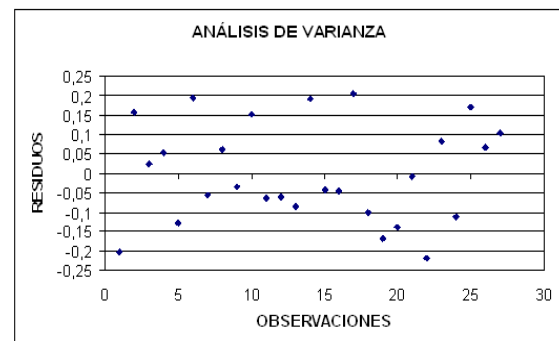
0.15, se infiere que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (los errores siguen una distribución NID(0,σ)). Por lo tanto los residuos siguen una distribución Normal.



**Figura 4.** Prueba de Normalidad.

3. *Prueba de Independencia:* Esta prueba tiene que ver con la ausencia de correlación entre los diferentes residuos, garantizando de tal manera, la independencia en los valores estimados por la ecuación 5. Para ello se utilizó el estadístico de prueba de “Durbin-Watson” el cual indica que cuando el valor de la prueba es cercano a 2, se puede inferir que los datos analizados son independientes. En este caso el valor del estadístico de prueba fue 2.43965, con lo cual se puede inferir que los residuos cumplen el supuesto de Independencia.

4. *Prueba de Homoscedasticidad:* El objetivo de esta prueba es inferir sobre la presencia de alguna tendencia en el comportamiento de los residuos. Si no la hay, se puede inferir sobre el cumplimiento de varianza constante. Al analizar la figura 5, se puede observar que no hay una tendencia marcada en el comportamiento de los residuos. Dado lo anterior se puede inferir que se cumple el supuesto de Homoscedasticidad.



**Figura 5.** Prueba de Homoscedasticidad realizada en M. Excel 2007.

Con los resultados de las pruebas estadísticas presentadas se puede inferir sobre la buena calidad del Metamodelo estimado. Además, este Metamodelo presentó un coeficiente de determinación de 90,3% lo que reitera un ajuste fuerte de las variables independientes con la variable dependiente. Finalmente,

el Metamodelo propuesto en la ecuación (5) debe validarse para ser aceptado como el modelo auxiliar que mejor se ajusta al comportamiento de las variables de entrada y salida del modelo principal de simulación.

### 3.4. Validación del Metamodelo.

Para realizar la correspondiente validación del Metamodelo encontrado, se generaron cinco escenarios adicionales en donde la cantidad de Kanbans Totales "TK" fue determinada de manera aleatoria, cuidando de que dichos valores estuvieran dentro del rango establecido de 12 a 72, lo que indica una variación de 1 a 6 Kanbans de Producción para cada uno de los 12 productos en cada una de las tres celdas de manufactura.

Las tres primeras columnas de la tabla 5 muestran los escenarios adicionales de validación con sus Kanbans de Producción Totales "TK" para cada una de las 3 celdas de manufactura. La cuarta columna (Y\_simulado) presenta el valor de la variable "% Throughput (Porcentaje promedio de demanda satisfecha)" encontrado a través de la simulación. La quinta columna (y\_Metamodelo) indica el valor obtenido con el Metamodelo estimado (ver ec.5) para la variable dependiente (% Throughput). La última columna muestra el porcentaje de error calculado al comparar los dos valores de la variable dependiente hallados por medio de la Simulación y el Metamodelo (ver ec. 1).

TK1	TK2	TK3	Y_Simulado	Y_Metamodelo	% ERROR
24	36	48	61,41	62,56	0,02
36	60	24	55,79	51,55	0,08
48	48	48	85,41	80,76	0,05
36	24	48	61,81	59,86	0,03
24	60	36	61,41	58,45	0,05
				<b>Error Promedio</b>	<b>0,05</b>

**Tabla 5.** Validación del Metamodelo.

El porcentaje promedio de Error encontrado en la fase de validación es de 5%, lo cual corrobora que el Metamodelo se ajusta muy bien a los datos analizados. Por lo tanto, la ecuación del Metamodelo que hace referencia a un modelo exponencial, puede ser empleada para explicar la relación funcional entre la cantidad de Kanbans asignados a cada estación de trabajo (variables de entrada) y el porcentaje de demanda satisfecha "% Throughput" (variable de desempeño).

## 4. CONCLUSIONES

La construcción de Metamodelos permite obtener un mayor entendimiento de las relaciones funcionales entre las variables que alimentan el sistema y la variable encargada de evaluar el desempeño de dicho sistema, por

lo cual se convierte en una gran ayuda para comprender comportamientos de sistemas más complejos.

En el estudio realizado se evidenció a través de la estimación del Metamodelo (ec.5), que a medida que la cantidad de Kanbans de Producción autorizados en la línea de producción aumenta, también aumentará, de manera exponencial, el porcentaje de demanda satisfecha.

El porcentaje promedio de Error encontrado en la fase de validación del metamodelo (e. 5) fue de 5%, lo cual corrobora que el Metamodelo se ajusta muy bien a los datos analizados. Por lo tanto, la ecuación del Metamodelo permite comprender mejor la relación funcional entre la cantidad de Kanbans asignados a cada estación de trabajo (variables de entrada) y el porcentaje de demanda satisfecha "% Throughput" (variable de desempeño).

El alcance del Metamodelo obtenido va más allá de la comprensión de la relación funcional de las variables de estudio, ya que esta ecuación se puede utilizar como puente de comunicación entre las áreas de la Simulación y la Optimización, lo cual genera potencialmente futuras investigaciones.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FRIEDMAN, L. W. and PRESSMAN, I., "The Metamodel in Simulation Analysis: Can it Be Trusted?", Journal of Operational Research Society, vol. 39, no 10, 939-948, 1998.
- [2] MADU, C.N., "Simulation in Manufacturing: A Regression Metamodel Approach", Computers and Industrial Engineering, vol. 18 no. 3, 381-389, 1990.
- [3] FERNANDEZ SERGIO. "Enfoque Metodológico Aplicado a los Sistemas de Manufactura tipo Pull". Trabajo de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira, Junio 2010.
- [4] RESTREPO C. JORGE H., PEREZ V. PAULA A., CRUZ T. EDUARDO A. Definición, Clasificación y Aplicación del sistema Kankan. Editorial Papiro. 2007
- [5] OHNO, T., "Toyota Production System – Beyond Large-Scale Production", Productivity Press, Cambridge, 1998.
- [6] ANDERSON, D., SWEENEY, D., WILLIAMS, T., "Estadística para Administración y Economía" Décima Edición, Editorial Cengage Learning, 2009.
- [7] MONTGOMERY, D., "Diseño y Análisis de Experimentos" Segunda edición. Limusa Wiley, 2004.
- [8] TRIOLA, M. "Estadística", Pearson, 2006.