



Modelo de optimización para los requerimientos de la programación de la producción aplicado a las líneas de camiones pesados

Rodríguez-Parral, Ana Verónica¹; López-Pérez, Jesús Fabián²

¹Universidad de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Tecnologías,
Monterrey, Nuevo León, México, ana.rodriguez@udem.edu,
Av. Ignacio Morones Prieto 4500 Pte., (+52)8182151000

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Contaduría Pública y
Administración, Monterrey, Nuevo León, México, fabian.lopezpz@gmail.com,
Av. Universidad S/N Col. Ciudad Universitaria, (+52)8183294080

Artículo arbitrado e indexado en Latindex

Revisión por pares

Fecha de recepción: Mayo 2020

Fecha de publicación: Julio 2020

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 este artículo 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 (desde que entra a la primera estación hasta que sale de las líneas de ensamble) 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.

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 article 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 (since it enters the first station until it leaves the assembly lines) 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..

Key words: sequencing, simulation, automotive industry, Promodel

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de esta investigación es determinar cuáles son las variables que durante el proceso de ensamble de camiones pesados optimizan la secuencia e integrarlos a un modelo de optimización.

El problema de la secuenciación de la industria de manufacturera, fue descrito por primera vez por Graham (1966), quien lo definió 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 proceso, deben programarse en N máquinas minimizando el tiempo total de procesamiento de todas las estaciones de trabajo; En el caso de la secuenciación de la industria automotriz fue definida por primera vez por Parello (1986) donde el objetivo era programar vehículos en la línea de ensamble minimizando las restricciones de la capacidad instalada y los cambios de secuencia en el plan de producción.

La industria automotriz es una de las industrias internacionales más competitivas, la cual genera y exporta vehículos a nivel mundial. De acuerdo a Bertonecello et al (2016), menciona que es una de las industrias más importantes para la economía global y que cuenta con las mejores prácticas tecnológicas invirtiendo más de 84 mil millones de Euros anualmente, en investigación, desarrollo y producción. (OICA, 2017).

La producción mundial de vehículos muestra una tendencia creciente a lo largo de los últimos 20 años y se espera que esta tendencia se mantenga hasta 2025, de ser así para el año 2020 la manufactura de vehículos en los países emergentes en particular se acercará al volumen de producción de los países desarrollados. Para entonces, se producirán a nivel mundial más de 112 millones de unidades, de las cuales 47% se fabricarán en los mercados emergentes (India, Brasil, México, entre otros) y el restante 53% en los mercados desarrollados (China, EEUU, Japón, Alemania y Corea del Sur). (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2014).

Debido a los costos de mano de obra, infraestructura y regulación de las leyes de los países emergentes, los fabricantes automotrices se están estableciendo cada vez más en estos países, esto con el fin de reducir sus costos productivos.

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 y a nivel macro se verán afectadas las estrategias de productividad y competitividad; siendo beneficiadas todas las empresas manufactureras que cuenten con procesos de ensamble en secuencia, como también la industria automotriz de vehículos ligeros.

2. MARCO TEÓRICO

La industria automotriz internacional está segmentada por dos sectores: terminal y autopartes, donde la industria terminal se divide a su vez en: vehículos ligeros y vehículos pesados, estas definiciones a nivel mundial son utilizadas por la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA, 2017). A continuación se presentan las definiciones:

Vehículos ligeros: Vehículos de motor utilizados para el transporte de pasajeros que no contienen más de ocho asientos (incluido el del conductor).

Vehículos pesados: Vehículos utilizados para el transporte de mercancías; su peso es mayor a 7 toneladas.

Este estudio se basa en el caso de vehículos pesados.

Como se mencionó anteriormente la secuenciación de la producción en la industria automotriz fue descrita por Parello (1986), donde resalta que los automóviles producidos, no poseen las mismas características, ni siguen un orden establecido al momento de ensamblarse. Teniendo como ejemplo las variantes de los modelos básicos que se ofertan actualmente. Las líneas de ensamble cuentan con diferentes estaciones de componentes, las cuales están diseñadas para ensamblar determinado porcentaje de vehículos, en un proceso secuenciado sin exceder las capacidades de cada estación.

La definición que utiliza Mastrolilli (1998), para definir la secuenciación de la producción es N trabajos son procesados en un conjunto de M máquinas. Cada trabajo tiene un orden operacional con un tiempo de

procesamiento determinado. Donde cada estación se encuentra disponible y permite procesar una operación a la vez. El objetivo principal de la secuenciación es minimizar los tiempos definidos como funciones objetivos.

Para esta investigación se utilizaron las siguientes variables: Capacidad Instalada, Inventario en Proceso, Tamaño de Lote, Takt Time, Mezcla de Productos, Tiempo de Ciclo, Tiempos de Operación, Cuellos de Botella, Tiempos de Paro, Generación de Desperdicios, siendo estas las variables independiente y son definidas a continuación:

1. Capacidad Instalada: es el potencial de producción o volumen máximo de producción que una empresa en particular, unidad, departamento o sección; puede lograr durante un período de tiempo determinado, teniendo en cuenta todos los recursos que tienen disponibles, sea los equipos de producción, instalaciones, recursos humanos, tecnología, experiencia/conocimientos, etc. (Jara, 2015).

2. Inventario en Proceso: es todo artículo o elementos que se utilizan en un proceso de producción y tiene como característica principal que con cada proceso va aumentando su valor hasta convertirse en producto terminado. Es decir son productos parcialmente terminados que se encuentran en un grado intermedio de producción que fueron aplicados labor directa y gastos indirectos inherentes al proceso producción en un momento determinado. (Krajewski et al 2011).

3. Tamaño de Lote: es la cantidad de materia prima, que entra en conjunto a un proceso productivo. (Aguirre et al 2008).

4. Takt Time: es el tiempo de trabajo disponible dividido por el número de unidades terminadas necesarias en ese periodo de tiempo. (Duannmu & Taaffe, 2007).

5. Mezcla de Productos: también es conocida como la variedad de productos, se refiere al número total de línea de productos que una empresa puede ofrecer a sus clientes. (Valero et al 2011).

6. Tiempo de Ciclo: es el tiempo máximo permitido para trabajar en la elaboración de una unidad en cada estación. Si el tiempo requerido para trabajar con los elementos de una estación es mayor que el tiempo de ciclo de la línea, entonces seguramente habrá cuellos de botella en la

estación, los cuales impedirán que la línea alcance su tasa de producción deseada. (Carro Paz & González Gómez, 2005).

7. Tiempos de Operación: es el intervalo de tiempo necesario para completar una orden de trabajo, con determinadas estaciones de trabajo (Mucientes et al 2008).

8. Cuellos de Botella: es definido como cualquier recurso cuya capacidad es menor a la demanda requerida de él. En otras palabras, es un recurso que limita las piezas terminadas. En el punto en el proceso de producción donde el flujo tiende a ser más lento, los cuales pueden ser una máquina, operadores escasamente capacitados, herramientas especializadas, etc. (Goldratt & Cox, 1986).

9. Tiempos de Paro: es definido como la cantidad de tiempo que puede transcurrir entre el inicio de una actividad A1 y que inicial en una actividad A2, siempre y cuando A1 preceda de A2. (Focacci et al 2000).

10. Generación de Desperdicios: El ex presidente de Toyota, Fujio Cho define desperdicio como “cualquier cosa que no sea la cantidad mínima de equipo, materiales, piezas, horas de trabajo absolutamente esencial para la producción”. Cualquier cantidad que exceda el mínimo requerido se considera un desperdicio, porque se invierte esfuerzo y material en algo que no es necesario en ese momento (Chase et al 2010).

Los autores Solnon et al. (2005), mencionan que existen dos tipos de enfoques principales para eficientizar la secuenciación de la producción en la industria automotriz con sus respectivas metodologías.

El primer enfoque es por los métodos de optimización (exactos), las cuales son:

- a. Programación de Restricciones
- b. Programación Entera
- c. Ad-Hoc
- d. Simulación

El segundo enfoque es por heurística (aproximado), con las siguientes metodologías:

- a) Enfoque en la Búsqueda Local
- b) Algoritmo Genético

c) Optimización de la Colonia de Hormigas.

Cabe mencionar que no solo estas metodologías existen para resolver esta problemática presentada, pero son las principales según los autores anteriores.

En esta investigación se utilizan las técnicas de simulación, según los autores Ülgen & Upendram (1995). Las herramientas de la simulación en la industria automotriz, son utilizadas para diseñar y operar las plantas, aumentando su productividad. Así como también es más fácil identificar los cuellos de botella e inventario en proceso. Siendo esto posible por los resultados estadísticos del modelo de simulación.

3. MÉTODO

El diseño de esta investigación es experimental, ya que se analizar si una o más variables independientes afectan a la variable dependiente, por medio de la manipulación intencional.

Por la naturaleza de esta investigación y con el fin de no afectar el sistema real por medio

de la experimentación, se realizó la simulación de un proceso productivo de ensamble de camiones pesados de una empresa que actualmente produce el 56% del mercado nacional.

Para el desarrollo del modelo se utilizó el software Promodel (Production Modeler), desarrollado por Promodel Corporation, siendo una herramienta de simulación con animación, que permite modelar sistemas de manufactura y servicios.

Se definieron 3 variables dependientes principales para determinar el impacto de las variables independientes en la secuenciación, las cuales son: unidades terminadas (Y1); tiempo de finalización el cual es el tiempo que le toma al chasis ingresar desde la primera estación de ensamble hasta la última (Y2), y el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3).

Para los datos de entrada del modelo de simulación se utilizó un diseño factorial básico 2^k el cual consta de dos niveles llamados nivel bajo (-) y nivel alto (+), con 9 factores (variables independientes). Estos datos fueron proporcionados por la empresa, los cuales son históricos. Tabla 1.

Tabla 1. Factores de Entrada y sus niveles

Diseño Experimental Final			
Ind. Var.	Factor Description	High Level	Low Level
X1	Inventory in Process	1500 pcs.	1200 pcs.
X2	Batch Size	3000 pcs.	2400 pcs.
X3	Product Mix	20 pcs.	14 pcs.
X4	Processing Time Station 1	U(154.45,90.60)	U(46.20, 24.10)
X5	Processing Time Station 3	U(238,124)	U(100.10,70.83)
X6	Montaje de Radiador (Tiempo de Paro)	90 min	30 min
X7	Montaje de Portería (Tiempo de Paro)	95 min	25 min
X8	Desperdicios Ensamble de tanques (Retrabajos)	5%	1%
X9	Capacidad Instalada	3 turnos x 8 horas.	1 turno x 8 horas.

Fuente: elaboración propia

Para esta investigación fue necesario utilizar replicas las cuales se define como: “El número de veces que se observa la respuesta en cada combinación de los niveles experimentales a considerar”. Los niveles experimentales para esta investigación se definieron con las 9 variables independientes y sus 2 niveles (2^9), dando un total de 512 combinaciones y con 5 réplicas cada combinación dando un total de 2560 réplicas finales.

Las hipótesis estadísticas que se desean comprobar son de comparación de betas (β 's), donde se indica el grado de asociación con que una variable independiente: Capacidad Instalada, Inventario en Proceso, Tamaño de Lote, Takt Time, Mezcla de Productos, Tiempo de Ciclo, Tiempos de Operación, Cuellos de Botella, Tiempos de Paro y Generación de Desperdicios impacta a las variables dependiente: unidades terminadas (Y1); tiempo de finalización el cual es el tiempo que le toma al chasis ingresar desde la primera estación de ensamble hasta la última (Y2), y el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3).

4. RESULTADOS

Al obtener los resultados de las réplicas del modelo de simulación se procedió a realizar los modelos de regresión multivariable, para estudiar la relación entre las variables independientes con la variable dependiente y determinar cuáles son de mayor impacto. Para el desarrollo de los modelos se utilizó el software SPSS con el método stepwise o pasos sucesivos. Para la construcción de los modelos se utilizaron los datos obtenidos de la simulación como factores principales. Para cada variable dependiente se definió el siguiente modelo como:

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

Una vez generados los diversos resultados que arrojó el programa, 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 fuera menor a 15. En la tabla 2 se muestra un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 2. Resumen de datos

Var Dep.	F	Sig.	R ²	Número de modelos	Índice de Condición
Y1	24445.79	0.00%	85%	6	9.123
Y2	829.87	0.00%	62%	5	6.640
Y3	234.58	0.00%	27%	4	5.449

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se generaron los coeficientes Beta (β), que se presentan en la Tabla 3,4 y 5 respectivamente para Y1, Y2, Y3. Los

coeficientes estandarizados en estas tablas fueron ordenados de mayor a menor.

Tabla 3. Coeficientes de β SPSS para Y1

Var.	Coeficientes no están		Coeficientes están	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error tip	Beta			Tolerancia	FIV
(Cons.)	14.68	.30		47.80	.00		
capinst	17.29	.19	.76	91.08	.00	.83	1.20
mezcl	8.67	.20	.38	41.56	.00	.68	1.45
takt	-.09	.00	-.20	-19.94	.00	.55	1.79
ciclo	-.00	.00	-.13	-15.58	.00	.76	1.30
invpro	.01	.00	.03	3.83	.00	.81	1.22
tamalot	.40	.18	.01	2.21	.02	.88	1.12

Fuente: Elaboración propia
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

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: Capacidad Instalada, Mezcla de Productos y Takt time y las

que tuvieron menor impacto fueron: Tiempo de Ciclo, Inventario en Proceso Tamaño de Lote, todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo.

Tabla 4. Coeficientes de β SPSS para Y2

Var.	Coeficientes no están		Coeficientes están	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error tip	Beta			Tolerancia	FIV
(Cons.)	253.14	15.73		16.09	.00		
paro	.01	.00	.51	40.80	.00	.92	1.08
cuello	.43	.02	.34	22.44	.00	.63	1.58
takt	3.16	.30	.15	10.40	.00	.68	1.47
capins	-109.68	14.20	-.10	-7.72	.00	.74	1.34
tamaño	56.81	12.31	.05	4.61	.00	.99	1.00

Fuente: Elaboración propia
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Para el modelo de la variable dependiente Tiempo de Finalización (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: Tiempo de Paro, Cuello de Botella y Takt Time y las que

tuvieron menor impacto fueron: Capacidad Instalada y Tamaño de Lote todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo.

Tabla 5. Coeficientes de β SPSS para Y3

Var.	Coef. no están.		Coef. estan	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Cons)	-61.11	4.62		-13.22	.00		
cuello	-.15	.00	-.56	-29.54	.00	.78	1.27
capinst	66.50	3.88	.30	17.10	.00	.89	1.11
paro	-.00	.00	-.17	-9.77	.00	.91	1.08
mezcla	29.82	3.81	.13	7.82	.00	.92	1.07

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

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: Cuellos de Botella y Capacidad Instalada y las que tuvieron menor impacto son: Tiempo de Paro y Mezcla de Productos, todas estas variables tuvieron un P-valor menor a 5%, lo cual permite señalar que son lo suficientemente explicativas para el modelo. A continuación se presentan los modelos de regresión multivariable:

Modelo para Piezas Terminadas (Y1)

$$14.68 + 17.29\text{capinst} + 8.67\text{mezcla} - 0.09\text{takt} - 0.00\text{tiemciclo} + 0.01\text{invproc} + 0.40\text{tamalot}$$

Modelo para Tiempo de Finalización (Y2)

$$253.14 + 0.10\text{paro} + 0.43\text{cuello} + 3.16\text{takt} - 109.68\text{capinst} + 56.81\text{tam}$$

Modelo para Porcentaje de Utilización (Y3)

$$-61.11 - 0.15\text{cuello} + 66.50\text{capinst} - 0.00\text{paro} + 29.82\text{mezcla}$$

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación es proponer un modelo que optimice la secuenciación de la producción de las líneas de ensamble de camiones pesados, así como también cuáles son las variables que tienen un mayor impacto. Siendo este objetivo cumplido mediante el desarrollo del modelo de simulación y los modelos de regresión multivariable.

La metodología que se utilizó para el desarrollo de esta investigación fue un modelo de simulación por computadora del proceso productivo del ensamble de camiones pesado, así como los modelos de regresión multivariable. En este diseño experimental se utilizaron tres variables de respuesta relevantes que se encuentran muy frecuentes en el sector de manufacturero; piezas terminadas (Y1), tiempo de finalización (Y2) y porcentaje de utilización (Y3). En cuanto al conjunto de variables independientes (X1...X9), que se modelaron en esta investigación con datos históricos proporcionados por una empresa de ensamble de camiones pesados ubicada en el área metropolitana de Monterrey. Se construyeron distribuciones específicas utilizando un año de datos. Algunos de esos datos se basaron en distribuciones normales y uniformes.

La experimentación fue un diseño factorial simple con valores alto y bajo, para medir los factores (X1...X9). Para cada combinación de factores (9) se aplicaron cinco réplicas con una muestra de 2560 réplicas.

Los modelos de regresión lineal multivariable cumplen con los supuestos de no tener datos con multicolinealidad. De acuerdo a Belsley et al (1980) desarrollo un indicador denominado el índice de condición, el cual mide la sensibilidad de las estimaciones mínimas cuadráticas ante pequeños cambios en los datos y hace mención que si los datos observados tanto simulados muestran un índice de condición entre los rangos veinte y treinta. Estos presentan un grave problema de multicolinealidad. En esta investigación este indicador fue menor a quince, por lo tanto no existe el problema de la multicolinealidad.

Con el modelo de regresión multivariable, se pudieron confirmar o rechazar las variables independientes, que afectan a la

dependiente.

Pudiendo concluir lo siguiente:

Para el modelo **piezas terminadas (Y1)**, la capacidad instalada, se puede concluir que fue una variable con un efecto positivo y significativo, se puede concluir que entre mayor capacidad instalada será mayor la cantidad de piezas terminadas. Esta hipótesis fue reforzada por los autores Parello et al (1986), Ulgen et al (1998).

En las hipótesis relacionadas con la mezcla de productos, entre mayor mezcla de productos, mayor la cantidad de piezas terminadas. Los autores: Valero, H.M. et al (2011), Tiacci, L. et al (2007), refuerzan esta hipótesis. Por lo tanto se acepta.

Con respecto a la hipótesis relacionada con el inventario en proceso, 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), Krystek 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 (2001), 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 si es aceptada.

Para la hipótesis del tiempo takt time, fue una variable con efecto negativo y significativa, ya que el tener un menor tiempo takt de producción, las piezas terminadas disminuyen, esto es validado por los autores: Barra et al (2007), Duannmu et al. (2007), Chase et. al (2010), quienes resaltan que al no contar con un ritmo constante en el tiempo takt no se podría cumplir con los planes de producción establecidos.

Para la hipótesis tiempo de ciclo, fue una variable de efecto negativo y significativa, ya que

el tener un menor tiempo de ciclo, las piezas terminadas de disminuyen. Esto fue reforzado por los autores: Parello et al (1986), Carro Paz et al (2005), Wirabhuaana et al (2008).

Para este modelo no se pudieron comprobar las variables: cuellos de botella, retrabajo, tiempo de paro y tiempo de operación.

En el modelo de la variable dependiente **tiempo de terminación (Y2)**. La variable tiempo de paro, la hipótesis a comprobar es que al tener un mayor tiempo de paro, tendría un tiempo de finalización de la producción mayor. Los autores Focacci et al. (2000), Artigues et al (2004), confirman esta teoría por lo tanto se acepta.

Para la variable cuello de botella, la hipótesis a comprobar es si a mayor cuello de botella, mayor tiempo de finalización. Esta hipótesis fue comprobada y reforzada por los estudios de Ülgen et al (1995,1998), Ismail et al (2002), Duannmu et al (2007).

La variable capacidad instalada, la hipótesis a comprobar es si a mayor capacidad instalada, menor tiempo de finalización. Esta hipótesis fue comprobada y reforzada por los estudios de Parello et al (1986), Ülgen et al (1998).

Para la variable tamaño de lote, 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.

Para el caso de la variable independiente **porcentaje de utilización (Y3)**, la variable capacidad instalada, a mayor capacidad instalada, mayor porcentaje de utilización, se comprobó la hipótesis y se reforzó con los estudios de Parello et al (1986), Ülgen et al (1998).

En la hipótesis a comprobar de mezcla de productos 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. (2011), 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 variable cuello de botella, se comprobó que al tener un mayor cuello de botella un menor tiempo de utilización, la hipótesis si fue comprobada y reforzada por los autores: Ülgen et al (1998), Ismail et al. (2002), Wirabhuanna et al (2008).

En la hipótesis del tiempo de paro de comprobó que a mayor tiempo de paro, menor porcentaje de operación fue aceptada y validada por los estudios de Focacci et al (2000), Artigues et al (2004).

Se muestra en resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas para cada variable dependiente. Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de hipótesis aceptadas y rechazadas

Descripción	Y1	Y2	Y3
Inventario en proceso (X1)	✓		
Tamaño de Lote (X2)	✓	✓	
Takt time (X3)	✓	✓	
Mezcla (X4)	✓		✓
Cuello de Botella (X5)		✓	✓
Retrabajo (X6)			
Tiempo de Paro (X7)		✓	✓
Capacidad Instalada (X8)	✓	✓	✓
Tiempo de Ciclo (X9)	✓		
Tiempo de Operación (X10)			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

En los modelos presentados llama la atención que las variables independientes retrabajo y tiempo de operación no aparecieron en ninguno de los modelos presentados.

Para el modelo de la variable dependiente porcentaje de utilización (Y3), resulto ser un

modelo significativo de acuerdo a la regresión pero obtuvo una R^2 de 27% por lo tanto la variables que se utilizaron no afectan el resultado para la Y3 para estudios futuros se recomienda utilizar otras variables, ya que desde la prueba piloto no se obtuvieron los resultados esperados.

Este modelo se puede utilizar en otras empresas manufactureras de la región o incluso en la industria automotriz en el segmento de ligeros.

El uso de la simulación por computadora ayudo a generar la información de manera casi inmediata, esto sin afectar el sistema real.

Los modelos presentados demostraron ser significativos, se utilizaron los datos de una sola empresa. Para futuras investigaciones se recomienda la integración de información de otras empresas, así como también agregar otras variables que afectan a la secuenciación.

REFERENCIAS

- Aguirre, A., Müller, E., Seffino, S., & Méndez, C. (2008). *Applying Simulation-Based Tool to Productivity Management*. Winter Conference, 19(1), 1838-1846.
- Artigues, C., Belmokhtar, S., & Feillet, D. (2004). *A New Exact Solution Algorithm for the Job Shop Problem with Sequence-Dependent Setup Times*. Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming For Combinatorial Optimization Problems, 37-49.
- Barra, M. J., & Ferreira, A. (2007). *Application of design of experiments on the simulation*. Winter Simulation. Conference Washington D.C. 1601-1609.
- Belsley, D.A., Kuh, E. Welsch, R.E. (1980). *Regression Diagnostic: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bertoncello, R., Iuso, Romina (2016). *Turismo urbano en contexto metropolitano*. Revista Colombiana de Geografía, 25(2):107.
- Burbano, J.F. (2011). *Optimización del Tamaño de Lote de Producción Ajustado Por la Trazabilidad*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Valle Santiago de Cali.
- Carro, R. & González, D. (2005). *Administración de Operaciones*. Buenos Aires: Universidad Mar del Plata.
- Chase, R. B., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2010). *Administración de operaciones*. México: McGraw-Hill.
- Drexl, A. & Kimms, A. (2001). *Sequencing JIT Mixed- Model Assembly Lines Under Station-Load and Part - Usage Constraints*. Management Science. 47(3), 480-491.
- Duanmu, J. & Taaffe, K.. (2007). *Measuring Manufacturing Throughput Using Takt Time Analysis and Simulation*. Proceedings - Winter Simulation Conference. 1633-1640.
- Focacci, F., Laborie, P., & Nuijten, W. (2000). *Solving Scheduling Problems with Setup Times and Alternative Resources*. AIPS 2000 Proceedings, 92-101.
- Goldratt, E.M., Cox, Jeff (1986). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. National Productivity Institute. North River Press.
- Graham, R. (1966). *Bounds for Certain Multiprocessing Anomalies*. The Bell System Technical Journal. 45(9), 1563-1581.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consultado 17-03-2017 en <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/>
- Ismail, N., Tai, S., & 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.
- Jara, L. (2015). *Manual Técnico*. Obtenido de <http://www.observatorio.unr.edu.ar/utilizacion-de-la-capacidad-instalada-en-la-industria-2/>
- Krajewski, L., Ritzman, L. & 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.
- Mastrolilli, M., Gambardella, L.M. (1998). *Effective Neighborhood Functions for the Flexicle Job Shop Problem*. Technical Report. 45-98.
- Ministerio de ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Consultado en 17-03-2017 en <https://www.argentina.gob.ar/ciencia>

- Mucientes, M., Vida, J., Bugarin, A., & Manuel, L. (2008). *Processing times estimation in a manufacturing industry through. 3rd International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems*. 95-100. Germany.
- Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA). Consultado 17-03-2017 en <http://www.oica.net/>
- Parello, B., Kabat, W. & 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.
- Solnon, C., Cung, V., & 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.
- Tiacci, L. & Saetta, S. (2007). *Process-oriented simulation for mixed-model assembly lines*. 2. 1250-1257.
- Trakultongchai, A., Supsomboon, S., & Limtanyakul, K. (2013). *Process Simulation and Improvement of Automotive Paint Shop*. *International Journal of Mining Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME)*. 1(1), 1-4
- Ülgen, O., Gunal, A. (1998). *Simulation in the Automotive Industry*. In: Banks, J. (ed.) *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 547–570. John Wiley & Sons, Incorporated, New York.
- Ülgen, O., Upendram, S. S. (1995). *Productivity simulation in the automotive industry*. University of Michigan and Production Modeling Corporation. 1(1), 1-6.
- Valero-Herrero, M., Garcia-Sabater, J. & 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. & Imtihan, M. (2008). *Simulation and Re-Engineering of Truck Assembly Line. Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*. 783-787. Kuala Lumpurpp.