



*Las opiniones y los contenidos de los trabajos publicados son responsabilidad de los autores, por tanto, no necesariamente coinciden con los de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad.*



Esta obra por la Red Internacional de Investigadores en Competitividad se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported. Basada en una obra en riico.net.

## Optimización de la secuenciación de la producción de ensamble de camiones pesados por medio de la simulación

*Ana Verónica Rodríguez Parral<sup>1</sup>*

*Jesús Fabián López Pérez<sup>2</sup>*

### **Resumen**

El problema de la secuenciación de la producción es uno de los problemas más complejos que se presenta en la industria automotriz al momento de producir la variedad de productos en sus líneas de ensamble. El objetivo de esta investigación es proponer un modelo de la secuenciación de la producción de componentes automotrices donde se definen cuáles son las variables de proceso que afectan el número de unidades producidas, el tiempo de finalización de la unidad y el porcentaje de utilización de las estaciones de trabajo. Actualmente la simulación por computadora es una de las herramientas más utilizadas para analizar, diseñar y evaluar los procesos productivos complejos y con ella poder tomar decisiones del sistema real sin poderlo afectar. Para este estudio se utilizaron los modelos predictivos de regresión multivariable para poder identificar cuáles son las variables con sus efectos principales e interacciones impactan de manera positiva o negativa al proceso de ensamble.

**Palabras clave:** Secuenciación, simulación, industria automotriz, Promodel

### **Abstract**

The problem of the sequencing of production is one of the most complex problems that is frequently found in the automotive industry when producing a variety of products in the assembly lines. The objective of this research is to propose a model of the sequencing of the production of automotive components, where the main objective is to define which are the process variables that affect the number of units produced, the time of completion of the unit and the percentage of utilization of the workstations. Currently, computer simulation is one of the most used tools to analyze, design and evaluate complex production processes and being able to make decisions of the real system without affecting it. For this study, multivariable predictive regression models identify which are those variables that with their main effects and interactions impact the assembly process positively or negatively.

**Keywords:** Sequencing, simulation, automotive industry, Promodel

---

<sup>1</sup> Universidad de Monterrey (UEM)

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)

## **Introducción**

La industria automotriz mexicana en los últimos años se ha caracterizado por ser uno de los sectores más productivos de la económica mexicana con el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) y 18% del PIB Manufacturero. Según el INEGI (2018). Por lo que ha sido el mayor centro de atracción para los inversionistas extranjeros. Al invertir en esta industria, se generan aproximadamente 870 mil empleos directos anualmente de acuerdo al INEGI (2018). México se ha posicionado como el 7° productor de vehículos en el mundo y el 1° en América Latina, superando a países como España, Brasil y Canadá. Así como también México ha contribuido con el 3.8% de la producción mundial de automóviles (OICA, 2017), es por esto que la industria automotriz mexicana, debe cumplir con los estándares de calidad, debido a las exigencias de los mercados internacionales, donde la variedad de productos se hace presente.

Cuando se produce en línea se presenta uno de los problemas más comunes en las líneas de ensamble de automotriz, el secuenciar las ordenes de producción a las estaciones de trabajo, debido a la variedad de los modelos y sus componentes es difícil definir cuáles son las ordenes que deben procesarse primero en las estaciones de ensamble y estas cumplir con los tiempos de proceso establecidos. Si no se resuelve el problema de la secuenciación en las líneas de ensamble de camiones pesados, se verán afectados a nivel micro la operación de los procesos productivos, costos y utilización de los recursos. A nivel macro se verán afectadas las estrategias de productividad y competitividad.

El problema de la secuenciación de los sistemas de manufactura fue descrito por primera vez por Graham (1966), el cual fue definido como un problema de optimización de las ciencias computacionales y de la investigación de operaciones. Donde  $n$  trabajos  $J_1, J_2, \dots, J_n$  con diferentes tiempos de procesamiento, deben programarse en “ $m$ ” máquinas minimizando el total de todas las estaciones de trabajo. La secuenciación de la producción de la industria automotriz fue descrita por primera vez por Parello (1986), donde el objetivo era programar vehículos a lo largo de una línea de ensamble donde se pudieran minimizar el número de infracciones hacia las restricciones de las estaciones de trabajo, tales como las limitaciones de capacidad y los cambios de secuencia de acuerdo al plan original de producción.

Existen en la literatura dos tipos de enfoques para solucionar el problema de la secuenciación en la industria automotriz (Solnon & Dat Cung Van, 2005),

- La primera es por medio de las aproximaciones exactas (programación de restricciones, programación entera, Ad-Hoc y Simulación)
- La segunda es por medio de los enfoques heurísticos (búsqueda local, algoritmo genético y optimización de la colonia de hormigas). En este estudio se utiliza la técnica de simulación, debido a que hoy en día es una de las herramientas más utilizadas para el análisis cuantitativo y es posible ver los resultados de manera inmediata, sin manipular el sistema real (Eppen, Gould, Schmidt, Moore, & Watherford, 2000). La simulación por computadora es una técnica numérica para conducir experimentos, lo cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un negocio o un sistema, en periodos extensos de tiempo real. (Gallego, 2002).

El objetivo de este estudio es determinar las variables que durante el proceso de ensamble de los componentes de los camiones pesados permiten optimizar la secuenciación de la producción e integrarlos a un Modelo de Optimización.

En este estudio se utilizaron 3 variables para comprobar cómo afectan la secuenciación de la producción en la industria automotriz, las cuales se definen a continuación:

**1. Inventario en proceso:** Es todo artículo o elemento que se utilizan en un proceso de producción, que tienen como característica que va aumentando su valor con cada proceso de transformación hasta convertirse en producto terminado (Krajewski, L., & M., 2011).

**2. Mezcla de productos:** se refiere al número total de líneas de productos que una empresa puede ofrecer a sus clientes. (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011).

**3. Tamaño de Lote:** Es la cantidad de materia prima, que entra en conjunto a un proceso productivo. (Aguirre, Müller, y Sebastian, 2008).

### **Metodología**

El diseño de la investigación fue experimental, donde se va analizar si una o más variables independientes afectan a la variable dependiente, por medio de la manipulación intencional. De acuerdo a la clasificación de Campbell et al (1966), dividen los diseños experimentales en 3 categorías: pre experimentos, experimentos “puros” y cuasi experimentos. Esta investigación será

un experimento “puro”, de acuerdo a la definición que se presenta reúne los siguientes requisitos para lograr el control y la validez interna: grupos de comparación (manipulación de la variable independiente) y equivalencia de los grupos. Por la naturaleza de esta investigación y con el fin de no afectar el sistema real por medio de la experimentación, se va a simular un proceso productivo de ensamble de camiones pesados y explicando como las variables independientes afectan sobre la dependiente.

El objeto de estudio de esta investigación es el proceso de ensamble de camiones pesados de una empresa manufacturera ubicada en García N.L., la cual cubre el 56% del mercado nacional segmentado sus productos como camiones urbanos y foráneos. Se desarrolló un modelo de simulación por computadora del proceso de ensamble de camiones urbanos y foráneos donde se simularon las 18 estaciones de trabajo y sus 8 estaciones de subensambles. Para el desarrollo del modelo de simulación por computadora se utilizó el software Promodel (Production Modeler).

Una vez desarrollado el modelo en el simulador se realizó un análisis experimental con el diseño básico  $2^k$  el cual establece dos niveles para cada cierta cantidad de factores k, quedando el diseño  $2^6$ , es decir 2 niveles con 6 factores. Los factores que se seleccionaron fueron tres variables de estudio y tres estaciones que presentaron cuellos de botella al momento de correr en la simulación (Variables independientes) Tabla 1. Para los tiempos de operación se generaron las distribuciones de probabilidad en este caso se utilizó la distribución uniforme representada como  $U(A \pm B)$ , donde A representa el límite superior de la distribución uniforme y B el límite inferior. Cabe mencionar que estos datos se generaron de los datos históricos de la empresa y con una producción diaria.

**Tabla 1** Factores de entrada y sus niveles

<b>Variables Independientes</b>	<b>Descripción del Factor</b>	<b>Nivel Alto</b>	<b>Nivel Bajo</b>
X1	Inventario en Proceso	1500 pzas.	1200 pzas.
X2	Tamaño de Lote	3000 pzas.	2400 pzas.
X3	Mezcla de Productos	20 pzas.	14 pzas.
X4	Tiempo de Proceso Estación 1	U(154.45, 90.60) min	U(46.20, 24.10)min
X5	Tiempo de Proceso Estación 2	U(90.20, 57.35) min	U(80.90, 48.20) min
X6	Tiempo de Proceso Estación 3	U(238, 124) min	U(100.10, 70.83) min

Fuente: Datos proporcionados por la empresa

## Diseño experimental

Como es un estudio experimental, fue necesario definir el número de réplicas (muestras experimentales), las cuales fueron definidas en base al diseño factorial  $2^6$ , es decir 2 niveles con 6 factores y 5 réplicas, al multiplicar estos elementos nos da un total de 320 réplicas, las cuales se utilizaron en la simulación para estudiar el comportamiento de las variables dependientes definidas como : unidades terminadas (Y1), tiempo de finalización, definida como el tiempo que le toma entrar al chasis desde la primera estación de ensamble hasta la última (Y2), porcentaje de utilización de las estaciones (Y3). Habiendo definido lo anterior se realizó una prueba de hipótesis de medias para encontrar que las variables independientes tuvieran medias significativas por medio del software SPSS Tabla 2 y 3.

Siendo la hipótesis a comprobar la siguiente:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_i: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde:

$\mu_1$  = la media de la variable independiente Xn valores bajos

$\mu_2$  = la media de la variable independiente Xn valores altos

**Tabla 2.** Resumen de los resultados de SPSS Prueba de Medias

Variable	Valor	Y1			Y2			Y3		
		Media	StDev	P-Value	Media	StDev	P-Value	Media	StDev	P-Value
X1	Bajo	11.50	2.51	0.000	5906	1150	0.040	78.72	4.02	0.023
	Alto	13.26	3.81		5541	1913		77.51	5.33	
X2	Bajo	13.09	3.51	0.002	5473	1871	0.005	77.17	5.43	0.000
	Alto	11.94	3.24		5975	1192		79.06	3.73	
X3	Bajo	10.59	3.74	0.000	4835	1482	0.000	76.44	3.60	0.000
	Alto	14.44	1.42		6617	1118		79.79	5.16	
X4	Bajo	12.75	3.35	0.221	5508	1712	0.015	77.80	5.00	0.234
	Alto	12.28	3.49		5939	1423		78.43	4.48	
X5	Bajo	12.50	3.32	0.492	5600	1718	0.163	78.23	4.17	0.669
	Alto	12.25	3.18		5848	1437		78.00	5.27	
X6	Bajo	12.59	3.40	0.683	4952	1315	0.000	77.46	3.90	0.013
	Alto	12.44	3.45		6495	1457		78.78	5.40	

Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

**Tabla 3.** Resumen de la prueba de hipótesis aceptadas y su valor P-value

Variable	Y1	Y2	Y3
Inventario en Proceso (X1)	0.000	0.040	0.023
Tamaño de Lote (X2)	0.002	0.005	0.000
Mezcla de Productos (X3)	0.000	0.000	0.000
Estación 1 (X4)		0.015	
Estación 3 (X6)		0.000	0.013

**Nivel de significancia  $\alpha = 0.05$**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Ya que se realizaron las pruebas de hipótesis de diferencia de media se procedió a construir los modelos de regresión multivariable con el software SPSS con el método stepwise. Se considerando las variables independientes y sus interacciones utilizando valores dicotómicos (0,1). Para cada variable dependiente se definió el siguiente modelo como:

$$Y = \beta_i + \beta_i X_i + \beta_i X_i + \dots \beta_n X_n + \beta_{ij} X_i * X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

Y = La variable dependiente

$\beta_i$  = coeficiente de regresión

$X_i$  = variables independientes

$X_i * X_j$  = efectos de interacción

$\varepsilon$  = Error

Una vez generados los modelos se procedió a la validación de la multicolinealidad de los datos (prueba estadística para corroborar que las variables no estuvieran correlacionadas entre sí). Debido a que se generaron más de un modelo para cada variable dependiente se seleccionó el mejor modelo basado en la  $R^2$  mayor y cuyo índice de condición sea menor a 15. Tabla 4.

**Tabla 4.** Coeficientes de determinación del modelo resultado SPSS

VARIABLES DEPENDIENTES	F	Sig.	R <sup>2</sup>	Número de modelos	Índice de Condición
Y1	78.284	0.00%	71.70%	10	12.9
Y2	56.002	0.00%	72.00%	18	15.3
Y3	16.876	0.00%	30.30%	8	6.4

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Posteriormente se generaron los coeficientes Beta ( $\beta$ ) para cada uno de los modelos que se presentan en la Tabla 5, 6 y 7 respectivamente para Y1, Y2, Y3. Los coeficientes estandarizados en estas tablas ordenados de mayor a menor nos muestran que si un valor de beta es positivo en la variable independiente esta tienen un aumento en la variable dependiente y si la beta es negativa en la variable independiente tendrá una disminución sobre la variable dependiente.

**Tabla 5.** Coeficientes de  $\beta$  SPSS para la variable dependiente Y1

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	11.497	0.334		34.393	0.000		
X1	4.262	0.403	0.640	10.573	0.000	0.250	4.000
X2*X3	3.513	0.403	0.457	8.713	0.000	0.333	3.000
X3*X4	3.238	0.403	0.421	8.030	0.000	0.333	3.000
X2*X4	3.238	0.403	0.421	8.030	0.000	0.333	3.000
X3	1.625	0.403	0.244	4.031	0.000	0.250	4.000
X1*X4	-1.487	0.403	-0.193	-3.690	0.000	0.333	3.000
X1*X2	-1.762	0.403	-0.229	-4.372	0.000	0.333	3.000
X1*X3	-1.762	0.403	-0.229	-4.372	0.000	0.333	3.000
X4	-3.238	0.403	-0.486	-8.030	0.000	0.250	4.000
X2	-3.375	0.403	-0.507	-8.371	0.000	0.250	4.000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Para el modelo de la variable dependiente piezas terminadas (Y1) se observa que las variables que poseen un mayor peso explicativo para el modelo (tomando en cuenta los valores absolutos de mayor a menor) son: Inventario en proceso (X1), Mezcla de productos (X2), Estación 1(X4), Tamaño de lote y Mezcla de productos (X2\*X3) y las que tuvieron menor impacto fueron Inventario en Proceso y Estación 1 (X1\*X4), Inventario en proceso y Mezcla de productos (X1\*X3), todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo.



**Tabla 6.** Coeficientes de  $\beta$  SPSS para la variable dependiente Y2

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	3556.108	185.898		19.129	0.000		
X6	1545.833	166.272	0.488	9.297	0.000	0.333	3.000
X3	1446.219	214.657	0.457	6.737	0.000	0.200	5.000
X4	1056.081	166.272	0.333	6.352	0.000	0.333	3.000
X2	1012.352	214.657	0.320	4.716	0.000	0.200	5.000
X1*X3	1145.394	191.995	0.313	5.966	0.000	0.333	3.000
X5	824.032	166.272	0.260	4.956	0.000	0.333	3.000
X1*X2	826.306	191.995	0.226	4.304	0.000	0.333	3.000
X3*X6	631.210	191.995	0.173	3.288	0.001	0.333	3.000
X3*X5	-524.462	191.995	-0.143	-2.732	0.007	0.333	3.000
X2*X3	-588.576	191.995	-0.161	-3.066	0.002	0.333	3.000
X2*X4	-621.360	191.995	-0.170	-3.236	0.001	0.333	3.000
X4*X5	-628.714	191.995	-0.172	-3.275	0.001	0.333	3.000
X2*X6	-636.630	191.995	-0.174	-3.316	0.001	0.333	3.000
X1	-1350.614	166.272	-0.426	-8.123	0.000	0.333	3.000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Para el modelo de la variable dependiente tiempo de terminación (Y2) se observa que las variables que poseen un mayor peso explicativo para el modelo (tomando en cuenta los valores absolutos de mayor a menor) son: Estación 3 (X6), Mezcla de productos (X3) e Inventario en proceso (X1) y las que tuvieron menor impacto fueron: Mezcla de producto y Estación 2 (X3\*X5), Tamaño de Lote y Mezcla de productos (X2\*X3), todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo.

**Tabla 7.** Coeficientes de  $\beta$  SPSS para la variable dependiente Y3

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	75.167	0.447		168.227	0.000		
X6	3.379	0.714	0.356	4.730	0.000	0.395	2.532
X1*X4	2.971	0.655	0.271	4.538	0.000	0.627	1.595
X3	2.484	0.571	0.262	4.347	0.000	0.617	1.620
X2*X5	2.442	0.623	0.223	3.921	0.000	0.693	1.443
X2*X3	1.735	0.707	0.158	2.454	0.015	0.537	1.861
X1*X6	-1.905	0.749	-0.174	-2.543	0.011	0.479	2.089
X4*X6	-2.207	0.714	-0.202	-3.090	0.002	0.527	1.899
X1*X5	-2.957	0.639	-0.270	-4.629	0.000	0.658	1.519

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Para el modelo de la variable dependiente porcentaje de utilización (Y3) se observa que las variables que poseen un mayor peso explicativo para el modelo (tomando en cuenta los valores absolutos de mayor a menor) son: Estación 3 (X6), Inventario en proceso y Estación 1 (X1\*X4) e Inventario en proceso y Estación 2 (X1\*X5) y las que tuvieron menor impacto fueron: Inventario en proceso y estación 3 (X1\*X6), Tamaño de Lote y Mezcla de productos (X2\*X3), todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo.

#### Modelo para Piezas Terminadas (Y1)

$$11.5 + 1.6X3 + 4.3X1 - 1.8X1X2 + 3.5X2X3 - 1.5X1X4 + 3.2X3X4 - 3.4X2 - 3.2X4 + 3.2X2X4 - 1.8X1X3 \quad (2)$$

#### Modelo para Tiempo de Finalización (Y2)

$$3556.1 + 631.2X3X6 + 1446.2X3 + 1545.8X6 + 1012.4X2 + 1056.1X4 - 1350.6X1 + 1145.4X1X3 + 826.3X1X2 - 636.6X2X6 - 621.36X2X4 - 588.6X2X3 - 628.7X4X5 + 824.0X5 - 524.5X3X5 \quad (3)$$

#### Modelo para el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3)

$$75.2 + 1.7X2X3 - 2.9X1X5 + 2.5X3 + 2.4X2X5 + 2.9X1X4 + 3.4X6 - 2.2X4X6 - 1.96X1X6 \quad (4)$$

## Conclusiones

Los resultados de cada una de las hipótesis comprobadas (verde) y las no comprobadas (rojo) se resumen a continuación en la tabla 8.

**Tabla 8.** Hipótesis comprobadas y no comprobadas en los modelos de regresión

Variables	Unidades Terminadas	Tiempo de Finalización	% Utilización
	Y1 (R <sup>2</sup> = 72%)	Y2 (R <sup>2</sup> = 72%)	Y3 (R <sup>2</sup> = 30%)
Inventario en Proceso (X1)	4.26	-1350.61	
Tamaño de Lote (X2)	-3.38	1012.35	
Mezcla de Productos (X3)	1.62	1446.22	2.48
Estación 1 (X4)	-3.24	1056.08	
Estación 2 (X5)			
Estación 3 (X6)		1545.83	3.38
Inv proceso y tamaño de lote(X1*X2)	-1.76	826.31	
Inv proceso y mezcla (X1*X3)	-1.76	1145.39	
Tamaño de lote y mezcla (X2*X3)	3.51	-588.58	1.74

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

Con respecto al **modelo de piezas terminadas (Y1)**, se puede concluir lo siguiente:

Con respecto a la hipótesis relacionada con el inventario en proceso (X1), se puede concluir que fue una de las variables con un efecto directo y significativo con las piezas terminadas, ya que se puede concluir que entre mayor cantidad de inventario en proceso mayor será la cantidad de piezas terminadas. Los estudios previamente revisados confirman que al tener las cantidades optimas de inventario en proceso, las piezas terminadas tienden a aumentar los autores que también lo demuestran son (Krystek, J. et al (2016), Duannmu, J. et al (2007)).

Para la hipótesis de la variable tamaño de lote (X2), que a mayor cantidad de tamaño de lote, mayor cantidad de piezas terminadas. Los autores: Burbano Arias, J.F. (2011), Aguirre et al (2008), Drexl, A. et Al (2006), mencionan que al tener un tamaño de lote mayor de componentes en las líneas de ensamble se trabajarían de manera continua y por lo tanto se tendrían más piezas terminadas. En este caso la hipótesis no fue comprobada ya que en este estudio se utilizaron solo tres estaciones de ensamble con tiempo estocásticos y el resto con tiempo determinísticos, por lo tanto entre más estaciones tengan tiempo estocástico, mayor número de piezas terminadas.

En las hipótesis relacionada con la mezcla de productos (X3), entre mayor mezcla de productos, menor la cantidad de piezas terminadas. Los autores: Valero, H.M. et al (2011), Tiacci, L. et al (2007), quienes mencionan que de acuerdo a la complejidad de las mezclas de productos, las piezas terminadas disminuyen por los cuellos de botella que se llegan a presentar en las estaciones de trabajo. En este caso no se comprobó dicha hipótesis, ya que las estaciones no presentaron cuellos de botella y por lo tanto hubo flujo continuo entre las estaciones.

Para la hipótesis de la variable en inventario en proceso y tamaño de lote (X1\*X2), se tiene que a mayor cantidad de inventario en proceso y con un tamaño de lote óptimo, se puede tener un mayor número de piezas terminadas, en este caso la hipótesis no fue comprobada. Debido a que los estudios de Aguirre et al (2008) y Jararaman et al (1997), agregaron una tercer variable a esta interacción tiempo de traslado entre estaciones y en este estudio no se consideró tal variable, ya que es un sistema en el cual conforme las estaciones se vayan desocupando estas van avanzando.

En el modelo **tiempo de terminación (Y2):**

En el caso de la variable inventario en proceso (X1), la hipótesis comprobar fue que a mayor inventario en proceso, mayor tiempo de terminación esto de acuerdo al autor Ismail et al (2002), en este caso no se comprobó, ya que las estaciones no presentaron cuellos de botella y el proceso de ensamble fluyo de manera continua.

Para la variable tamaño de lote (X2), la hipótesis a comprobar fue que al tener un mayor tamaño de lote, un mayor tiempo de terminación como lo menciona Carro Paz et al (2004), la hipótesis si fue comprobada, ya que esta variable fue una de las más explicativas para el modelo.

Para la variable mezcla de productos (X3), la hipótesis a comprobar fue que a una mayor mezcla de productos, mayor tiempo de terminación, la cual fue aceptada y fue corroborada por los estudios de Drexl, A. et Al. (2001), Corichi, G.A. et Al (2000).

En la variable tamaño de lote y mezcla (X2\*X3), la hipótesis a comprobar era que para un mayor tamaño de lote y mezcla hubiera un mayor tiempo de terminación, esta hipótesis fue reforzada por Mirzpour et al (2009), en este estudio no se comprobó, ya que fue una de las variables menos explicativas para el modelo, en este caso puede ser por que no se tienen el tamaño óptimo del lote, como lo mencionó Mizpur et al (2009), para este tipo de casos se necesita tener la cantidad óptima del lote.

Para el caso del modelo **porcentaje de utilización (Y3)**,

Una de las variables relevantes fue la mezcla de productos (X3), la hipótesis a comprobar fue que a mayor mezcla de productos, mayor tiempo de utilización de las estaciones de trabajo esta hipótesis fue reforzada por el autor Trakultogchai et al. (2013), esta hipótesis si se comprobó debido a que las estaciones presentaron un mayor tiempo de utilización al momento de procesar las mezclas de producción más complejas en el modelo de simulación.

Para la interacción de la variable tamaño de lote y mezcla de productos (X2\*X3) fue una de las variables poco relevantes de acuerdo a los resultados del modelo, la hipótesis a comprobar fue que a un mayor tamaño de lote y mezcla de productos, mayor utilización de las estaciones de trabajo, esto de acuerdo al estudio de Ulgen et al (1989) ya que hace mención que estas dos son variables críticas en el proceso de secuenciación ya que primeramente se tiene que definir la mezcla de productos y luego el tamaño de lote, la hipótesis si fue comprobada, ya que el tiempo de las estaciones fue mayor.

En la hipótesis referente al inventario en proceso de las estaciones 2 y 3, se esperaba que al tener un mayor inventario en proceso hubiera un mayor porcentaje de utilización en las estaciones, esto no ocurrió debido a que estas estaciones no presentaron un cuello de botella y las estaciones anteriores y posteriores no tienen tiempos de procesamiento en función de una distribución de probabilidad. Los autores que hacen mención de la mejora de las estaciones que son cuellos de botella en función de tener cargas balanceadas en las estaciones de trabajo son Gadinaik et al (2014), Wirabhuanna et al (2008).

En los modelos presentados llama la atención que la variable independiente de la estación 2 (X5) solo apareció una vez como un efecto principal en la regresión esto es debido a que es una de las estaciones que presenta mayor porcentaje de bloqueo, por lo tanto no tuvo tiempo de operación.

Para el modelo de la variable dependiente porcentaje de utilización (Y3), resultó ser un modelo significativo de acuerdo a la regresión pero obtuvo una  $R^2$  de 30% por lo tanto las variables que se utilizaron no afectan el resultado para la Y3 para estudios futuros se van a incluir más variables y validar cuáles variables independientes impactan en el resultado.

El uso de la simulación por computadora ayudó a generar la información de manera casi inmediata de cómo las variables independientes: inventario en proceso, tamaño de lote, mezcla de productos, estación 1, estación 2 y estación 3, afectaron las variables dependientes: piezas terminadas, tiempo

de finalización y porcentaje de utilización, eso sin afectar el sistema real y esperar a obtener los resultados en un lapso de tiempo considerable.

El uso de esta técnica ayuda a visualizar a su vez de manera rápida y practica como mejorar el proceso productivo y ver qué pasa si se cambian los parámetros de entrada y sus combinaciones.

Para futuras investigaciones se va integrar la información de otras empresas, así como también agregar otras variables que afectan a la secuenciación.

### **Referencias**

Aguirre, A., Müller, E., Seffino, S., y Méndez, C. (2008). Applying Simulation-Based Tool to Productivity Management. *Winter Conference*, 19(1), 1838-1846.

Altendorfer, K., Felberbauer, T. Gruber, D., y Hübl, A. (2013). Application of Generic Simulation Model to Optimize Production and Workforce Planning At An Automotive Supplier. *Winter Conference*, 13(1), 1-9.

Beutel, A., Minner, S. (2015). Safety Stock Planning Under Causal Demand Forecasting. *International Journal of Production Economic*, 15(2), 637-645.

Burbano, J.F. (2011). *Optimización del Tamaño de Lote de Producción Ajustado Por la Trazabilidad*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle Santiago de Cali.

Boulaksil, Y. (2016). Safety Stock Placement In Supply Chains With Demand Forecast Updates. *Operations Research Perspectives*, 1(3), 27-31.

Campbell, D. y Julian, S. (1966). *Diseños Experimentales y Cuasiexperimentals en la Investigación Social*. Buenos Aires: Amorrourt Editores.

Carro, R. y González, D. (2005). *Administración de Operaciones*. Buenos Aires: Universidad Mar del Plata.

Chuang, Y., Lee, H. y Lai, Y. (2012). Item-associated Cluster Assignment Model On Storage Allocation Problem. *Journal of Computers y Industrial Engineering*, 63(4), 1171-1177.

Drexl, A. y Kimms, A. (2001). Sequencing JIT Mixed- Model Assembly Lines Under Station-Load and Part - Usage Constraints. *Management Science*, 47(3), 480-491.

Ding, F.Y. y Sun, H. (2004). Sequencen Alteration And Restoration Related To Sequenced Parts Delivery On An Automobile Mixed-Model Assembly Line With Multiple Department. *International Journal of Production Research*, 42(8), 1525-1543.

Duanmu, J. y Taaffe, K.. (2007). Measuring Manufacturing Throughput Using Takt Time Analysis and Simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference*. 1633-1640.

Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J., (2000). *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa*. México D.F.: Prentice Hall.

Gadinaik, Y., y Bilolikar, V. (2014). *Simulation Based Analysis Of Job Shop Manufacturing Planning*. College of Engineering Mumbai Conference. 1-10.

Grace Hua, N. y Willems, S. (2015). Analytical Insights into Two-Stage Serial Line Supply Chain Safety Stock. *International Journal of Production Economics*, 107-112.

Graham, R. (1966). Bounds for Certain Multiprocessing Anomalies. *The Bell System Technical Journal*, 45(9), 1563-1581.

Gu, J., Goetschalckx, M., McGinnis, L. (2007). Research on Warehouse Operation: A Comprehensive Review. *European Journal Of Operational Research*, 177(1), 1-21.

Hernández, K., Olivares, E., y Zuñiga, C. (2015). Safety Stock Levels in Modular Product System Using Commonality And Part Families. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1387-1392.

*Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*. Consultado 17-03-2017 en <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/>

Ismail, N., Tai, S., y Leman, Z. (2002). Improving Productivity and Efficiency of a Vehicle Seat Assembly Line in a Manufacturing Company. *Student Conference on Research and Development*. 94-97. Malaysia.

Jararaman, A., y Ali, G. (1997). Applications of Discrete Event Simulation in the Design of Automotive Powertrain Manufacturing Systems. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 758-764. Michigan, USA.

Krajewski, L., Ritzman, L. y Malhotra. (2011). *Administración de Operaciones: Procesos y Cadenas de Valor*. 8va. Edición. México: Prentice Hall.

- Krystek, J., Alszer, S. (2016). The Role of Buffer Warehouse in Selected Production Systems. *International Conference on Industrial Logistics*, 119-126. Zakopane, Poland.
- Kumar, A., Evers, P. (2015). Setting Safety Stock Based on Imprecise Records. *International Journal of Production Economics*, 169(2), 68-75.
- Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA). Consultado 17-03-2017 en <http://www.oica.net/>
- Parello, B., Kabat, W. y Wos, L. (1986). Job-Shop Scheduling Using Automated Reasoning: A Case Study Of the Car-Sequencing Problem. *Journal of Automated Reasoning*, 2(1), 1-42.
- Persona, A., Battini, D., y Manzini, R. (2007). Optimal Safety Stock Levels of Subassemblies And Manufacturing Components. *International Journal of Production Economics*, 110(2), 147-159.
- Solnon, C., Cung, V., y Nguyen, A. (2005). The car sequencing problema: Overview of State-of-the-art Methods and Industrial Case-Study of the ROADEF' 2005 Challenge Problem. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 912-927.
- Strack, G., Pochet, Y. (2010). An Integrated Model For Warehouse and Inventory Planning. *European Journal of Operational Research*, 204(1), 35-50.
- Tiacci, L. y Saetta, S. (2007). *Process-oriented simulation for mixed-model assembly lines*. 2. 1250-1257.
- Trakultongchai, A., Supsomboon, S., y Limtanyakul, K. (2013). Process Simulation and Improvement of Automotive Paint Shop. *International Journal of Mining Metallurgy y Mechanical Engineering (IJMMME)*. 1(1), 1-4
- Valero-Herrero, M., Garcia-Sabater, J. y Rafael, J. (2011). Planteamiento dinámico del problema de secuenciación en líneas de montaje con mezcla de modelos. *International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, 1(1), 1-9.
- Wirabhuana, A., Haron H. y Imtihan, M. (2008). Simulation and Re-Engineering of Truck Assembly Line. *Second Asia International Conference on Modelling y Simulation (AMS)*, 783-787. Kuala Lumpurpp.