

PROYECTO FÁBRICA INTELIGENTE

Felipe Gómez Espinal

Juan José Castrillón Correa

Fgomeze1@eafit.edu.co
Universidad EAFIT
Medellín, Antioquia, Colombia

Jjcastrilc@eafit.edu.co
Universidad EAFIT
Medellín, Antioquia, Colombia

ABSTRACT

La Fabrica Inteligente de la Universidad EAFIT presenta un caso de estudio de una fábrica de producción basada principalmente en el ensamble de productos. El propósito de este proyecto es observar detalladamente la producción ya que desde que se empezaron a recolectar los datos aproximadamente en el 2020, se hallaron fluctuaciones en la producción y los tiempos de espera en cola. Para abordar este problema, se optó por una simulación de eventos discretos, ya que se adapta mejor a la naturaleza del proceso de fabricación. Este estudio busca optimizar la eficiencia de la fábrica y reducir los tiempos en cola. La simulación se basa en la distribución de puestos de trabajo, la gestión de la materia prima y el proceso de ensamblaje. Se modelaron 7 puestos de trabajo y un recurso que en este caso es el supervisor de la fábrica. Con la implementación de esta simulación en la plataforma Simul8, se espera mejorar la operación de la fábrica, aumentar la producción y disminuir los tiempos en cola teniendo en cuenta el costo que le puede traer la contratación de más empleados/supervisores a la universidad.

1. INTRODUCCIÓN

La denominada fábrica inteligente ubicada en el bloque 15 de la Universidad EAFIT, presenta una necesidad de modelamiento, simulación y optimización de su funcionamiento. Por su naturaleza, permite realizar un estudio completo con una simulación de eventos discretos que facilitara el análisis de los resultados obtenidos y posiblemente mejorara en varios aspectos la forma de manejar la fábrica y el funcionamiento interno de la misma. La creación de esta fábrica se dio en un entorno donde mejoraría la enseñanza y la adaptación con el ambiente laboral, principalmente para los estudiantes de ingeniería de procesos, pero en el montaje el estudio que se hizo para optimizar el funcionamiento de la misma fue mínimo, por lo que dejo evidentes problemas que se pueden solucionar realizando principalmente una simulación de eventos discretos.

2. MODELAMIENTO CONCEPTUAL

2.1. Definición del Problema

La fábrica inteligente es un espacio de aprendizaje donde estudiantes de la Universidad pueden vivir de una manera muy real como es el funcionamiento de una fábrica de producción antes de salir al mundo laboral. Esta presenta un gran apoyo de formación para los estudiantes y profesores por la facilidad a la hora de utilizarla y el tamaño que permite un buen funcionamiento así no se disponga de mucho personal. La fábrica consta de 7 puestos de producción con diferentes herramientas que son operadas por personas (normalmente estudiantes). Estos puestos forman una línea de producción donde se ensamblan diferentes tipos piezas para crear un producto final. Los puestos se encuentran conectados por rieles con bandejas automáticas que sirven para llevar el producto en construcción de un puesto al otro. La fábrica inteligente cuenta con personal capacitado para rellenar las estaciones de materia prima, transportar las piezas defectuosas a reiniciar el proceso de producción y también está disponible ante cualquier inconveniente. Se reportan datos de funcionamiento desde el 2020 donde en algunas ocasiones se evidencia una disminución en la producción y en los tiempos de espera en cola para cada puesto. Por este motivo se decidió realizar un modelamiento y simulación de la fábrica para disminuir los tiempos en cola y aumentar la producción final.

El funcionamiento irregular de la fábrica se puede producir por una variedad de factores que afectan todo el proceso ya sea de manera directa o indirecta, también cada factor de manera individual o conjunta. Es debido a esto que se encuentra como necesario implementar esta simulación de eventos discretos donde se considera como acertado a la elección de este tipo de simulación ya que la fabricación de un producto, el ensamble del mismo, o los tiempos en cola se puede representar por medio de eventos discretos, dejando así, a un lado, la posibilidad de una mejor simulación con otro tipo de eventos como es el caso de eventos continuos, la cual no concordaría con la naturaleza misma de la fábrica.

En la imagen 1 se puede observar la distribución de la fábrica donde se ven los puestos de trabajo (MQ), el punto de reserva de materia prima (Bodega Material) y como se realizaría el ensamble de un producto siguiendo la línea de producción. Como se mencionó anteriormente, cada puesto de trabajo tiene una persona controlando su funcionamiento. El supervisor es el encargado de llevar la materia prima a cada uno de los puestos de trabajo e igualmente es el encargado de retornar productos defectuosos para volver a comenzar el proceso de producción. En la fábrica suelen utilizar un solo supervisor y 7 otras personas (estudiantes/personal capacitado), una en cada puesto de trabajo.

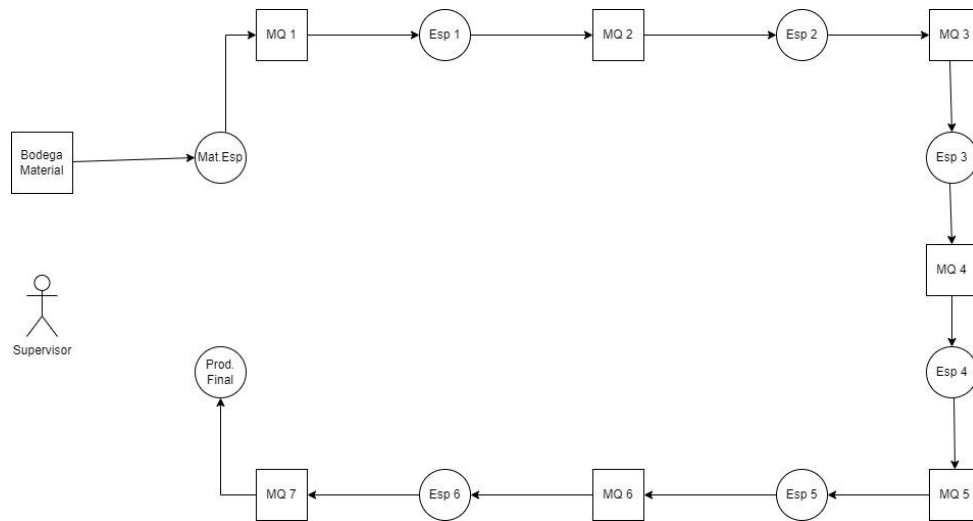


Imagen 1: Diagrama de Flujo Fábrica Inteligente

Para la ejecución de este modelo no se presentaron requisitos ni restricciones por parte de los encargados de la fábrica lo que deja un amplio camino para la implementación, el análisis, la optimización y otras técnicas que se comentaran a lo largo del informe. Dicho esto, se implementarán todas las técnicas y análisis sobre todas las variables que puedan llevar a una conclusión acertada del modo de funcionamiento de la fábrica, sus falencias y aspectos a mejorar.

2.2. Objetivos de la modelación

El modelo de simulación implementado permite recrear el cómo son los procesos internos de la fábrica para así realizar cambios en diferentes factores que permitan evidenciar mejoría en la producción o disminución en los tiempos de espera en cola. Así, se podrá garantizar un mejor funcionamiento de la misma ya sea para usos educativos o laborales.

Los objetivos específicos del modelo son:

- Incrementar la producción en un 5%.
- Reducir el tiempo en cola a menos de 50 segundos para cada producto en cada una de las estaciones de ensamble.

La tabla 1 muestra los objetivos generales del proyecto.

Tiempo-escala	Un día de trabajo el cual consta de tres horas con corridas realizadas en segundos.
Flexibilidad	Limitada (es poco probable que se produzcan cambios importantes)
Ejecución-velocidad	Muchos experimentos por ejecutar

Visualización	Simple 2D
Facilidad de uso	Lo sabe usar el modelador y fácil de explicar a quienes tienen conocimientos básicos del tema y del software.

Tabla 1: Objetivos Generales del Proyecto

2.3. Entradas y Salidas del Modelo

Entradas/Factores Experimentales

- Los supervisores disponibles (número total de supervisores en cada día de trabajo), variando en un rango de 1 a 3.
- Número de puestos de ensamble, el único puesto que se replica es el primero y varia en un rango de 1-3.

Salidas del modelo/Respuestas del modelo (para determinar el logro de los objetivos)

- Porcentaje de productos en cola durante menos de 50 segundos en cada puesto de trabajo.
- Número total de productos terminados.
- Número total de productos defectuosos.
- Porcentaje de utilización de los auxiliares.

Salidas del modelo/Respuestas del modelo (para determinar las razones del incumplimiento de los objetivos)

- Gráfico de barras de tiempo de espera de cada producto en las colas, media, desviación estándar, mínimo y máximo.
- Serie de tiempo del tamaño medio de cola por hora.
- Utilización del personal (porcentaje acumulado).

2.4. Contenido del Modelo

Componente	Incluir/Excluir	Justificación
Entidades:		

Productos	Incluir	Regula el buen funcionamiento de la fábrica.
Actividades:		
Puntos de servicio	Incluir	Flujo de productos por los puntos de servicio
Transporte Productos	Incluir	Flujo de productos por los puntos de servicio
Colas:		
Colas puntos de servicio	Incluir	Requerido para los tiempos de espera y tamaño de colas
Colas Material	Incluir	Requerido en el modelo para flujo de actividades (puntos de servicio).
Transporte Producto	Incluir	Requerido para los tiempos de espera y tamaño de colas
Recursos:		
Supervisor	Incluir	Provee productos para los puntos de servicio
Trabajadores	Excluir	Simplificación: Representados por los puntos de servicio.

Tabla 2: Alcance del modelo

Componente	Detalle	Incluir/Excluir	Justificación
Entidades:			
Productos	Cantidad: 1 producto representa 7 ensambles	Incluir	Simplificación: Se elimina la necesidad de modelar los cientos de piezas que un producto necesita en cada estación
	Patrón de llegada: se elige el mismo producto para todo el día	Excluir	Los productos son muy similares
	Atributos: cada producto necesita 7 piezas para ser ensamblado.	Incluir	Cada estación representa una pieza para el producto final.

	Ruteo: cola más corta	Incluir	Impacta el tiempo de espera y el tamaño de la cola
--	-----------------------	---------	--

Componente	Detalle	Incluir/Excluir	Justificación
Actividades:			
Puntos de servicio	Cantidad: Disponibles en cada hora del día	Excluir	Siempre disponible
	Naturaleza (X in Y out)	Incluir	2 entran 1 sale representado por materia prima y producto a ensamblar y sale producto ensamblado.
	Ciclo de tiempo	Incluir	Día de trabajo de 3 horas
	Breakdown/reparo	Excluir	Asumir sin falencias
	Set-up/cambios	Excluir	n/a
	Recursos	Incluir	Requiere al supervisor cuando se acaba la materia prima
	Turnos	Excluir	Asumir sin descansos
	Ruteo	Incluir	Llega a la actividad como producto en proceso y puede salir como producto terminado, producto en proceso o producto defectuoso y sale a transporte.

Transporte Productos	Cantidad: Numero de disponible cada hora del día	Excluir	Siempre disponible
	Naturaleza (X in Y out)	Incluir	Simple 1 entra 1 sale
	Ciclo de tiempo	Incluir	Dia de trabajo de 3 horas
	Breakdown/repares	Excluir	Asumir sin falencias
	Set-up/cambios	Excluir	n/a
	Recursos	Incluir	Requiere el recurso para el transporte del producto
	Turnos	Excluir	Asumir sin descansos
	Ruteo	Incluir	De cualquier punto de servicio a el primer puesto de trabajo.

Componente	Detalle	Incluir/Excluir	Justificación
Colas:			
Colas puntos de servicio	Cantidad: una por punto de servicio.	Incluir	Necesario para poner en cola las respuestas
	Capacidad: ilimitada.	Excluir	Simplificación: no hay límite de productos en cola
	Tiempo de permanencia	Excluir	n/a
	Diciplina de la cola: FIFO	Incluir	Simplificación: sin empujones en las colas y sin evasiones, empujones o salir de las colas.
	Breakdown/reparo	Excluir	n/a
	Ruteo: a punto de servicio	Incluir	Flujo de entidades por el sistema

Colas Material	Cantidad: una por punto de servicio.	Incluir	Necesario para poner en cola las respuestas
	Capacidad: ilimitada.	Excluir	Simplificación: no hay límite de productos en cola
	Tiempo de permanencia	Excluir	n/a
	Diciplina de la cola: FIFO	Incluir	Simplificación: sin empujones en las colas y sin evasiones, empujones o salir de las colas.
	Breakdown/reparo	Excluir	n/a
	Ruteo: a punto de servicio	Incluir	Flujo de entidades por el sistema
Colas Transporte Producto	Cantidad: una por supervisor.	Incluir	Necesario para poner en cola las respuestas
	Capacidad: ilimitada.	Excluir	Simplificación: no hay límite de productos en cola
	Tiempo de permanencia	Excluir	n/a
	Diciplina de la cola: FIFO	Incluir	Simplificación: sin empujones en las colas y sin evasiones, empujones o salida de las colas.
	Breakdown/reparo	Excluir	n/a
	Ruteo: a punto de servicio	Excluir	Flujo de entidades por el sistema

Tabla 3: Nivel de detalle del modelo.

Los supuestos que se tienen en el modelamiento del la fábrica son:

- La fábrica dispone de material ilimitado.
- No hay descomposiciones o fallas de los puntos de trabajo, trabajadores y supervisores.
- Solo se tienen 3 productos, es decir, los productos casi siempre son los mismos.

Ademas, las simplificaciones que se incluyeron en el modelo son:

- Los puestos para ensamble son representados por puntos de servicio.
- Un producto en proceso representa un grupo de piezas en cada estación.
- Cada producto necesita 7 de estas piezas.
- No hay tiempo de transporte entre los puestos de trabajo.
- No se tienen en cuenta los tiempos de micro-paros.

3. ANTECEDENTES

DISEÑO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS, PARA LA MEJORA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE TEJIDO INDUSTRIAL SECCION C, EN LA EMPRESA GUANTES INTERNACIONALES

Este proyecto de simulación de eventos discretos realizado por el Ingeniero “FELIPE GARCÍA JACOBO” presenta un modelo formulado y ejecutado para la optimización en un 3% de la producción mensual de la empresa. Se realizó un modelo en el software de simulación (FlexSim) para la obtención de sus respectivos resultados. Además de una buena implementación de los datos se hizo un análisis completo y detallado de los mismos. Los resultados obtenidos luego de realizar la simulación fueron la elección de 4 posibles distribuciones de las máquinas y procesos de la fábrica para así poder aumentar la producción mensual en más de un 3% garantizando así el cumplimiento de los objetivos planteados en el inicio del proyecto.

Este artículo posee un aporte en diferentes áreas de conocimiento que pueden ser útiles para el desarrollo del proyecto en la fábrica inteligente de la universidad EAFIT. Como primer aspecto relevante se destaca la experiencia exitosa que ya otros han tenido en sus investigaciones, mostrando así que la simulación de eventos discretos puede generar mejoras tangibles en la eficiencia de la producción. Por otra parte, el uso de software de simulación (en este caso, FlexSim) es relevante para este proyecto, ya que al usar el software Simul8 se puede llegar a comparar y compartir la experiencia sobre la elección y utilización de las diferentes herramientas de simulación.

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN BASADO EN EVENTOS DISCRETOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UNA LÍNEA PRODUCTIVA

El proyecto integrador tiene como objetivo principal implementar una herramienta de modelado y simulación de eventos discretos en una línea productiva de implantes traumatológicos. El propósito de esta implementación es identificar el cuello de botella en el sistema y proponer soluciones para mejorarlo. El proyecto se basa en una serie de teorías y metodologías, incluyendo la teoría de proyectos de simulación de eventos discretos, la Teoría General de Sistemas y la Teoría de las Restricciones. El enfoque del proyecto comienza con la utilización de la teoría de proyectos de simulación de eventos discretos para guiar las actividades necesarias para llevar a cabo una simulación que refleje con precisión la realidad de la línea productiva de implantes traumatológicos. Para comprender adecuadamente el sistema en estudio, se emplea la Teoría General de Sistemas, lo que ayuda a definir y comprender los alcances y límites del sistema en cuestión. Una vez que se ha formulado el modelo de simulación utilizando el software ExtendSim, se recopila información relevante del funcionamiento del sistema a partir de las ejecuciones de la simulación. Esta información se somete a diversos métodos de detección de cuellos de botella, lo que permite identificar los puntos más críticos en la línea productiva. La Teoría de las Restricciones se utiliza para destacar estos cuellos de botella y guiar la toma de decisiones para mejorar la capacidad y la productividad de la empresa. En última instancia, el proyecto propone la implementación de herramientas de sistemas esbeltos para superar las restricciones identificadas y fomentar un proceso de mejora continua dentro de la organización. Este enfoque integral y basado en teorías sólidas busca no solo identificar problemas en la producción de implantes traumatológicos, sino también proponer soluciones efectivas para optimizar la capacidad y la eficiencia de la compañía.

Este artículo posee el uso de la Teoría de las Restricciones y otras metodologías que pueden dar ideas sobre cómo abordar problemas en la producción de manera sistemática y posiblemente en algún punto ser aplicables en el proyecto de la fábrica inteligente. El proyecto relacionado puede ser relevante para este proyecto en términos de la búsqueda de una mejora continua y posible ampliación en la fábrica inteligente de EAFIT. Esto implica identificar y superar obstáculos en la producción de manera constante.

4. DATOS DEL MODELO

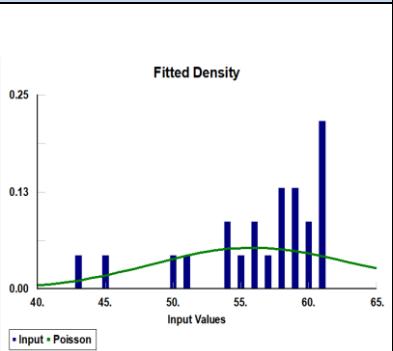
La fábrica proporciona datos acerca del puesto de trabajo, el producto fabricado, la fecha inicial y final de funcionamiento, el tiempo total que se trabajó en la estación con un producto, el tiempo de micro-paros y la cantidad de piezas ensambladas en un tiempo total. La imagen 2 muestra un ejemplo de cómo se muestran los datos.

MAQUINA	PRODUCTO	Fecha Hora Inicio	Fecha Hora Fin	Hora	Minutos	TiempoMicroparos	Cantidad
MQ-01	X2XX2F	2023-01-25 18:54:42.853	2023-01-25 19:56:46.953	18	62	0	3152

Imagen 2: Datos proporcionados por la fábrica

Al observar que existen cientos de diferentes tipos de productos y además que no tienen información de producción para todas las estaciones, se decidió filtrar y reducir el tamaño de la muestra. Para esto, se seleccionaron tres diferentes productos que tuvieran suficiente información con el fin de poder realizar las pruebas estadísticas que permitieran visualizar la naturaleza en el comportamiento de los datos. Así, se pudo implementar fácilmente un modelo que sigue las distribuciones reales de los datos de la manera más adecuada posible.

El primer análisis que se realizó fue determinar la distribución que seguían las máquinas en la fabricación de los productos. Se partió del supuesto de que las estaciones siguen una distribución exponencial en el ensamble de las piezas. Para esto se encontró la cantidad de piezas que se producían cada 60 segundos en cada una de las estaciones para los tres diferentes tipos de productos. Como era de esperarse, estos seguían una distribución Poisson que se pudo encontrar usando la herramienta Stat-Fit de Simul 8.

Nombre de la variable	Tamaño de la muestra	Distribución de probabilidad que mejor se ajusta	Estadístico y Valor-P	Parámetros	Estadísticas descriptivas	Histograma																						
Producción por unidad de tiempo para el producto X24XF005	23	Poisson	Kolmogóro v-Smirnov V-P: 0.108 Chi Squared V-P: 0.304	$\lambda = 56.39$	<div>descriptive statistics</div> <table><tr><td>data points</td><td>23</td></tr><tr><td>minimum</td><td>43</td></tr><tr><td>maximum</td><td>61</td></tr><tr><td>mean</td><td>56.3913</td></tr><tr><td>median</td><td>58</td></tr><tr><td>mode</td><td>61</td></tr><tr><td>standard deviation</td><td>5.01579</td></tr><tr><td>variance</td><td>25.1581</td></tr><tr><td>coefficient of variation</td><td>8.89461</td></tr><tr><td>skewness</td><td>-1.45109</td></tr><tr><td>kurtosis</td><td>1.22136</td></tr></table>	data points	23	minimum	43	maximum	61	mean	56.3913	median	58	mode	61	standard deviation	5.01579	variance	25.1581	coefficient of variation	8.89461	skewness	-1.45109	kurtosis	1.22136	<div>Fitted Density</div> 
data points	23																											
minimum	43																											
maximum	61																											
mean	56.3913																											
median	58																											
mode	61																											
standard deviation	5.01579																											
variance	25.1581																											
coefficient of variation	8.89461																											
skewness	-1.45109																											
kurtosis	1.22136																											

Producción por unidad de tiempo para el producto X24X5F007	28	Poisson	Kolmogórov-Smirnov V-P: 0.417 Chi Squared V-P: 0.459	$\lambda = 52.14$	<div>descriptive statistics</div> <div> data points28 minimum44 maximum60 mean52.1429 median52.5 mode52 standard deviation4.05256 variance16.4233 coefficient of variation7.77204 skewness-0.417173 kurtosis-0.354989 </div>	
Producción por unidad de tiempo para el producto X7X804B	24	Poisson	Kolmogórov-Smirnov V-P: 0.0207 Chi Squared V-P: 0.30		<div>descriptive statistics</div> <div> data points24 minimum29 maximum36 mean33.5833 median34 mode36 standard deviation2.20507 variance4.86232 coefficient of variation6.56596 skewness-0.639116 kurtosis-0.900044 </div>	

Tabla 4: Análisis Datos de Entrada

Luego de realizar los diferentes análisis para los datos de entrada se comprobó que la distribución que siguen los datos es una Poisson con una lambda diferente para cada tipo de producto, adicionalmente se realizaron las pruebas de bondad de ajuste chi-cuadrado y Kolmogórov-Smirnov donde se comprobó que los datos si provienen de una distribución real. Se puede observar en los resultados que no se rechaza el supuesto H_0 : Los datos provienen de una distribución real para las primeras dos variables. Para la tercera variable se rechazó este supuesto con la prueba de Kolmogórov-Smirnov, pero no se rechaza con la prueba Chi-Cuadrado. Este comportamiento se explica por la necesidad de aplicar un proceso de filtrado a los datos, ya que se identificaron una cantidad significativa de datos incorrectos o irrelevantes que estaban perjudicando la integridad del modelo. En consecuencia, era previsible que se produjeran discrepancias en los resultados en algún momento del análisis debido a la presencia de información no válida en el conjunto de datos.

Posterior a esto, se realizaron los diagramas de dispersión y de autocorrelación de los datos para poder comprobar la dependencia o independencia de los mismos y así poder generar datos aleatorios a partir de las distribuciones ya obtenidas. También sirve para simplificar los análisis ya que con datos dependientes la complejidad del modelo aumenta en gran medida y es necesario un conjunto de datos independientes para poder realizar las diferentes pruebas estadísticas y obtener resultados acordes y consistentes.

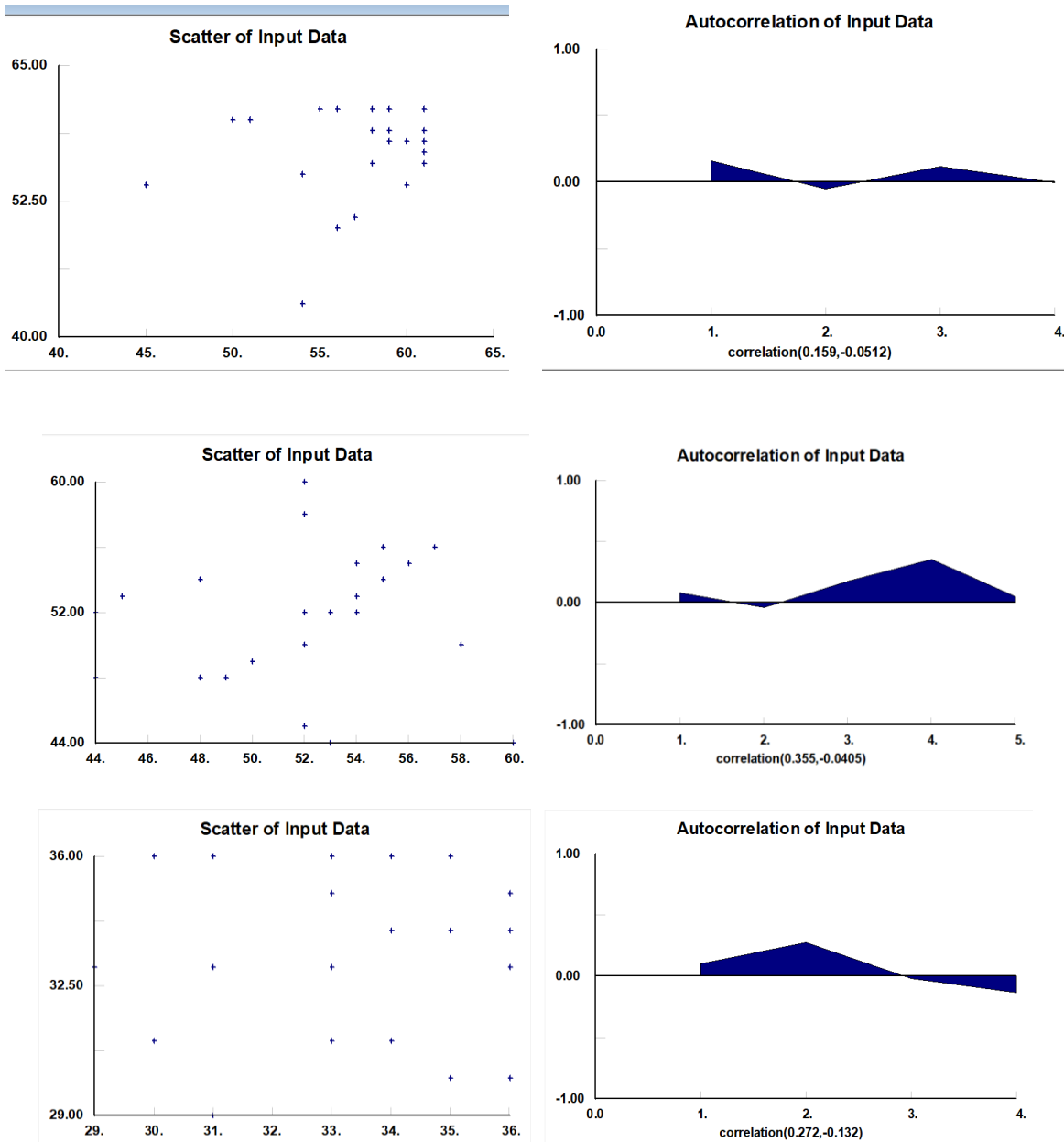


Imagen 3: Independencia de los datos

Luego de observar las gráficas podemos confirmar que los datos son independientes debido a su baja correlación y alta dispersión. Se concluye que los datos están listos para ser utilizados y analizados en el modelo a través de las diferentes pruebas estadísticas.

Finalmente, se realizó una prueba de homogeneidad entre los tiempos de funcionamiento y los tipos de productos para comprobar si estos influyen en los tiempos de producción. El mismo proceso se siguió para analizar si el tipo de máquina influyó en el tiempo de producción. Este análisis es indispensable para identificar que datos siguen la misma distribución, que datos se pueden modelar por aparte y principalmente para analizar si hay más de un conjunto de datos en la muestra. Si se identifica que hay más de un conjunto de datos en la muestra se debe filtrar los datos y verificar la homogeneidad de los

misimos para garantizar que las distribuciones obtenidas si sean las adecuadas para implementar el modelo.

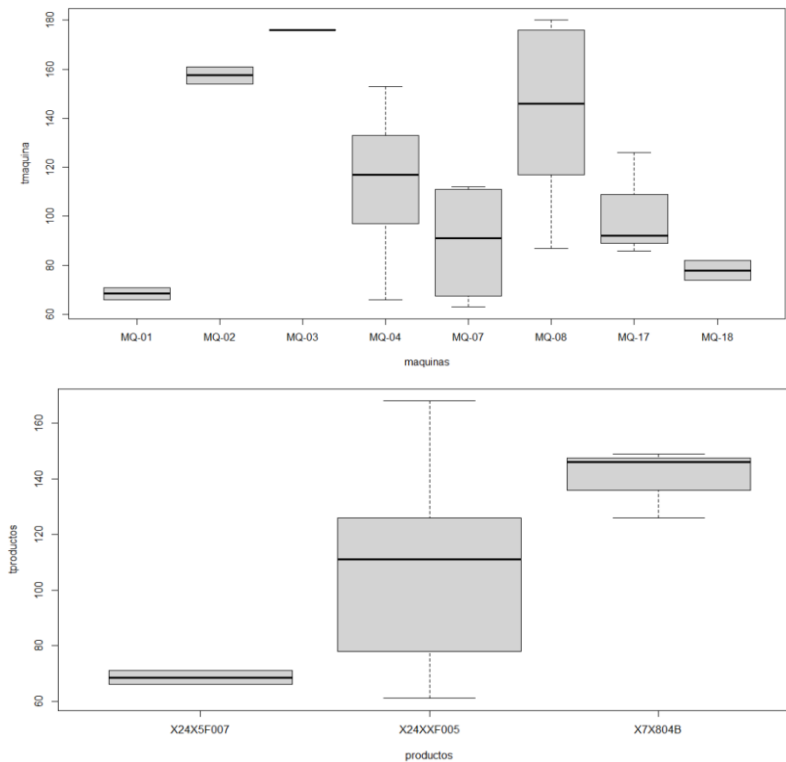


Imagen 4: Diagramas de cajas para homogeneidad con máquinas y productos

Observando los diagramas de caja de los tiempos de ejecución en diferentes máquinas y productos se puede concluir que los datos no son homogéneos. Se pueden observar los cambios drásticos en cada conjunto de datos ya sea del tipo de producto o del número de puesto de trabajo. Por esto, se obtiene una distribución con parámetros diferentes para cada tipo de producto y para cada número de maquina asegurando de que no todos siguen una misma distribución. Adicionalmente se realizó la prueba de kruskal-Wallis para así concluir que los datos no son homogéneos ya que se obtuvo un valor p inferior a 0.05.

```
> kruskal.test(tmaquina ~ maquinas, data = data)

kruskal-wallis rank sum test

data:  tmaquina by maquinas
kruskal-wallis chi-squared = 15.657, df = 7, p-value = 0.02845

> kruskal.test(tproductos ~ productos, data = data)

kruskal-wallis rank sum test

data:  tproductos by productos
kruskal-wallis chi-squared = 6.1047, df = 2, p-value = 0.04725
```

Imagen 5: Prueba de Kruskal-Wallis entre tiempo -productos y tiempo-puestos de trabajo.

Finalizando con la prueba de homogeneidad de Kruskal-Wallis se termina el análisis de datos de entrada. Con las pruebas ya presentadas se puede usar la relación entre la distribución Poisson y exponencial para modelar cada cuanto se demora un puesto de trabajo en ensamblar un producto. Cabe resaltar que todas las máquinas siguen la misma distribución con la excepción de que cada una tiene un parámetro diferente. A partir de las distribuciones se puede comenzar a implementar el modelo y empezar a obtener salidas relevantes a los datos recolectados en la fábrica.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo de la fábrica se implementó en el software de Simul8. Se escogió esta plataforma ya que permite de manera muy visual entender el funcionamiento del modelo y se caracteriza principalmente por la facilidad de modelar simulaciones de eventos discretos. Además, cuenta con muchas herramientas que simplifican en gran medida la obtención y el análisis de los resultados.

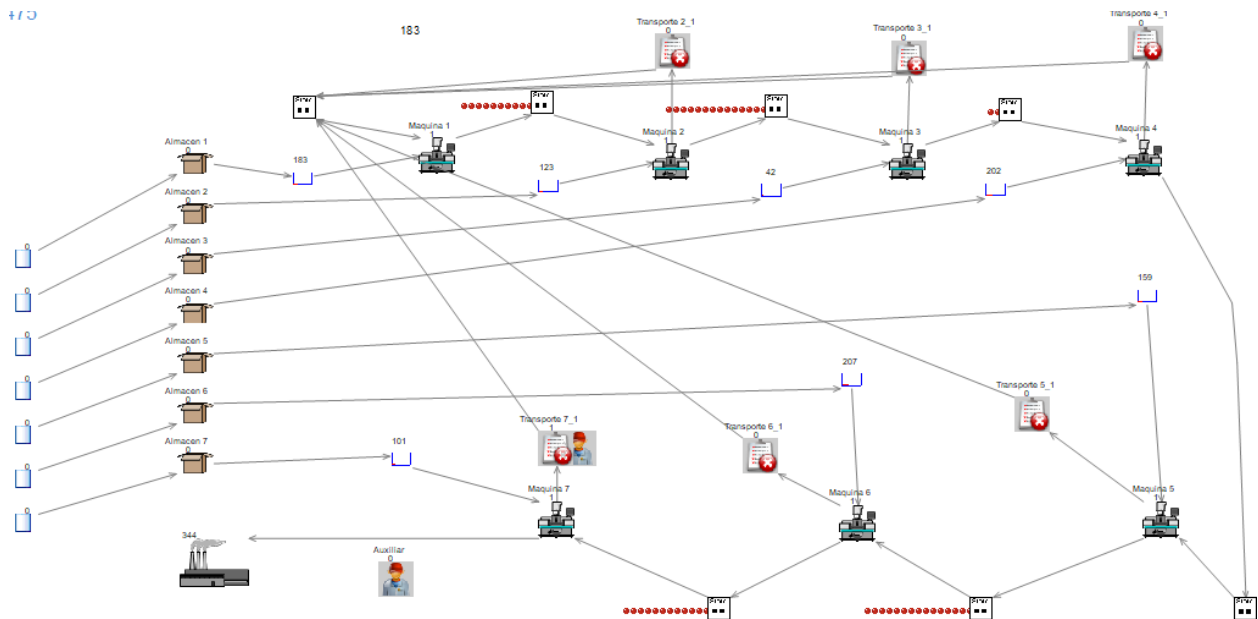


Imagen 6: Modelo en Simul8

El modelo consta de 7 almacenes que representan el lugar donde se tiene almacenada la materia prima, cada máquina tiene un almacén. Estas estaciones se crearon para que el auxiliar transporte la materia prima hacia las máquinas cuando éstas solo dispongan de 50 piezas. Se tienen también las máquinas y el sistema de conexión entre ellas al igual que la cantidad de productos ya terminados. La actividad de transporte es una actividad auxiliar que se encarga de dar la señal al auxiliar de que hay un producto defectuoso y este debe ser transportado a la primera estación para ser ensamblado nuevamente desde el inicio. Aproximadamente el 1% de los productos totales en cada máquina salen defectuosos. Por último, hay que mencionar que el modelo se corre por 10800 segundos lo que equivale a tres horas (un día de trabajo).






		Low 99% Range	Average Result	High 99% Range	Risk
Maquina 1	Number Completed Jobs	9401.76	9482.36	9562.96	
Queue_Defectuosas	Items Entered	783.13	841.00	898.87	
Transporte 2_1	Number Completed Jobs	137.41	158.71	180.02	
Auxiliar	Utilization %	33.58	35.48	37.37	
End 1	Number Completed	8507.90	8559.07	8610.25	

Imagen 7: Ejemplo presentación de resultados

En la imagen 7 se puede observar cómo es la obtención de los resultados luego de hacer varias corridas del modelo. En esta imagen se muestra un ejemplo donde se pueden encontrar los siguientes resultados: El número de piezas ensambladas de la maquina 1, la cantidad total de piezas defectuosas entre todas las maquinas, la cantidad de piezas defectuosas de la maquina 2, el porcentaje de ocupación del auxiliar durante las tres horas de simulación y la cantidad de productos ensamblado exitosamente, con sus respectivos intervalos de confianza para todas las variables.

6. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

6.1 Naturaleza del Modelo

El modelo sobre la fábrica inteligente es una simulación terminal. El punto donde termina el modelo es luego de una jornada de operación (8:00-11:00), es decir 3 horas.

6.2 Naturaleza de las salidas del modelo

Se tienen tres estadísticas principales sobre las variables de salida.

- Porcentaje de productos en cola durante menos de 50 segundos
 - Esta métrica es una medida de la eficiencia en la gestión del flujo de trabajo. Indica qué proporción de productos se mueve rápidamente a través del proceso sin experimentar esperas prolongadas. Los datos son de naturaleza cuantitativa y expresan una relación porcentual, lo que significa que se representan como un número entre 0% y 100%. Cuanto más cercano al 100%, mejor, ya que implica que la mayoría de los productos no experimentan largas esperas.
- Número total de productos terminados
 - Este dato es una medida fundamental del rendimiento del proceso. Representa la cantidad total de productos que han pasado por el proceso y se han completado con éxito. Estos datos son de naturaleza cuantitativa y se expresan como un número entero, ya que cuentan la cantidad de productos producidos.
- Porcentaje de productos que deben ser fabricados nuevamente
 - Este dato es una medida fundamental del rendimiento del proceso. Representa la cantidad total de productos que han pasado por el proceso y es necesario que vuelvan a iniciar el proceso desde la primera estación debido a una mala ejecución en alguna de las estaciones.

En conclusión, estos datos de salida son cuantitativos y se utilizan para evaluar la eficiencia, el rendimiento y la calidad de un proceso determinado. Son esenciales para la toma de decisiones y la mejora continua en una variedad de entornos en la fábrica.

6.3 Manejos de sesgos iniciales

El modelo inicia con una condición inicial donde ninguna estación tiene algún producto en proceso o cola, es decir, todas inician en cero. Por esto se dice que no es necesario un periodo de calentamiento o condiciones iniciales específicas.

6.4 Número de corridas

Como el modelo es un sistema con terminación, se deben realizar varias corridas y por ende el número óptimo de corridas debe de ser calculado. Para esto, se debe implementar la función Trial Calculator de simul8 donde se seleccionan las variables a las cuales se les desea calcular el número de corridas necesarias para obtener resultados con un nivel de confianza del 95%. Los valores obtenidos se pueden observar en la imagen 8.

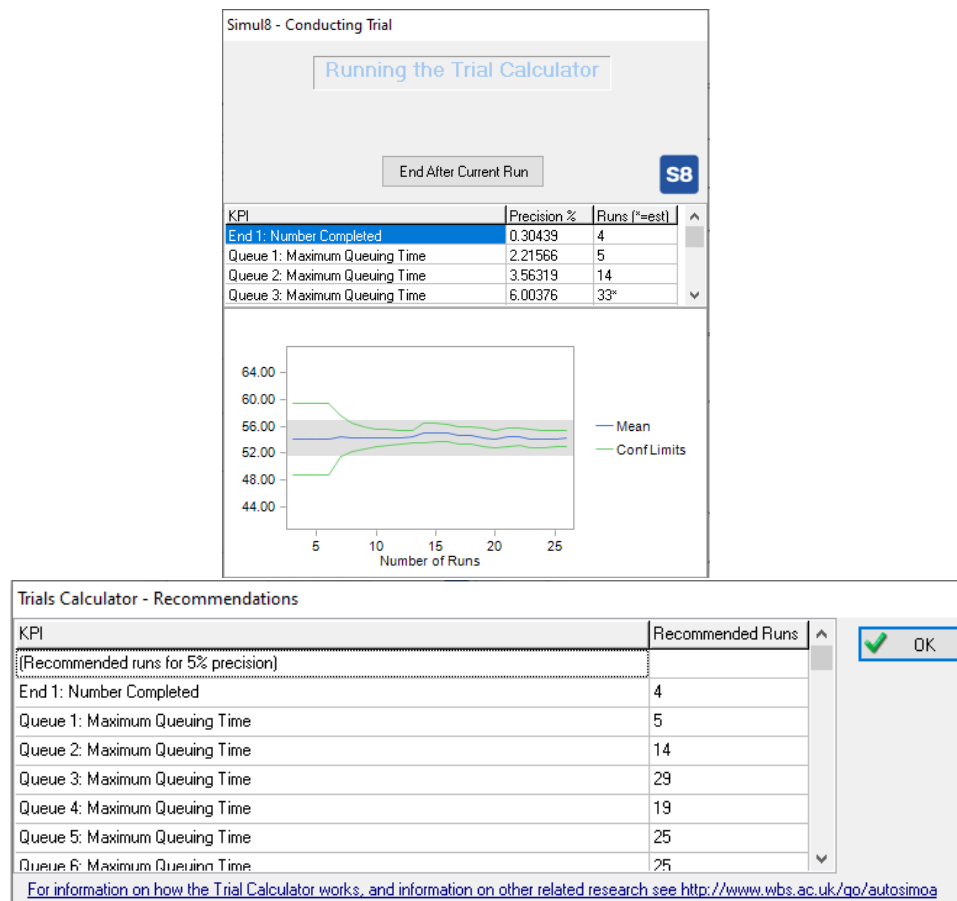


Imagen 8. Numero de corridas

En conclusión, el número de corridas necesarias para obtener resultados con una precisión del 95% son 29. Esto se debe a que se toma el mayor valor de numero de corridas entre todas las variables para alcanzar la precisión con cada una de estas.

6.5 Espacio de soluciones

El espacio de soluciones en el contexto del proyecto se refiere a todas las posibles configuraciones y ajustes que pueden realizarse en la fábrica inteligente para mejorar su eficiencia y reducir los tiempos de espera en cola. En otras palabras, es el conjunto de todas las decisiones y cambios que pueden implementarse en los diferentes aspectos de la operación de la fábrica, como la distribución de puestos de trabajo y la cantidad de supervisores, con el objetivo de optimizar el rendimiento de la fábrica.

La simulación de eventos discretos permite explorar diferentes configuraciones y ajustes en este espacio de soluciones para evaluar su impacto en la operación de la fábrica. El objetivo es identificar las combinaciones óptimas que maximicen la eficiencia y minimicen los tiempos de espera en cola. Este espacio será analizado profundamente más adelante en el apartado de diseño de experimentos.

7. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Para realizar la verificación y validación sobre el modelo de la fábrica inteligente se implementó un test determinista de validación de caja blanca, donde lo que se desea es determinar el buen funcionamiento del modelo. Se realizará modificando las condiciones iniciales del modelo y se establecerán los resultados esperados para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos. Se utiliza el modelo después de modificar las condiciones iniciales para así poder comprobar el buen funcionamiento de este.

Para la validación de caja blanca se analiza si cada parte del modelo representa con suficiente exactitud el sistema real para alcanzar los objetivos propuestos. El modelo se está simulando con una media de piezas disponibles al inicio de la simulación de 200 para cada máquina. Si se modifica esta cantidad de piezas se espera que el modelo se vea afectado al igual que va a afectar el porcentaje de ocupación del auxiliar. Se observa que si esta cantidad disminuye es de esperarse que este porcentaje se incremente y pasa totalmente lo contrario si se aumenta la cantidad. Por otro lado, si alguna de las maquinas no tiene piezas en su inventario y deja de producir, la producción entera del modelo debe parar. Finalmente, para el test de verificación y validación, el porcentaje de piezas defectuosas se encuentra previamente establecido en 1% para cada máquina, pero si este valor disminuye se espera un porcentaje de ocupación del auxiliar menor y una mayor producción, y lo contrario en el caso en donde se aumenta este porcentaje. A continuación, se muestran los análisis donde se presentan los cambios realizados al modelo y el resultado esperado del mismo al igual que los resultados obtenidos luego de correr las simulaciones con estos cambios.

Modificación a los valores iniciales.	Resultados esperados.
Piezas disponibles para producción en los puestos de trabajo.	Incrementa -> Ocupación auxiliar disminuye Disminuye -> Ocupación auxiliar aumenta
Piezas que la auxiliar rellena en cada estación.	Incrementa -> Ocupación auxiliar disminuye Disminuye -> Ocupación auxiliar aumenta
Maquinas Iniciales o finales sin material disponible.	Producción disminuye.

Porcentaje de piezas defectuosas.	Incrementa -> Menor producción y más porcentaje de ocupación. Disminuye -> Mayor producción y menos porcentaje de ocupación.
-----------------------------------	---

Tabla 5: Resultados esperados.

Modificación.	Resultados sin modificación.	Resultados con modificación.
Piezas disponibles para producción en los puestos de trabajo.	Ocupación: 36%	Incrementa -> Ocupación: 33% Disminuye -> Ocupación: 38%
Piezas que la auxiliar rellena en cada estación.	Ocupación: 36%	Incrementa -> Ocupación: 27% Disminuye -> Ocupación: 42%
Maquinas Iniciales o finales sin material disponible.	Producción: 8542	Producción: 19
Porcentaje de piezas defectuosas.	Producción: 8542 Ocupación: 36%	Incrementa -> Producción: 8230 Ocupación: 39% Disminuye -> Producción: 8788 Ocupación: 33%

Tabla 6: Resultados obtenidos.

Con las tablas 5 y 6 se puede verificar que el modelo se está comportando de la manera adecuada ya que al modificar los valores iniciales de ciertas variables y exponer los cambios esperados en los resultados de la simulación del modelo, los resultados obtenidos con las modificaciones fueron los esperados.

Para la validación de caja negra se utiliza la prueba de hipótesis para determinar si hay una diferencia significativa entre los resultados de la simulación y los resultados del sistema real. Se utiliza un intervalo de confianza que cuantifica la magnitud de la diferencia y confirma si es significativa. Se dice que si el intervalo de confianza contiene al cero entonces las medias no tienen una diferencia significativa, pero si no lo contiene la diferencia si es significativa y la magnitud está dada por el tamaño del intervalo.

Para realizar esta validación se tomaron los datos de los productos ensamblados por minuto en cada uno de los puestos de trabajo. Los dos conjuntos de datos contienen la misma variable, pero se diferencian por una ser los datos reales de la fábrica y la otra los resultados de los datos simulados. Se realizó la prueba t en R-studio para hacer adecuadamente la validación de caja negra. El resultado de la prueba t de dos muestras concluye que se tiene una media simulada de 50.66 y una media real de 52.19, con un estadístico t de 1,88 y un intervalo de confianza del 95% de (-0.12, 3.20).

```
Welch Two Sample t-test

data: Datos_Medias$Cantidad_por_Minuto_Originales and Datos_Medias$Cantidad_por_Minuto_Simulados
t = 1.8816, df = 36.034, p-value = 0.06799
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.1200254  3.2047217
sample estimates:
mean of x mean of y
 52.19790  50.65556
```

Imagen 9. Resultado Prueba t en R-Studio

Después de hallar el estadístico t se puede decir que la diferencia entre las medias está a 1.88 errores estándar de 0. Esto indica que la diferencia no es estadísticamente significativa a un nivel convencional de $\alpha = 0,05$ y es sustentado por el valor p que en este caso tiene un valor de 0.068 superando dicho α . Esto significa que no se debería rechazar la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las medias de los dos grupos. Por otro lado, se sabe que el intervalo de confianza es un rango de valores en el que, con un 95% de certeza, se espera que se encuentre la diferencia real entre las medias de los dos conjuntos de datos. En el resultado presentado, el intervalo es de $(-0.12, 3.20)$. Al incluir el valor 0 dentro de este rango, se plantea lo mismo a lo que indica la prueba t y se dice no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, la cual establece que no existe una diferencia significativa entre las medias.

8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y EXPERIMENTACIÓN

8.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad básicamente explora todos los parámetros del modelo y permite ver que tan sensibles son los resultados después de cambios en dichos parámetros. Se desea ver si pequeños cambios en los parámetros afectan poco, mucho o nada los resultados finales del modelo. El análisis de sensibilidad sirve para ver qué tan robusto es el modelo y para mostrar con que fuerza el modelo representa la situación en el mundo real.

Para el alcance de este modelo se implementó un análisis de sensibilidad local que indica que tan sensible es el modelo a partir de cambios en cada uno de los parámetros individualmente. Se basa en variar los parámetros uno por uno y analizar los cambios que pueden llegar a tener en los resultados.

Se utilizó el análisis de sensibilidad que brinda la plataforma Simul8 y se analizaron los datos a continuación. Esta plataforma cambia los parámetros de las distribuciones previamente establecidas por el usuario, en este caso las distribuciones con las que se implementó el análisis fueron las de cada una de las máquinas/puestos de trabajo. En los resultados se puede observar la media de los experimentos con una reducción del parámetro en un 10%, un incremento de un 10%, una medida del resultado de la sensibilidad de la distribución y un indicador que muestra si el resultado está o no dentro de los intervalos de confianza. Las variables que se identificaron como más importantes para el análisis fueron el número de trabajos completados en cada una de las máquinas, el número total de productos ensamblados, los elementos que se reportaron como defectuosos, el porcentaje de utilización del supervisor, y el tamaño y tiempo en las colas para cada uno de los puestos de trabajo. Los resultados del análisis de sensibilidad fueron los siguientes:

- Numero de trabajos completados
 - Para este variable se identificó mucha sensibilidad al cambiar el parámetro de las distribuciones. Como se tiene una distribución para cada máquina y se está analizando la sensibilidad de cada una de las máquinas por si sola, se puede observar y concluir que cuando el parámetro de la distribución y la variable a analizar son iguales o el puesto de trabajo es posterior se identifica claramente la alta sensibilidad. Si el puesto de trabajo siendo analizado se encuentra antes del puesto al que se le está cambiando el parámetro algunas veces se puede identificar poca sensibilidad. La razón por la que todas las máquinas se ven afectadas por cambios en los parámetros así no sea propiamente la distribución del puesto es por las piezas defectuosas ya que vuelven a entrar a el principio del proceso de producción.

- Número total de productos ensamblados
 - El número total de productos ensamblados es una variable muy sensible ya que depende de cada una de las distribuciones mencionadas anteriormente. Cuando se altera la distribución de cualquiera de los puestos de trabajo ya sea incremento o reducción en un 10% se notan cambios significativos en la cifra de los resultados para esta variable, por ende, se concluye que es sensible.
- Número total de productos defectuosos
 - Con el número total de productos defectuosos sucede algo muy similar a el número total de productos ensamblados. Esta variable también depende de todas las distribuciones usadas en el análisis de sensibilidad y se puede concluir también que la variable es muy sensible a cambios en los parámetros de las distribuciones en el modelo.
- Porcentaje de utilización del supervisor
 - El porcentaje de utilización del supervisor se considera una variable sensible ya que es altamente alterada por el cambio en parámetros de las distribuciones del modelo. El supervisor es una pieza fundamental para el desarrollo y funcionamiento de este modelo y de la fábrica de producción en el mundo real. Como este recurso se encarga del transporte de materia prima y del transporte de piezas defectuosas es muy susceptible a cambios drásticos así sea con cambios mínimos en los parámetros del modelo.
- Tamaño y tiempo en colas
 - Al igual que las variables mencionadas anteriormente, el tiempo en cola es muy sensible ya que depende de todas las distribuciones que están siendo analizadas en esta prueba. Al incrementar o reducir el porcentaje del parámetro de alguna distribución se altera el resultado del tiempo en cola en una gran escala. Por otro lado, el tamaño de las colas es una variable poco sensible. Esto se debe a que el máximo de productos en cola esta previamente establecido en 30 y el cambio en los parámetros no alcanzan a afectar de una manera influyente esta variable.

Después del análisis detallado de cada una de las variables respecto al cambio de los parámetros de las distribuciones del modelo podemos concluir que este modelo es bastante sensible y que no permite muchos cambios. Los cambios drásticos podrán afectar los resultados del modelo y este podrá perder validez a la hora de compararlo con el problema en el mundo real.

8.2 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos permite comparar diferentes alternativas y configuraciones para posiblemente hallar soluciones al problema del mundo real a través de la simulación del modelo planteado. Es comúnmente usado ya que facilita controlar las entradas del modelo ya sean cualitativas o cuantitativas y permite ajustar sus niveles/rangos en una manera sencilla para evaluar resultados de cómo funciona el modelo con cambios en su configuración. Básicamente el experimento consiste en hacer pruebas en donde se modifican las condiciones de un sistema para evaluar los diferentes resultados. Una de las ventajas de hacer un diseño de experimentos es poder analizar las relaciones de causa-efecto en un modelo y poder tomar decisiones fundamentadas para hallar una solución factible a problemas en el mundo real. Se utilizó el diseño de experimentos 2^k para obtener las medidas de desempeño del modelo y para determinar cuáles factores tienen mayor impacto en las respuestas de este.

Para realizar el diseño de experimento 2^k es fundamental elegir correctamente los factores. En este caso se eligieron dos factores, numero de auxiliares (recurso) y número de puestos de trabajo que reciban productos defectuosos. Se eligió el puesto de trabajo número uno ya que es la maquina por donde comienza el proceso de producción y también porque es el único puesto de trabajo donde regresan los productos defectuosos para reiniciar el proceso. Se eligió estratégicamente esta máquina por ser la que más flujo de productos maneja y por ser fundamental para el proceso de productos defectuosos en el sistema. Para establecer los niveles se pensó en algo que fuera factible a nivel económico y que no fuera muy descabellado para implementar en la vida real, por esto se establecieron los niveles para ambos factores en 1-3. A continuación, en la imagen 9 se puede ver el diseño de experimentos 2^k implementado en la plataforma Simul8.

Results	Trial 1 Average	Trial 2 Average	Trial 3 Average	Trial 4 Average
Maquina 1.Number Completed Jobs	9476.10345	9545.17241	9555.48276	9660.06897
Maquina 2.Number Completed Jobs	9452.62069	9523.27586	9522.06897	9627.10345
Maquina 3.Number Completed Jobs	9281.27586	9345.58621	9334.10345	9418.2069
Maquina 4.Number Completed Jobs	9135.89655	9197.41379	9176.10345	9252.27586
Maquina 5.Number Completed Jobs	8976.82759	9041.24138	9009.75862	9086.06897
Maquina 6.Number Completed Jobs	8821.58621	8886.58621	8850.34483	8927.06897
Maquina 7.Number Completed Jobs	8625.03448	8673.86207	8644.06897	8703.96552
Queue 1.Maximum Queuing Time	54.17134	53.76295	58.34492	57.65287
Queue 2.Maximum Queuing Time	49.04065	46.75079	49.85978	47.27149
Queue 3.Maximum Queuing Time	49.43247	46.80822	49.786	47.60625
Queue 4.Maximum Queuing Time	51.20954	48.20082	51.6823	47.94116
Queue 5.Maximum Queuing Time	52.64916	49.41798	52.5407	49.94144
Queue 6.Maximum Queuing Time	54.43682	53.2514	55.08864	53.06195
Queue_Defectuosas.Items Entered	853.2069	877.82759	902.65517	946.72414
Auxiliar.Utilization %	35.85533	12.20866	37.42172	12.92177
End 1.Number Completed	8542.31034	8590.75862	8561.17241	8620.41379

Decision Factors				
Auxiliar.Max Available	1	3	1	3
Maquina 1.Replication	1	1	3	3

Imagen 10. Diseño de experimentos 2^k en Simul8

Del experimento 2^k se puede ver más estructurado el impacto de los factores en las respuestas. Se puede ver claramente que el aumentar el número de auxiliares va directamente relacionado a el aumento de la producción total en la fábrica y a el número de piezas terminadas en cada máquina. Por otro lado, se tiene una relación inversa con los tiempos de espera y el número de auxiliares, es decir, al incrementar el número de auxiliares el tiempo de espera para cada una de las maquinas reduce. Se puede observar también el claro aumento en los productos defectuosos al replicar el puesto de trabajo inicial ya que como se mencionó anteriormente, todos los productos defectuosos vuelven a este puesto de trabajo. Esto tiene un efecto inmediato también en el número de piezas completadas en dicha maquina en el que se puede ver que incrementa sustancialmente. Otra de las conclusiones que se pueden sacar a partir de este diseño de experimentos es acerca del porcentaje de utilización del auxiliar, como se puede notar, el auxiliar solo tiene un porcentaje de utilización del 12-13 el cual se considera muy bajo y es un dato fundamental a la hora de tomar decisiones para implementar en el mundo real.

Para continuar con el desarrollo del diseño de experimentos se debe de realizar un análisis de varianza (ANOVA) que básicamente es un método estadístico para las diferencias en las medias. El ANOVA toma

como hipótesis nula H_0 el supuesto de que todas las medias son iguales y como hipótesis alternativa H_1 que no todas las medias son iguales. El resultado del análisis de varianza se puede ver a continuación la imagen 10.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Auxiliar	1	5799	5799	1.543e+27	<2e-16	***
Maquina_1_replication	1	1177	1177	3.132e+26	<2e-16	***
Auxiliar:Maquina_1_replication	1	58	58	1.550e+25	<2e-16	***
Residuals	4	0	0			

Imagen 11. ANNOVA Producción total

Para analizar la varianza debemos de ver principalmente el p-valor. Como el p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula, es decir que al modificar los factores se alteran significativamente las variables de salida y se puede concluir que no todas las medias son iguales.

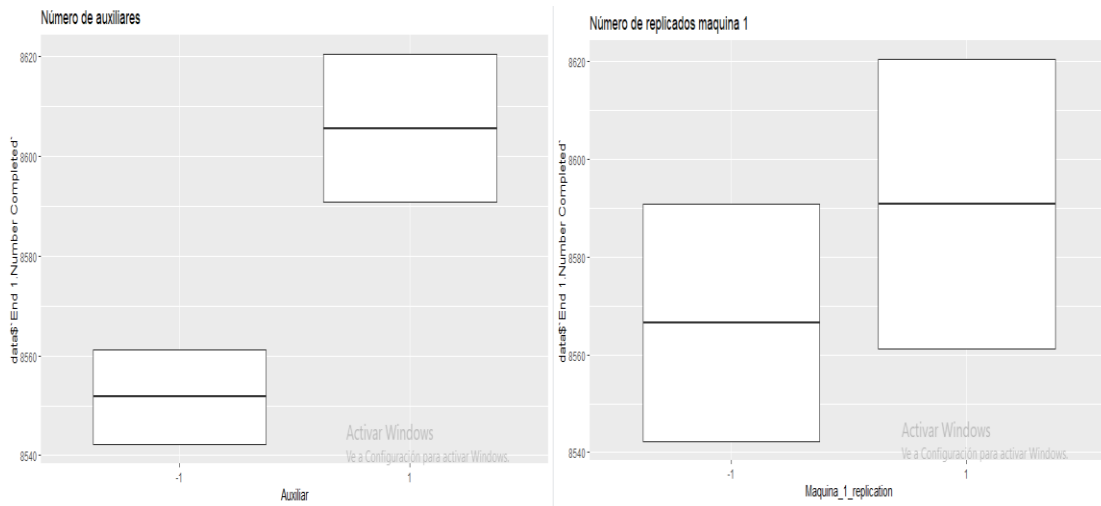


Imagen 12: Diagramas de caja análisis de varianza

Para ambos casos se ve una distribución de los datos muy similar. Al aumentar el número de auxiliares aumenta el porcentaje de trabajos completados en los dos casos por lo que se concluye que para todos los casos se maximiza el número de trabajos completados si se toma el valor más alto del rango que en este caso es 3 auxiliares y 3 réplicas de la maquina 1.

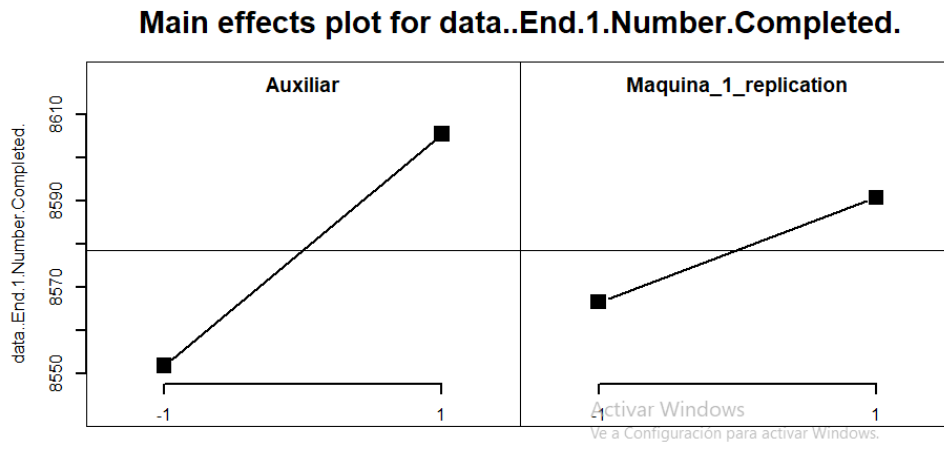


Imagen 13: Grafica de Efectos Principales

En esta gráfica de efectos principales se puede ver la línea de la media que está aproximadamente en 8580. Como la línea no es horizontal al eje x se sabe que hay un efecto principal presente. Esto básicamente dice que la media no es la misma para todos los factores y como la pendiente es bastante inclinada, se dice que la magnitud del efecto principal es grande.

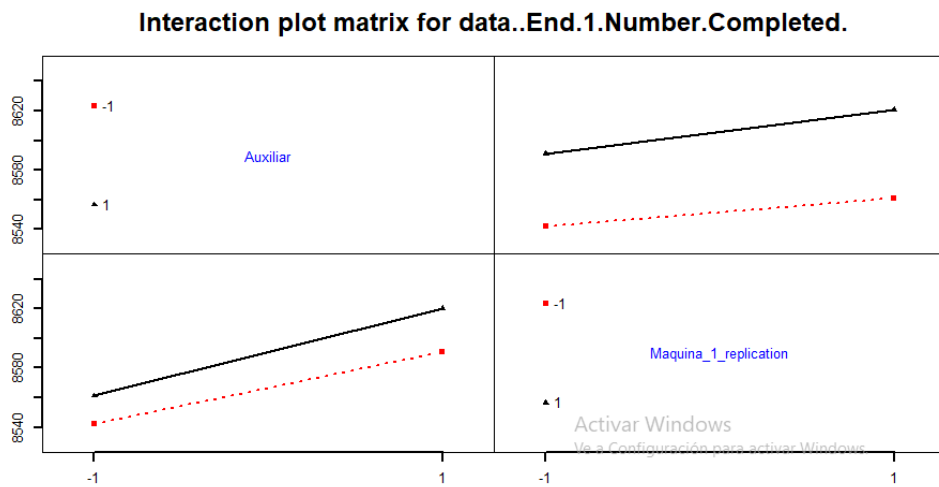


Imagen 14: Grafico de Interacciones

En este gráfico de interacciones se observan ambas variables juntas y como las líneas son paralelas o muy cerca de ser paralelas se concluye que no hay interacción entre los factores.

Aquí finaliza el análisis para la variable de trabajos completados y comienza el análisis para la variable de tiempos máximos en cola. Cabe resaltar que este análisis se realizó para cada una de las variables en los resultados, pero por efectos de la longitud y precisión del proyecto solo se mostraran las 2 variables mencionadas anteriormente.

LastName1, LastName2, and LastNameLastAuthor

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Auxiliar	1	0.61	0.61	9.053e+27	<2e-16	***
Maquina_1_replication	1	32.51	32.51	4.861e+29	<2e-16	***
Auxiliar:Maquina_1_replication	1	0.04	0.04	6.016e+26	<2e-16	***
Residuals	4	0.00	0.00			

Imagen 15: ANNOVA Tiempo máx. en cola 1

Para analizar la varianza debemos de ver principalmente el p-valor. Como el p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula, es decir que al modificar los factores se alteran significativamente las variables de salida y se puede concluir que no todas las medias son iguales.

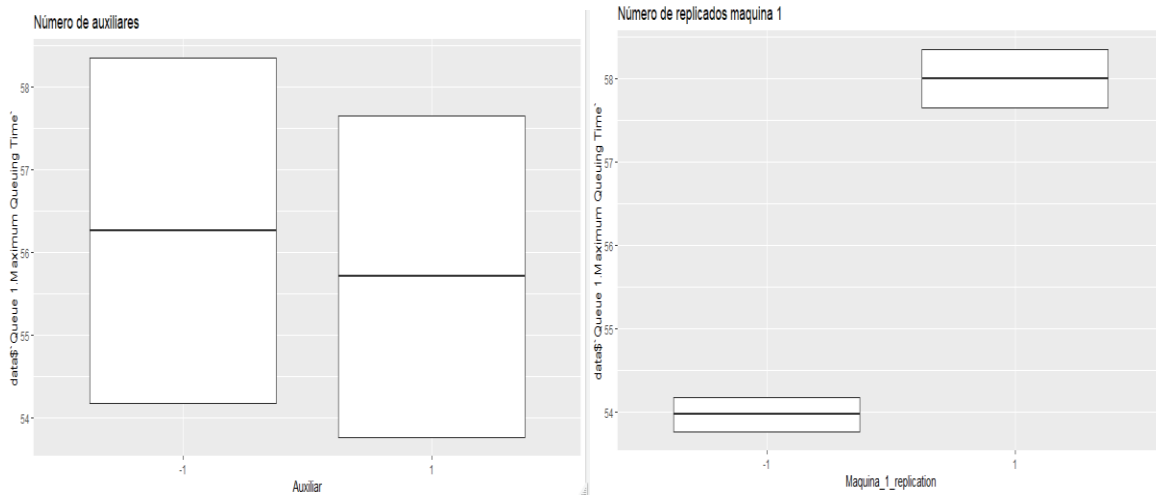


Imagen 16: Diagramas de caja análisis de varianza

En el primer caso se ve una distribución de los datos muy similar. Se puede observar que al aumentar el número de auxiliares disminuye el tiempo máximo en las colas. En el segundo caso se ve una gran diferencia ya que al aumentar el número de réplicas de la máquina 1 el máximo de tiempo en cola incrementa sustancialmente. La tendencia muestra que la réplica de máquinas genera más productos en el sistema y por ende aumentara los tiempos en cola. Se puede concluir que para minimizar el tiempo en cola se debe aumentar el número de auxiliares y disminuir el número de réplicas del puesto de trabajo.

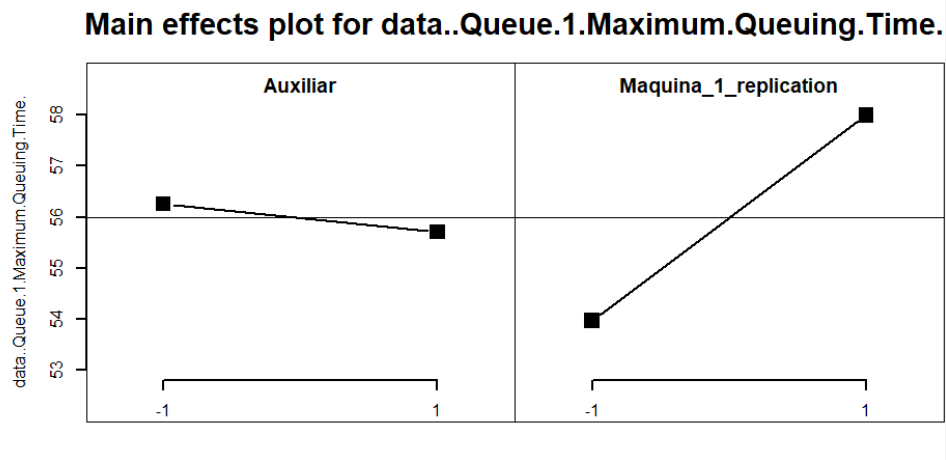


Imagen 17: Grafica de Efectos Principales

En esta gráfica de efectos principales se puede ver la línea de la media que está aproximadamente en 56 segundos. Como la línea no es horizontal al eje x se sabe que hay un efecto principal presente. Esto básicamente dice que la media no es la misma para todos los factores. Como la pendiente es bastante inclinada en la gráfica de la réplica de la maquina 1 se dice que la magnitud del efecto principal es grande.

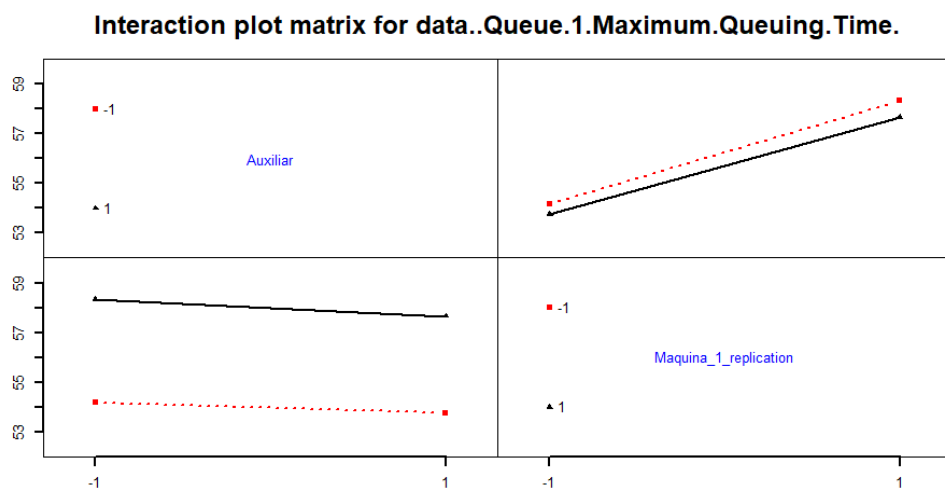


Imagen 18: Grafico de Interacciones

En este gráfico de interacciones se observan ambas variables juntas y como las líneas son paralelas o muy cerca de ser paralelas se concluye que no hay interacción entre los factores.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De este modelo se pueden sacar diferentes análisis y conclusiones para llegar a implementar en la fábrica. Primero, se concluye que la contratación de más auxiliares es innecesaria por el valor económico que le puede llegar a generar a la universidad. Esto se fundamenta basado en el porcentaje de utilización del recurso del auxiliar ya que teniendo solo uno, el porcentaje es de aproximadamente el 33% y al aumentar

a tres auxiliares el porcentaje baja sustancialmente a un 12%. El costo de esta contratación no sustenta el poco beneficio que un nuevo auxiliar pueda aportar a el desarrollo de la fábrica.

Por otro lado, el aumento en los puestos de trabajo se considera también poco eficiente. Al aumentar los puestos de trabajo se incrementan los tiempos en cola y esto va en contra de los objetivos principales de este modelo. Además, el aumentar los puestos de producción tiene un efecto mínimo en la producción total ya que solo logra aumentarla en aproximadamente un 1%.

Finalmente, se logró parcialmente el objetivo de disminuir los tiempos en cola de los productos a un tiempo por debajo de los 50 segundos. El objetivo se cumplió en los casos donde la cantidad de auxiliares aumentaba, pero como se mencionó anteriormente el costo y beneficio que este trae no es viable para la fábrica. Además, los tiempos en cola superaban los 50 segundos, pero eran inferiores a 60 segundos, lo que se pueden considerar como tiempos eficientes y factibles para la fábrica.

Se puede concluir que la fábrica como está planteada previa a este modelo es muy eficiente y optima en términos de producción y empleados, es decir, con pocos empleados se puede llegar a obtener una gran cantidad de productos terminados siguiendo la estructura original de la misma. Se resalta también que las maquinas por individual funcionan de manera óptima ensamblando casi 1 producto por segundo en la mayoría de los casos y es difícil mejorar estos resultados sin invertir mucho dinero en empleados auxiliares, puestos de trabajo y nuevas líneas de producción.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Texto Guía: Robinson, S. (2004). Simulation: the practice of model development and use. Chichester: Wiley.
- García, F. (2020). DISEÑO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS, PARA LA MEJORA EN LA LINEA DE PRODUCCIÓN DE TEJIDO INDUSTRIAL SECCION C, EN LA EMPRESA GUANTES INTERNACIONALES. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/411/1/GarciaJacobFelipe%20MMANAV%202020.pdf
- SANTA CRUZ, CAROLINA. (2014) . Aplicación de Modelos de Simulación Basado en Eventos Discretos para la Optimización de una Línea Productiva. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1795/PI%20Carolina%20Santa%20Cruz.pdf?sequence=1&isAllowed=y