

SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS EN EL SISTEMA DE ENSAMBLE DE MOTOS DE AUTECO S.A.S

Hamilton Smith Gómez Osorio

Departamento de Ciencias Matemáticas
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia

Santiago Isaza Cadavid

Departamento de Ciencias Matemáticas
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia

1. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de ensamble de motos en Auteco es común que se pierda tiempo, esto debido a la distribución de los lotes de motos con los que se trabajan. Esto sucede porque el tamaño/pitch de las motos y el tiempo de fabricación no es igual para todas las motos ya que estos dependen de la referencia ensamblada. Dichas condiciones ocasionan retrasos pues, si hay varias motos de distinta referencia en la línea, toda la línea se mueve a la velocidad del más lento. Ante este tiempo de ocio que tienen los operarios de la línea es normal que se aprovechen estos tiempos de ocio, distrayéndose e incurriendo en errores que a su vez limitan más los niveles de producción. La empresa ha propuesto soluciones al implementar un agilizador, un operario que ayuda a los demás cuando se están atrasando, y así intentar mantener un ritmo apropiado de trabajo pero aún así no se han logrado obtener los niveles necesarios de productividad, por esto es importante modelar la situación y encontrar respuestas, y/o posibles alternativas para enfrentar este problema de rendimiento.

Nuestro propósito como modeladores es encontrar alguna disposición, forma de organizar los operarios y/o los lotes de motos que van a entrar a la línea para mantener los niveles de rendimiento lo más alto posibles o en su defecto reducir el tiempo de ocio, que por consecuencia permite un rendimiento adecuado. Esto a través de la modelación de la línea de ensamble, problema bastante relacionado con la Simulación de Eventos Discretos, pues podemos imitar la línea real para evaluar cómo se verá afectada la producción por diferentes condiciones, además de que esta situación es un claro ejemplo de un problema de colas, en este caso, dentro de la línea de ensamble. Otro motivo de la importancia de este tipo de simulación es la capacidad de adentrarnos en el mundo del "¿qué pasaría si?" así entrar a evaluar distintos cambios dentro de la línea de ensamble sin incurrir a daños en la realidad y poder tomar alguna decisión a mejor gracias a estos distintos experimentos. Además, nos enfrentamos a un problema estocástico en el que ciertos procesos, como en nuestro caso son los tiempos de ensamble para cada puesto, se presentan comportamientos estocásticos, es decir, que se comportan de manera aleatoria, e incluso, que para cada elemento o entidad que entra en el sistema, sucesos conocidos como eventos, se puede presentar un comportamiento particular según sus características de tipos.

La estructura del documento está dada por el contexto de la situación problema, seguido del modelo conceptual y las apreciaciones que se tuvieron en cuenta a la hora de implementarlo utilizando la herramienta SIMUL8 Professional. Igualmente se hablará de los datos de entrada y los respectivos análisis estadísticos al respecto para dar pie a una verificación y validación del modelo. Posteriormente se establecen diferentes escenarios de experimentación para buscar soluciones a la problemática planteada; por último, las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

2. MODELAMIENTO CONCEPTUAL

2.1. Definición del problema

La línea de ensamble de motos de Auteco presenta un problema de rendimiento cuando cambian de modelos/referencia a ensamblar, debido a que no todas las referencias requieren del mismo tiempo de trabajo ni del mismo espacio dentro de la línea. Esta problemática se evidencia en aumentos del tiempo de ocio de los operarios ,pues la línea al moverse a la velocidad del más lento ocasiona atrasos y distracciones traduciéndose en estas dificultades para la empresa.

2.2. Objetivos de la modelación

2.2.1. Propósito del modelo

Maximizar la producción de motos consiguiendo una efectividad del 95 % manteniendo un porcentaje de utilización de los operarios por encima del 90 % con un tiempo de ocio muy bajo.

2.2.2. Objetivos específicos del modelo

- Lograr una efectividad esperada (motos producidas/ motos vendidas) cerca de 1 incrementando la producción de motos para los tipos de motos One, Twist y Advance GO de la Línea 3 por hora o
- Reducir los tiempos de ocio de los operarios de ensamble cuando hay cambio de lote en los modelos a producir para lograr una producción que garantice una efectividad cercana al 95 %

2.2.3. Objetivos del proyecto

| | |
|----------------|--|
| Time-scale | Se modelará el tiempo equivalente a un mes de producción para los 3 tipos de motos |
| Flexibility | Múltiples cambios en el modelo de producción: Cantidad de operarios y Orden de modelos |
| Run-speed | Tiempo de corrida deben ser cortos |
| Visual display | Visualización 2D utilizando Simul8 |
| Ease-of-use | Usado solo por los modeladores por lo que su nivel de interactividad no será muy alto. |

2.3. Entradas y salidas del modelo

2.3.1. Salidas (para determinar logro de los objetivos)

- Efectividad y cantidad de motos producidas
- Porcentaje de ocio para cada operario en cada puesto de trabajo
- Porcentaje de utilización de cada operario en cada puesto de trabajo

2.3.2. Salidas (para determinar fracaso al cumplir los objetivos)

- Porcentaje de ocio (Tiempo en que los trabajadores no están ocupados, producto de retrasos)
- Porcentaje de uso de agilizador
- Series de tiempo de producción

2.3.3. Factores experimentales

- Número de operarios que trabajan en un ensamble
- Orden de lotes de producción
- Número de agilizadores

2.4. Contenido del modelo

2.4.1. Alcance

| Componente | Incluye/Excluye | Justificación |
|---|-----------------|---|
| Entidades: | | |
| Partes de motos | Incluye | Principal objeto de estudio del Proyecto, condiciona todo el proceso de producción. |
| Actividades: | | |
| Ensamble por parte de los operarios | Incluye | Cambia las entidades y permite ver el rendimiento de la producción. |
| Desplazamiento en la búsqueda de herramientas | Excluye | Las herramientas están a la mano en todo momento |
| Sub-ensamble | Excluye | Este no afecta al sistema a modelar ya que todas las piezas están disponibles cuando inicia el sistema |
| Colas: | | |
| Cinta transportadora | Excluye | Se modelará la cinta por medio de actividades en ciclo |
| Paros de puestos de ensamble | Excluye | Tienen una duración muy corta |
| Paros de línea | Excluye | Son muy poco frecuentes están programados |
| Tiempos de espera de las piezas | Excluye | Se considera que siempre se tienen las piezas disponibles para su uso |
| Piezas de motos de entrada | Incluye | Las entradas del modelo son filas de piezas que siempre están disponibles |
| Recursos: | | |
| Operarios | Incluye | Son uno de los principales objetos de estudio del proyecto, es de vital importancia conocer su desempeño en la simulación |
| Herramientas | Excluye | No hay herramientas compartida, cada operario tiene las suyas |
| Agilizador | Incluye | Este recurso ayuda a agilizar el proceso de producción cuando un operario se está atravesando |

2.4.2. Nivel de detalle

| Componente | Detalle | Incluye/Excluye | Justificación |
|-------------------|-------------------------------|-----------------|--|
| Entidades: | | | |
| Parte de motos | Tipo de moto | Incluye | Son de vital importancia ya que cada grupo tendrá un proceso diferente e interactuará con diferentes operarios |
| | Duración del proceso por tipo | | |
| | Tiempo máximo operación | | |
| | Tamaño de la moto | | |

| Componente | Detalle | Incluye/Excluye | Justificación |
|--------------------------------------|---|-----------------|---|
| Actividades: | | | |
| Ensamble del chasis | -Tiempo de ensamble por tipo - Recursos necesarios - Cantidad de recursos necesarios -Cantidad de operarios necesarios por tipo - Capacidad de partes por actividad | Incluye | Es importante saber cómo se desarrolla cada uno de los procesos de ensamble |
| Marcación chasis | | | |
| Ensamble del motor | | | |
| Ensamble llantas | | | |
| -Ensamble Sillín | | | |
| Ensamble Manubrio | | | |
| Ensamble frenos y luces | | | |
| Ensamble coraza externa | | | |
| Ensamble piezas exteriores restantes | | | |
| Ensamble Pedales y cadena | | | |
| Ensamble Guardabarros | | | |
| Sub-ensamble | - Unión de tapas | Excluye | No afectan el sistema a simular |
| | - Puesta de tornillos a ciertas piezas | | |

| Componente | Detalle | Incluye/Excluye | Justificación |
|-----------------------------|--|-----------------|---|
| Colas: | | | |
| Piezas de motos de entrada | Capacidad | Incluye | Necesaria para saber cada cuándo pedir más piezas |
| | Tipo de pieza | Incluye | Se utiliza para clasificar la cola y saber lo que se ensambla |
| | Orden de las piezas | Incluye | Necesario para garantizar que siempre hay piezas disponibles |
| | Prioridad en piezas | Excluye | Siempre se tendrá un mismo tipo de pieza |
| Paros de los operarios | Paros por falta de espacio de almacenamiento | Excluye | Son poco significativos, poca frecuencia |
| | Paro por falta de piezas | | |
| | Paro por falla de la cinta | | |
| Tiempos de espera de piezas | Retrasos en los procesos | Excluye | Las piezas siempre están disponibles |

2.4.3. Supuestos

- Se supone que siempre trabajan todos los operarios en la jornada completa
- todas las motos deben pasar por todos los puestos de trabajo
- No se realizan trabajos por fuera de los turnos por lo tanto estos no serán considerados
- Los paros no afectan el proceso de producción
- Se asume que siempre se tienen todas las piezas disponibles para trabajar

2.4.4. Simplificaciones

- Los tiempos de retraso por falta de piezas no serán considerados ya que siempre se cuenta con repuestos en caso de novedades en el desempaque.
- Se considerará un rendimiento igual para todos los trabajadores.
- Se trabajarán solo con 3 referencias de motos en vez de las 12 producidas.
- Aunque hay dos líneas de producción, por ahora solo consideramos una.
- Aunque se tienen en la línea trabajadores por izquierda y derecha, no se tendrá en cuenta esta distinción.
- se consideran los tiempos de retraso por parte de los trabajadores no mayores a 30 segundos.

3. Antecedentes

El proceso de manufactura de motos en Auteco sigue una línea de trabajo conocida como CONWIP (Constant Work-in progress) lo que se refiere a que cuando se termina un proceso, entra el siguiente. Situación que es clara en nuestro problema, pues una vez que una moto está terminada, al inicio de la cola, ya ha entrado un nuevo chasis sobre el cuál se ensamblarán las demás partes. Para resolver una situación similar (Yang, Hung, and Huang 2019) proponen una manera de mejorar el rendimiento de este método de ensamble al separar las líneas por procesos, varias líneas de ensamble categorizando las actividades. Es decir, Multi-CONWIP, varias líneas de ensamble al mismo tiempo. Experimentación que arrojó buenos resultados y que permite una nueva acercamiento a la manera de ensamblar bicicletas, pero dado nuestra situación problema no podemos aplicar algo similar dado que dentro de la misma línea de ensamble de Auteco hay limitaciones que impiden abarcar estas posibilidades, como el límite de espacio, siendo reducido,

líneas múltiples no son factibles. No obstante, este enfoque presenta un estudio significativo en opciones a la hora de organizar líneas de ensamble.

Otro trabajo similar es el de (Kuncova and Zajoncova 2018), donde el objetivo es mejorar el proceso de producción en una línea de ensamble de routers y equipo de computadoras. La idea es encontrar cuellos de botella y simular escenarios variando la capacidad de las colas y el número de operarios y así tomar decisiones que permitan aumentar el rendimiento. Este enfoque a la hora de enfrentar un problema de ensamble es bastante importante, pues nos permite considerar los escenarios de "¿qué pasaría sí?", siendo una herramienta útil a la hora de proponer posibles soluciones. Y por eso mismo nos parece importante y fue tenido en cuenta el trabajo de Kuncova y Zajoncova como ejemplo de un buen ejercicio de modelación.

4. Datos del Modelo

5. Implementación en SIMUL8 Professional

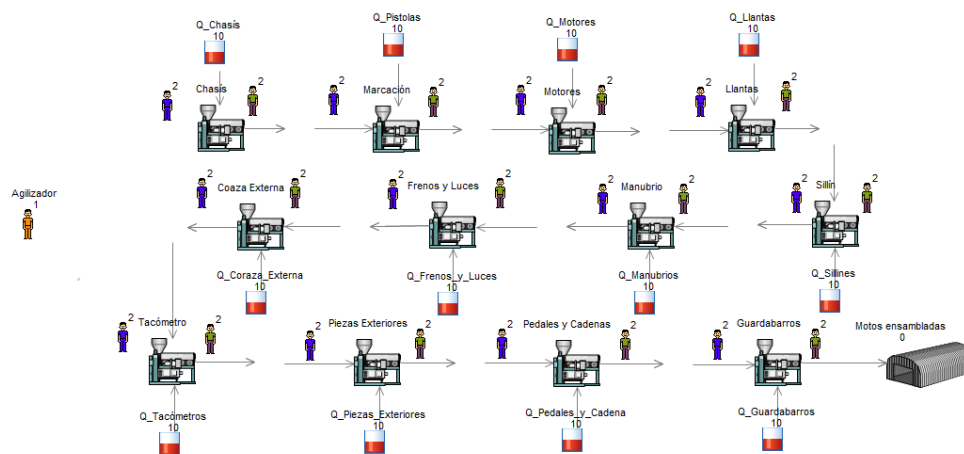


Figura 1: Modelo en SIMUL8

Utilizamos la herramienta Simul8 Professional para modelar nuestro sistema donde cada puesto de trabajo se subdividió en 3 actividades, cada una de estas representando el tiempo promedio de ensamble, el tiempo de retraso en el que se necesita del agilizador y una de estas que representa el tiempo de espera para pasar a la siguiente actividad, nuestra unidad de tiempo para simular fueron minutos, con un tiempo de simulación de 5163.226 y en el que no fue necesario calcular tiempo de calentamiento ya que al inicio de la simulación, es decir cuando las actividades no están llenas, los trabajadores pueden estar haciendo otro tipo de actividades y cada día, al finalizar la jornada, los puestos quedan con piezas para el día siguiente. Para este proceso, no fue necesario tener en cuenta la longitud de las motos como un factor de influencia ya que esta siempre es menor, en las referencias analizadas, al espacio que hay en la banda para contenerlas.

6. Obtención de Resultados

Por medio de múltiples reuniones con el gerente y el analista de datos encargados de la gestión de los procesos en la línea 3 de Auteco, decidimos que los tres tipos de motos a modelar serían las referencias Victory One, KYMCO Twist y KIMKO Advance GO, por lo que para ello se nos suministró una base de datos la cual contenía ciertos tiempos cronometrados para la producción dentro de la línea de ensamble de la referencia One, información producto de un estudio de producción anterior respecto a la creciente demanda de este producto, además de las demandas solicitadas para el último trimestre en que operaron,

candencia por tipos, esto es, número de motos fabricadas por hora según referencia, entre otros. Empezamos realizando una prueba de autocorrelación sobre los tiempos cronometrados de producción.

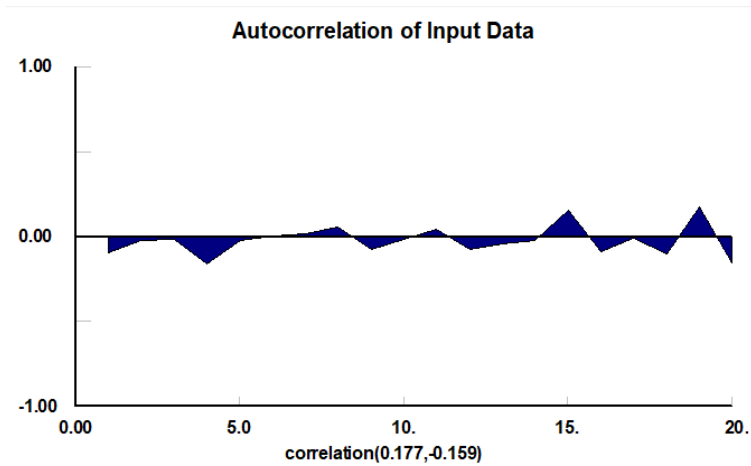


Figura 2: Prueba de autocorrelación

Gráficamente observamos que no están autocorrelados los datos, esto sería visible si algún valor fuera extremo.

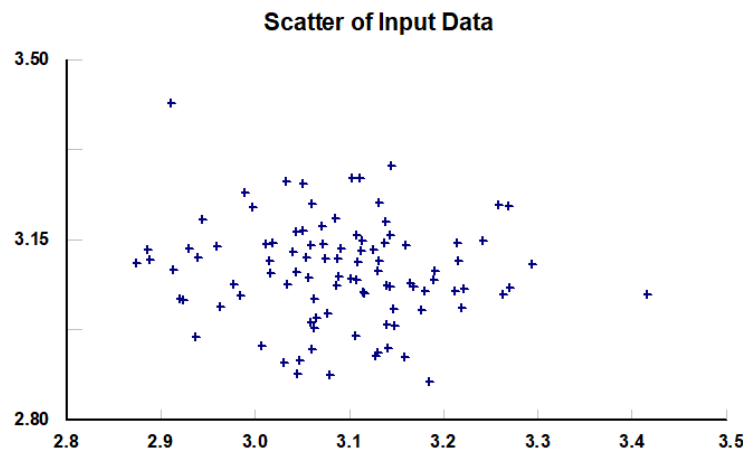


Figura 3: Scatterplot de los datos

De igual manera, los datos no son dependientes linealmente, pues este gráfico de dispersión no permite visualizar una estructura de dependencia entre ellos.

Se realizaron pruebas de bondad de ajuste y test como el Anderson-Darling y Smirnov-Kolmogorov para determinar la normalidad de estos datos, en particular, los tiempos de trabajo para el ensamble de la referencia One; y realizar la respectiva prueba de hipótesis. Usando el software STAT-FIT se obtuvo lo siguiente:

| autofit of distributions | | | |
|----------------------------------|---------|---------------|-----------|
| distribution | rank | acceptance | aicc prob |
| Weibull[2.82, 3.44, 0.298] | 99.9 | do not reject | 0.71 |
| Normal[3.09, 0.0869] | 98.6 | do not reject | 0.292 |
| Lognormal[-289, 5.68, 0.000298] | 98.6 | do not reject | 0.292 |
| Beta[2.88, 3.29, 2.46, 2.38] | 98.2 | do not reject | 0.684 |
| Triangular[2.87, 3.3, 3.11] | 90.9 | do not reject | 1 |
| Pearson 5[1.8, 212, 271] | 80.2 | do not reject | 0.155 |
| Rayleigh[2.88, 0.161] | 0.51 | do not reject | 0.0018 |
| Uniform[2.88, 3.29] | 0.00539 | reject | 0 |
| Power Function[2.88, 3.29, 1.28] | 0 | reject | 0 |

Figura 4: Distribuciones que se ajustan a la actividad

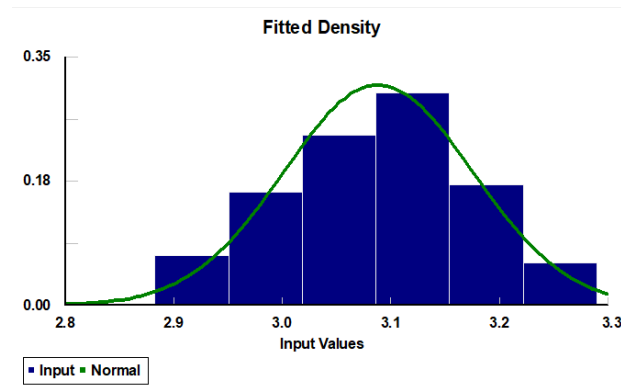


Figura 5: Densidad que se ajusta

Antes estos resultados podemos no rechazar nuestra hipótesis de normalidad sobre los tiempos de los operarios, es decir, no rechazamos normalidad.

| distribution | rank | acceptance | aicc prob |
|-----------------------------------|------|---------------|-----------|
| Weibull[2.01, 4.33, 0.42] | 100 | do not reject | 1 |
| Normal[2.39, 0.0999] | 94.5 | do not reject | 0.465 |
| Lognormal[-465, 6.15, 0.000214] | 94.4 | do not reject | 0.464 |
| Pearson 5[-0.128, 626, 1.58e+003] | 67.6 | do not reject | 0.19 |
| Beta[2.14, 2.67, 2.84, 3.14] | 17.3 | do not reject | 0.00645 |
| Triangular[2.12, 2.67, 2.39] | 6.79 | do not reject | 0.0118 |
| Uniform[2.14, 2.67] | 0 | reject | 0 |
| Rayleigh[2.13, 0.198] | 0 | reject | 0 |
| Power Function[2.14, 2.68, 1.09] | 0 | reject | 0 |

Figura 6: Distribuciones que se ajustan a la actividad

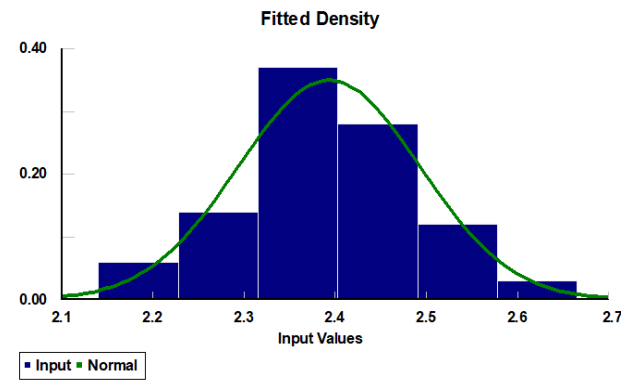


Figura 7: Densidad que se ajusta

Utilizando este esquema y conocimientos suministrados por profesores y expertos del tema, seleccionamos a su vez la distribución normal para modelar los tiempos de ensamble de las referencias Twist y Advance GO, dado que se tratan de trabajos estándares, utilizando como media el tiempo promedio de ensamble por tipo y ajustando una desviación de acuerdo al conocimiento del sistema y el supuesto de tiempos de retraso.

Una vez corroboradas estadísticamente nuestras hipótesis iniciales de los datos, era importante definir cuánto sería el tiempo de simulación. Para esto se tuvo en cuenta la demanda solicitada sobre los tres tipos de motos más vendidas, ONE, Agility y Twist. Usando los datos otorgados por los expertos, calculamos el número de motos producidas en un día para estas referencias y traducimos esa demanda a tiempo, es decir, cuántas motos producirían en un mes. Esto debido a que las demandas son trimestrales, pero por factores de simplificación se optó solo por un tercio de este tiempo. Siendo así, se simuló un mes, y para el cálculo del factor de rendimiento se tuvo en cuenta la demanda total de estas tres referencias de motos para ese período de tiempo. Dada la complejidad de la situación modelada es importante calcular cuál es el número adecuado de corridas necesarias para obtener resultados confiables. Usando el trial calculator incorporado en Simul8 y con el deseo de obtener un intervalo de confianza del 95 % se obtienen los siguientes resultados.

| Corridas recomendadas 5 % precisión | Número |
|-------------------------------------|--------|
| Motos ensambladas: Work completed | 6 |
| Operarios: Utilization % | 6 |
| Operarios ocio: Utilization % | 6 |
| Agilizador: Utilization % | 6 |

Valores que se esperaban fueran bajos, pues las distribuciones respecto a los tiempos de los operarios son muy similares entre sí.

A continuación, los valores obtenidos después de aplicar este número de corridas, y los respectivos valores de acuerdo al intervalo. La primera columna se refiere a "Low 95 % range", seguida del promedio y después "High 95 %"

| | | | | |
|------------------------|------------------|---------|---------|---------|
| Motos ensambladas | Number Completed | 1668.48 | 1669.33 | 1670.19 |
| Op_Chasis | Utilization % | 92.94 | 93.03 | 93.12 |
| Chasis_Ocio | Utilization % | 2.62 | 2.74 | 2.85 |
| Op_Marcación | Utilization % | 93.85 | 93.98 | 94.11 |
| Marcación_Ocio | Utilization % | 2.67 | 2.70 | 2.72 |
| Op_Llantas | Utilization % | 94.52 | 94.63 | 94.75 |
| Llantas_Ocio | Utilization % | 2.60 | 2.68 | 2.76 |
| Op_Sillín | Utilization % | 94.68 | 94.83 | 94.97 |
| Sillín_Ocio | Utilization % | 2.66 | 2.72 | 2.78 |
| Manubrio_Ocio | Utilization % | 2.59 | 2.70 | 2.81 |
| Op_Manubrio | Utilization % | 94.85 | 95.03 | 95.22 |
| Frenos y luces_Ocio | Utilization % | 2.68 | 2.75 | 2.82 |
| Op_Frenos y Luces | Utilization % | 95.14 | 95.24 | 95.34 |
| Coraza externa_Ocio | Utilization % | 2.62 | 2.69 | 2.76 |
| Op_Coraza Externa | Utilization % | 95.50 | 95.59 | 95.68 |
| Agilizador | Utilization % | 7.64 | 7.77 | 7.91 |
| Op_Tacómetro | Utilization % | 95.82 | 95.91 | 95.99 |
| Tacómetro_Ocio | Utilization % | 2.71 | 2.77 | 2.82 |
| Op_Piezas Exteriores | Utilization % | 96.48 | 96.57 | 96.65 |
| Piezas exteriores_Ocio | Utilization % | 2.67 | 2.74 | 2.81 |
| Op_Pedales_y_cadena | Utilization % | 96.08 | 96.25 | 96.41 |
| Pedales y cadena_Ocio | Utilization % | 9.47 | 9.56 | 9.65 |
| Op_Guardabarros | Utilization % | 96.89 | 96.95 | 97.00 |
| Guardabarros_Ocio | Utilization % | 2.63 | 2.70 | 2.77 |

Figura 8: Resultados de acuerdo al número de corridas

Uno de los propósitos del trabajo es alcanzar productividad del 95% en la línea, el cual puede ser obtenido teniendo en cuenta un factor de rendimiento, esto es, número de motos producidas en un período de tiempo, dividido el número de motos demandadas para ese mismo período. Al terminar nuestra simulación, obtuvimos una producción de 1668 motos, donde la demanda era 1851.

$$R = \frac{\text{Producidas}}{\text{Requeridas}} = \frac{1668}{1851} = 0,9011$$

Con un rendimiento del 90% observamos que se comporta como la línea de ensamble verdadera de Auteco, donde aún no se logra aumentar este nivel, esto se analizará más a fondo en el apartado de validación. Al no lograrse el total de motos esperadas se deben realizar cambios dentro de la línea o del proceso en su defecto, que permitan aumentar el rendimiento, situación que se trabaja en el apartado de experimentación. Otro aspecto importante es el tiempo de ocupación de los operarios, pues se buscaba que fuera cercano o mayor al 90%, característica que se cumple perfectamente, todos los operarios superan este valor. A continuación algunos de ellos.

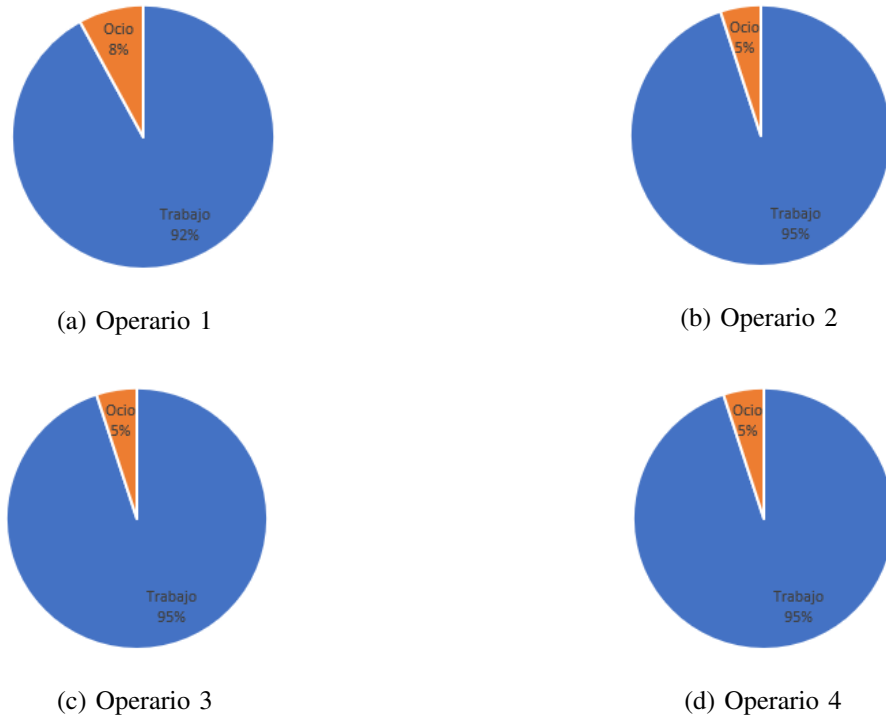


Figura 9: Porcentaje de ocupación para diferentes operarios

Es importante mencionar que los expertos de Auteco consideraban que se les presentaba un problema de ocupación a la hora de ensamblar las motos, y que esto era lo que evitaba alcanzar el rendimiento esperado. Al analizar los datos de salida del modelo, y los tiempos de ocupación de los operarios, el problema no está en los operarios. Si bien ya se cumple la meta de evitar valores grandes en el porcentaje de ocio, se deben plantear otras alternativas, dentro de la experimentación, para así alcanzar la cota necesaria. Otro factor que vale la pena mencionar es la ocupación del agilizador, un operario que se encarga de mantener los tiempos lo más estables posibles, donde alguien se esté atrasando.

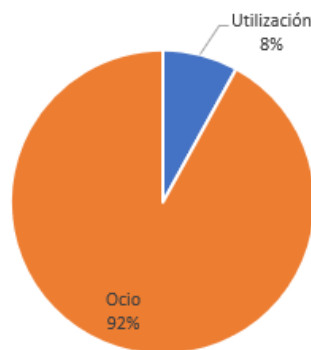


Figura 10: Tiempo de ocupación del agilizador

Sabemos que este operario solo trabaja cuando hay algún atraso, solo está ocupado el 8% del tiempo, si bien es un valor un poco alto, no es tan significativo, porque este operario puede ayudar en todas las estaciones y significa que los demás no se están atrasando de maneras inusuales, además podemos concluir

que cuando algún operario está atrasado el agilizador está ahí para ayudar, y así mantener la productividad en la línea lo más alta posible. Situación que refleja la línea de producción real de Auteco, donde los operarios de ensamble al apretar un botón llaman al agilizador para mantener el ritmo de trabajo.

7. Verificación y Validación

Para el proceso de verificación del modelo era muy importante reconocer si las actividades simuladas se estaban haciendo de manera simultanea, es decir, que el programa no esperara a completar una actividad para continuar a la siguiente sino que este fuera capaz de reconocer qué actividades se debían hacer de manera simultanea. Para esto modelamos diez motos y, guardando los tiempos de ensamble para cada actividad, calculamos el tiempo que la simulación debía demorarse operando estos, nuestro resultado fue de un poco más de una hora, el cual concordaba con lo reportado por el reloj de Simul8. Utilizamos en varias ocasiones la corrida del modelo por pasos para ver que los recursos sí estuvieran siendo asignados en cada actividad cuando era necesario, que nunca se procesara más de una moto en cada actividad y, con ayuda de marcadores en los códigos de Visual Logic, el lenguaje para programar en Simul8, que la asignación de variables, los resultados y todos los datos procesados fueran tratados de la manera adecuada.

Para la validación de nuestro modelo tuvimos ciertos problemas debido que la información suministrada por la empresa estaba, la mayoría, basada en promedios o estos eran generales respecto a todas las motos que produce la línea. E este punto utilizamos los datos de la siguiente tabla correspondientes a los suministrados por los expertos.

| Datos para el proceso de simulación | | | |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Tipo de moto | | |
| | Ones | Twist | Advance GO |
| Longitud | 1910 mm | 1860 mm | 1940 mm |
| Motos por lote | 149 | 132 | 132 |
| Max. Lotes consecutivos | 3 | 3 | 3 |
| Demanda por mes | 936 | 308 | 607 |
| Tiempo de ensamble (%) | 3.083 | 2.375 | 2.375 |
| Cadencia | 27 motos/hora | 24 motos/hora | 27 motos/hora |

| | |
|--------------------------|-----------|
| Longitud del día | 9.6 horas |
| Longitud de banda | 2100 mm |
| Núm. Trabajadores | 24 |
| motos por día | 144 (%) |

Figura 11: Datos suministrados por la empresa

Como pudimos ver en la sección anterior, la efectividad de del modelo para la simulación hecha fue de 0,9011, dato que por lo que conocemos de los procesos de la empresa es acorde a sus operaciones habituales pues este siempre se mantiene por encima del 82 %, además la cantidad de motos producidas de 1669 en promedio es mayor a la cantidad producida en promedio de todas las motos, que es 1290;este último dato fue obtenido con el producto del tiempo por día para ensamblar estos modelos y el promedio de motos ensambladas por día. y además vemos que es menor a la suma de las demandas, lo que se espera por la efectividad. Vale aclarar que este promedio de motos ensambladas por día está basado en todos los modelos por lo que es muy sensible a aquellas motos que tengan una producción diaria mucho menos por lo que no es tan confiable. Podemos ver que los tiempos de utilización de los empleados es muy alto, lo cual tiene sentido al tratarse de una línea de producción en la que todo el tiempo está en movimiento, y además, por lo conocido respecto al uso del agilizador, este es un recurso el cual tiene un porcentaje de ocupación

bajo ya que solo se utiliza cuando es solicitado y por eso suele representar otro tipo de actividades en el sistema, como pueden ser abastecimiento de piezas, repuestos, etc.

8. Análisis de Sensibilidad y Experimentación

8.1. Análisis de sensibilidad

Utilizando SIMUL8 y su opción para realizar un análisis de sensibilidad obtenemos lo siguiente:

| | Motos ensambladas: Number Completed |
|-------------------|-------------------------------------|
| Normal Trial | 1661,483092 |
| | 1667,333333 |
| | 1673,183575 |
| Dist_type1: -10 % | 1803,833333 |
| 10 % | 1576 |
| Sensitivity | 19,47213125 |
| Beyond Confidence | 1 |
| Dist_type2: -10 % | 1594,666667 |
| 10 % | 1640 |
| Sensitivity | 3,874484053 |
| Beyond Confidence | 1 |
| Dist_type3: -10 % | 1658,333333 |
| 10 % | 1648,833333 |
| Sensitivity | 0,81193232 |
| Beyond Confidence | 1 |

Notemos que los valores de las motos ensambladas dependen mucho de las distribuciones de tiempo iniciales. Esto es claro, ya que estas distribuciones se refieren al tiempo que tardan en realizar un proceso de ensamble sobre la moto, por eso, se observa un aumento notorio del número de motos ensambladas cuando la distribución de tiempo se reduce en un 10%. Además, como todos los valores son mayores o cercanos a 1, se concluye que el modelo es bastante sensible a los datos de entrada.

8.2. Diseño de experimentos

En esta sección buscaremos diseñar, analizar y proponer diferentes escenarios posibles dentro del modelo en los cuales se pretende encontrar una alternativa que permita alcanzar los objetivos propuestos en la definición del modelo conceptual.

Para esto se han creado dos experimentos, uno de ellos enfocado en los factores experimentales número de agilizadores y número de operarios en cada puesto. Este último, al estar trabajando un sistema CONWIP debe ser igual para todos los puestos para que no hayan adelantos o retrasos en la línea.

8.2.1. Experimento de dos factores: agilizadores y operarios

Para este primer escenario lo que se busca es encontrar una alternativa, modificando el número de trabajadores, en la que la producción de motos se incremente pero que a su vez se mantenga la utilidad del trabajador por encima del 90%, con un tiempo de ocio bajo y que además se logre una efectividad de al menos el 95%.

Utilizando la opción de Scenario Manager que nos ofrece Simul8 hemos diseñado los posibles escenarios factibles en un espacio de solución compuestos por las posibilidades de tener uno o dos agilizadores y además, poder tener 2 o 4 trabajadores en cada puesto.

Para cada posible combinación analizamos los valores mínimos y máximos para el tiempo de ocio, con sus respectivos intervalos de confianza, y esto fue lo obtenido.

| Diseño de experimentos de dos factores para operarios y agilizadores | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------|--------------------------|----------|------------|-------------------|----------|------------|
| Num. Agilizadores | Num. Operarios | Tipo de dato | Utilización de operarios | | | Ocio de operarios | | |
| | | | Low (95%) | promedio | High (95%) | Low (95%) | promedio | High (95%) |
| 1 | 2 | Mínimo | 92.94 | 93.03 | 93.12 | 2.6 | 2.68 | 2.76 |
| | | Máximo | 96.89 | 96.95 | 97 | 2.71 | 2.77 | 2.82 |
| 2 | 2 | Mínimo | 92.7 | 92.81 | 92.93 | 2.67 | 2.85 | 3.02 |
| | | Máximo | 96.77 | 96.81 | 96.85 | 2.81 | 2.94 | 3.08 |
| 1 | 4 | Mínimo | 32.67 | 32.72 | 32.77 | 16.58 | 17.04 | 17.5 |
| | | Máximo | 67.18 | 67.86 | 68.53 | 33.72 | 34.63 | 35.54 |
| 2 | 4 | Mínimo | 32.67 | 32.72 | 32.77 | 16.57 | 17.04 | 17.5 |
| | | Máximo | 66.69 | 67.33 | 67.98 | 34.8 | 35.05 | 35.31 |

Figura 12: Resultados máximos y mínimos de utilización y ocio

Aquí podemos ver claramente cómo es que al aumentar el número de trabajadores no tendría un beneficio en el porcentaje de ocupación y ocio ya que la proporción obtenida no alcanza la esperada y lo único que significa esta es que hay mucho personal para las tareas necesarias. Además también podemos ver que el tener otro agilizador lo que hace es reducir en corta medida el porcentaje de ocupación de los trabajadores y por lo tanto aumentar su ocio, aunque esta afectación sigue cumpliendo con los porcentajes establecidos como objetivo.

Por otro lado, quisimos también analizar la producción de motos por día, efectividad y tiempo necesario para cumplir las demandas, donde los resultados se muestran a continuación

| Num. Agilizadores | Num. Operarios | Low (95%) | Motos Producidas | High (95%) | Efectividad | Motos por día (%) | necesario para objetivo |
|-------------------|----------------|-----------|------------------|------------|-------------|-------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 1668 | 1669 | 1670 | 0.90167477 | 186 | 5460.61 |
| 2 | 2 | 1747 | 1749 | 1750 | 0.944894652 | 188 | 5400.12 |
| 1 | 4 | 2448 | 2448 | 2448 | 1.322528363 | 320 | 3441.5 |
| 2 | 4 | 2448 | 2448 | 2448 | 1.322528363 | 320 | 3,413.0 |

Figura 13: Producción de motos en un mes y eficiencia

En la tabla anterior podemos ver que aumentar el número de operarios en cada puesto solo genera una sobreproducción de motos las cuales no están siquiera proyectadas para la venta. Además, podemos ver que el utilizar dos agilizadores en vez de uno sí aumenta en buena proporción la efectividad, estando muy cerca del 95 % esperado.

8.2.2. Experimento para órdenes de ensamble

Una particularidad que pudimos notar al conocer el proceso de ensamble en Auteco, y basado en información que el gerente nos suministró, es que dependiendo del tiempo promedio de ensamble para cada tipo de moto, cuando se produce un cambio de lote pueden surgir tiempos de ocio en los trabajadores que terminan sus ensambles en motos con menor tiempo promedio y algún otro operario aún no termina con aquella que tiene un tiempo mayor. En este caso estos problemas se podrían presentar cuando cambiamos la producción de una moto One (tipo 1) a cualquiera una Twist (tipo 2) o Advance GO (tipo 3). Por lo que nos interesa ver el comportamiento del sistema respecto a diferentes órdenes.

Los órdenes que vamos a considerar se basaron en un proceso de análisis manual en el que descartamos ciertas posibilidades irrelevantes, como las que hicieran permutaciones en órdenes que no afectarían el sistema, y además eliminamos algunas de las cuales no eran factibles, como las que ensamblaran más de 3 lotes seguidos de una misma moto o en las que no se realizaba un lote completo. A continuación se puede ver un análisis de lotes necesarios para alcanzar la producción y los órdenes a considerar.

| Tipo | Unidades por lote | Total necesarios | Lotes necesarios | Lotes máximos |
|------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| 1 | 140 | 1151 | 8.221428571 | 9 |
| 2 | 132 | 483 | 3.659090909 | 4 |
| 3 | 132 | 628 | 4.757575758 | 5 |

Figura 14: Lotes necesarios para producir las motos planeadas

Con los datos anteriores, se utilizaron los lotes máximos para construir los órdenes siguientes

| Escenarios posibles | |
|---------------------|--|
| Situación 1 | Un solo lote por vez para cada tipo |
| Órdenes posibles | 1-2-3-1-2-3-1-2-3-1-1-3-1-1-1-3-2-1 |
| | 2-1-3-1-2-1-3-1-2-3-1-3-1-1-1-3-2-1 |
| Situación 2 | Posibilidad de dos lotes para cada tipos |
| Órdenes posibles | 1-1-2-2-3-3-1-1-1-2-3-3-1-1-1-3-2-1 |
| | 2-1-1-2-3-1-1-3-2-1-1-3-1-1-3-3-2-1 |
| Situación 3 | Posibilidad de 3 lotes para cada tipos |
| Órdenes posibles | 1-1-1-2-2-2-3-3-3-1-1-1-3-1-1-3-2-1 |
| | 2-2-2-1-1-1-3-3-3-1-1-1-3-1-1-3-2-1 |
| Situación 4 | Posibilidad de combinar las cantidades |
| Órdenes posibles | 1-1-1-3-3-2-1-1-1-3-3-2-1-1-2-3-2-1 |
| | 3-3-1-1-1-2-1-1-1-3-3-2-2-1-1-3-2-1 |

Figura 15: Órdenes considerados en el proceso de experimentación

Luego de implementar una a una de las posibilidades para los diferentes órdenes de entrada de los lotes, se corrieron las seis pruebas necesarias para tener un intervalo de confianza del 95 % y los resultados para máximos y mínimos en el porcentaje de utilización y ocio fueron los siguientes

| Diseño de experimentos para órdenes de ensamble | | | | | | | |
|---|--------------|--------------------------|----------|------------|-------------------|----------|------------|
| Situación | Tipo de dato | Utilización de operarios | | | Ocio de operarios | | |
| | | Low (95%) | promedio | High (95%) | Low (95%) | promedio | High (95%) |
| 1.1 | Mínimo | 92.36 | 92.38 | 92.34 | 2.67 | 2.83 | 2.99 |
| | Máximo | 96.77 | 96.82 | 96.86 | 2.87 | 2.96 | 3.05 |
| 1.2 | Mínimo | 91.97 | 92.09 | 92.21 | 2.67 | 2.82 | 2.98 |
| | Máximo | 96.78 | 96.82 | 96.87 | 2.87 | 2.95 | 3.03 |
| 2.1 | Mínimo | 92.49 | 92.41 | 92.74 | 2.68 | 2.83 | 2.99 |
| | Máximo | 96.76 | 96.81 | 96.86 | 2.81 | 2.94 | 3.06 |
| 2.2 | Mínimo | 92.36 | 92.5 | 92.63 | 2.64 | 2.79 | 2.94 |
| | Máximo | 96.82 | 96.87 | 96.92 | 2.81 | 2.9 | 3 |
| 3.1 | Mínimo | 92.4 | 92.53 | 92.66 | 2.79 | 2.84 | 2.89 |
| | Máximo | 96.77 | 96.81 | 96.86 | 2.98 | 3.07 | 3.17 |
| 3.2 | Mínimo | 92.63 | 92.63 | 92.69 | 2.68 | 2.83 | 2.99 |
| | Máximo | 96.77 | 96.81 | 96.89 | 2.88 | 2.96 | 3.04 |
| 4.1 | Mínimo | 92.54 | 92.74 | 92.95 | 2.65 | 2.79 | 2.94 |
| | Máximo | 96.82 | 96.86 | 96.9 | 2.77 | 2.9 | 3.02 |
| 4.2 | Mínimo | 92.39 | 92.53 | 92.68 | 2.79 | 2.84 | 2.89 |
| | Máximo | 96.77 | 96.81 | 96.86 | 2.99 | 3.08 | 3.17 |

Figura 16: Resultados máximos y mínimos para la utilización y el ocio

Podemos ver que el orden que produce un mayor porcentaje de utilización es el 4.1, puesto que este es mayor que todas las otras opciones siempre, sin embargo, para los porcentajes de ocio tenemos que la opción 4.1 y la 2.2 presentan un valor medio mínimo igual, donde tenemos el siguiente intervalo de confianza para sus diferencias.

| intervalo de confianza para la mejor decisión | | |
|---|-------|-------|
| min | -0.01 | 0 |
| max | 0.04 | -0.02 |

Figura 17: Intervalo de confianza para determinar opción mínima

Podemos ver que como el intervalo incluye el cero, no se puede determinar cuál de las dos opciones es siempre mejor. Sin embargo, dado que las diferencias estadísticas entre este ocio es tan baja, y por el contrario el porcentaje de utilización sí es mucho mejor en el caso 4.1, esta será considerada como el mejor orden entre los analizados para la ocupación y el ocio.

Realizando la tabla de resultados para la producción de motos con las anteriores combinaciones tenemos

| Orden | Low (95%) | Motos Producidas | High (95%) | Efectividad | Motos por día (%) | necesario para objetivo |
|-------|-----------|------------------|------------|-------------|-------------------|-------------------------|
| 1.1 | 1741 | 1742 | 1743 | 0.941112912 | 195 | 5523.9 |
| 1.2 | 1735 | 1737 | 1739 | 0.938411669 | 194 | 5542.4 |
| 2.1 | 1743 | 1746 | 1748 | 0.943273906 | 196 | 5505.1 |
| 2.2 | 1712 | 1714 | 1715 | 0.925985954 | 190 | 5605.7 |
| 3.1 | 1743 | 1744 | 1745 | 0.942193409 | 194 | 5504.5 |
| 3.2 | 1743 | 1744 | 1746 | 0.942193409 | 194 | 5513.4 |
| 4.1 | 1716 | 1718 | 1720 | 0.928146948 | 191 | 5597.4 |
| 4.2 | 1743 | 1744 | 1745 | 0.942193409 | 191 | 5512.2 |

Figura 18: Producción y efectividad para cada uno de los órdenes posibles

Podemos ver que el mayor valor de efectividad lo conseguimos con el orden 2.1 con una producción de 1746 motos en el mes. Dado a que todas los órdenes presentes cumplen el tener un porcentaje de ocupación por encima del 90% y un porcentaje de ocio relativamente bajo, a pesar de que la opción 2.1 no es la mejor respuesta para estos porcentajes mencionados, será la opción que se considerará mejor para análisis posteriores.

8.2.3. Experimento de mejores respuestas

Como podemos observar, ninguno de los dos escenarios anteriores nos permiten alcanzar aún la efectividad esperada de al menos el 95%, por lo que propondremos un tercer escenario en el que se analizarán las mejores respuestas de los dos anteriores.

Para esto simulamos nuestro proceso para con dos trabajadores por puesto y dos agilizadores (mejor respuesta del primer experimento) y el orden 2.1 (mejor respuesta del segundo experimento) para ver si se alcanza la efectividad esperada. Los resultados obtenidos fueron los siguientes

| Intervalo de confianza para mejor opción en ambos experimentos | | | | |
|--|-----|-------------|------------|-------------|
| Factores | | Low (95%) | Mean | High (95%) |
| Utilización (%) | Min | 93.19 | 93.3 | 93.42 |
| | Max | 96.74 | 96.79 | 96.84 |
| Ocio (%) | Min | 2.7 | 2.86 | 3.01 |
| | Max | 2.89 | 2.98 | 3.06 |
| Motos producidas | | 1754 | 1757 | 1760 |
| Efectividad | | 0.947595894 | 0.94921664 | 0.950837385 |

Figura 19: Resultados

Sin embargo, en esta última alternativa tenemos que el porcentaje de ocupación del agilizador se rebajó al 4%, lo cual era de esperarse pues este trabaja la mitad del tiempo de antes. este resultado podemos verlo en la siguiente gráfica de ocupación.

Porcentaje de utilización del agilizador

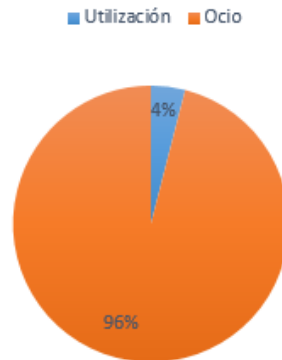


Figura 20: Resultados

8.2.4. Análisis de resultados

Luego de realizar las anteriores experimentaciones podemos ver que solo cambiando el número de agilizadores no se alcanza la efectividad esperada, así mismo, cambiar el orden de la producción de las motos tampoco hace que el objetivo propuesto se cumpla. Al hacer el tercer escenario, donde consideramos las dos mejores respuestas de los anteriores, podemos ver que tenemos una efectividad del 94,49 % con un intervalo de confianza bastante apropiado por el cual podríamos decir que implementado estas dos mejores respuestas se podría alcanzar el objetivo. Además, si analizamos los valores mínimos y máximos podemos ver que el porcentaje de utilización de los operarios es mayor a los promedios encontrados en todos los escenarios anteriores, por lo que tenemos más certeza de que estamos en una solución que nos mejora el comportamiento del ensamble.

Para entender un poco el porqué del resultado obtenido, sabemos que los trabajadores en el sistema inicial tienen un porcentaje de ocupación muy alto ya que estos no deben esperar a que ciertas piezas lleguen de manera aleatoria cada cierto tiempo sino que al ser una línea de producción los trabajos son constantes. Al tener dos agilizadores los tiempos de ocio se disminuyen igualmente ya que el tiempo de espera por retrasos en el ensamble se reducen a la mitad. También el orden que hemos analizado es uno muy bueno ya que la moto One, de tipo 1, tiene un tiempo de ensamble mayor a las demás lo cual podría retrasar el proceso, sin embargo, como estas se están produciendo en dos o tres lotes seguidos, y además están distribuidos a manera de que no interfieran en gran medida en la producción de los otros tipos, es decir, que entre dos lotes de otros tipos no se estén produciendo este tipo ya que aumenta los cambios de modelo, y por consiguiente, los tiempos de ocio.

Es importante analizar las implicaciones que tiene para la empresa contratar a otro agilizador sabiendo de antemano que el porcentaje de ocupación de estos será muy bajo. Para estos casos se recomienda tener estos trabajadores como un recurso que pueda servir en diferentes puestos independientes y que este sea llamado en el momento necesario, dándole prioridad al proceso de ensamble.

Debemos tener en cuenta que para el caso de las combinaciones aquí planteadas, estas fueron tomadas de manera manual y empírica en base a lo que se esperaba y suponía del comportamiento, por lo que se espera que se realice un proceso de optimización previo en el que se evalúen los posibles órdenes que puede tomar el modelo sujeto al número de lotes máximos consecutivos, además de que estos deben ensamblarse en su totalidad y buscando con esto maximizar el número de motos ensambladas manteniendo un porcentaje de utilización y ocio esperados.

9. Conclusiones y recomendaciones

Luego de realizar un análisis exploratorio de situaciones en el proceso de simulación y verificar que el sistema real está explicado en buena medida por el modelo, podemos concluir que es posible mejorar la eficiencia de la línea de producción desde que los elementos que influyen en el proceso se estén realizando de la mejor manera posible, tales como el orden de ensamble y la importancia de las implicaciones que conlleva mezclar referencias de motos, adicionalmente es claro que en todos los sistemas la mejor opción no es siempre aumentar el número de recursos, como lo fue en el caso de los operarios, ya que esto puede traer una sobreproducción, lo que significa pérdidas, y un porcentaje de ocio muy alto. Con este ejemplo fue claro el cómo manejar sistemas grandes que tienen un comportamiento estable desde soluciones mucho más centradas en el mismo comportamiento interno de la misma y no con nuevas alternativas que cambien por completo el funcionamiento. Para este punto queda clara la relevancia de utilizar Simulación de Eventos Discretos en sistemas en los cuales el comportamiento cambia respecto a entradas individuales, pues aquí podemos apreciar el proceso de ciertas entidades que se desarrollan dependiendo de sus tipos y así identificar fallas estancamientos, fallas, retrasos o inconsistencias mucho más específicas que no podríamos analizar utilizando dinámica de sistemas, por poner de ejemplo. aquí también podemos hablar de la importancia de una buena toma de decisiones que nos permite este tipo de simulación, puesto como vimos en la última parte del documento, un proceso de optimización es muy útil en la obtención de una mejor respuesta, pero este se queda corto en la posibilidad de saber qué tan rentables son las medidas respecto al costo-beneficio, como es claro el caso de implementar un nuevo agilizador, en el que se debe entrar a analizar las implicaciones de aumentar este recurso.

Referencias

- Kuncova, M. and M. Zajoncova (2018). Discrete event simulation usage to model and optimize the production line. *MM Science Journal*, 2325–2332.
- Yang, T., Y.-H. Hung, and K.-C. Huang (2019). A simulation study on conwip system design for bicycle chain manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* (13), 2477–2481.