



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PREPARACIÓN Y CAMBIO DE
MODELOS DE PRODUCTO EN UNA EMPRESA DEL SECTOR
AUTOMOTRIZ A TRAVÉS DE SMED, SIMULACIÓN DE EVENTOS
DISCRETOS Y ALGORITMOS GENÉTICOS”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL

PRESENTA:

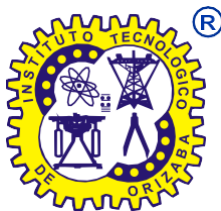
Ing. Alejandro López Herrera

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre

CODIRECTOR DE TESIS EXTERNO:

M.I.I. Marco Antonio Rojas Luna



Dedicatorias

Papás. Alejandro y Rosa María.

A ti mamá, te dedico este gran logro que siempre te compartí como una meta que quería alcanzar en mi vida profesional, esto te lo debo en gran parte a ti por siempre cuidarme y estar presente con tus oraciones. Te dedico este grado de máster en Ingeniería Industrial por todas las veces que me escuchaste y me diste tu apoyo, también con la finalidad de que tengas por seguro que voy a seguir esforzándome para devolverte un poco de todo tu amor que siempre me has dado.

A ti papá, que desde niño me enseñaste y aconsejaste por medio del ejemplo que, con esfuerzo, humildad y mucha dedicación se pueden alcanzar grandes cosas. Por todo el apoyo que siempre tuve de tu parte, te dedico este máster en Ingeniería Industrial con el único motivo de hacerte sentir orgulloso y que la meta que desde niño me inculcaste se logró gracias a que siempre estas para nosotros en cada paso que damos. Los amo.

Hermana Rossana.

A ti hermana, te dedico esta maestría por ser siempre mi ejemplo y mi apoyo desde toda mi vida. En cada momento importante siempre te he sentido cerca, con tus cuidados, con tus palabras y esta vez quiero dedicarte este gran logro por todo ese apoyo y comprensión que siempre he recibido por parte de mi gran hermana mayor.

Abuelitos.

A ustedes Abuelitos, les dedico este máster en Ingeniería Industrial hasta el cielo, sé que desde allá me siguen cuidando y orando por mí. Siempre los tengo presentes.

Agradecimientos

Dios. Por darme esta vida llena de muchas bendiciones, por siempre estar presente y ayudarme a crecer en lo profesional y en lo personal. Todos mis logros son por ti y para ti.

Papás. Por siempre brindarme un hogar y nunca dejarme solo, por todo el apoyo económico que sé que conlleva mucho esfuerzo. Siempre voy a estar eternamente agradecido.

Hermana. Por siempre estar ahí para escucharme y darme un consejo, tu diferente perspectiva tanto profesional como personal me han ayudado en todo momento.

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre. Por todo su apoyo y asesoramiento a lo largo del desarrollo de este proyecto. Un profesor que me supo transmitir sus conocimientos, puntos de vista y sobre todo una amplia variedad de técnicas que fueron un motivante para investigar y conocer más sobre ellas.

Amigos. Por ser siempre sinceros a la hora de brindarme su opinión y por todos sus consejos. A mis amigos de años por ser parte importante en mi vida y compartir muy buenas experiencias que me han hecho feliz. A mis amigos de la maestría que sin su apoyo en las materias y trabajos se me hubiera complicado lograr alcanzar esta meta.

Maestros de la M.I.I. Por siempre mostrar una pasión por enseñar y compartir su experiencia a lo largo de mi preparación en esta maestría. Especialmente al **Mtro. Constantino**, dado que su apoyo y sus enseñanzas también fueron parte fundamental para el desarrollo de este proyecto.

Especial agradecimiento al **M.I.I. Marco Antonio Rojas Luna** quien me abrió las puertas de la empresa para desarrollar mi proyecto y que durante mis visitas a la planta siempre estuvo al pendiente y me dio total libertad para tomar la información que necesitara.

Resumen

El presente trabajo mostrará una metodología compuesta por la implementación del SMED, Simulación de Eventos Discretos y optimización por medio de Algoritmos Genéticos dentro de una línea de producción que fabrica vidrio lateral para diferentes modelos de automóvil. Dentro de esta línea de producción se presenta un área de oportunidad en el proceso de cambio de corrida, dado que no existe una estandarización de las actividades y esto genera que entre cada operador exista una variación considerable de sus tiempos de acción y de igual manera esto ocasione tiempos muertos dentro del proceso.

Por lo que en este proyecto se desarrollará la metodología que ayude a eliminar o reducir estos tiempos muertos y de igual manera, que el proceso tenga una estandarización de las actividades de cada operador.

Empezando por una Simulación de Eventos Discretos, se desarrollará un modelo con ayuda del programa SIMIO Simulador que represente el proceso actual de la empresa, esto con la finalidad de conocer más a fondo el sistema y así obtener otra perspectiva de las actividades que realizan los operadores. Una vez teniendo este primer modelo de simulación se implementa la técnica SMED, donde se expondrá de forma detallada el análisis y el procedimiento que se siguió al desarrollar esta técnica para la reducción y estandarización de las actividades y para la observación detallada del nuevo sistema, se genera un segundo modelo de simulación que represente las mejoras obtenidas al implementar el SMED. Por último, se presenta la optimización del segundo modelo de simulación por medio de Algoritmos Genéticos dentro del programa @Risk Optimizer para la estandarización de rutas que deben seguir los operadores.

El análisis de resultados nos ayudará a comprender el impacto de esta metodología propuesta, aprovechando las ventajas que se tienen al utilizar estas tres técnicas en conjunto y poder así observar el alcance del proyecto.

Resumen

The present work will show a methodology composed of the implementation of SMED, Discrete Events Simulation and optimization by Genetic Algorithms within a production line that manufactures side glass for different car models. In this production line there is an opportunity area in the process of change of model, since there is no standardization of activities, and this generates that between each operator there is a considerable variation of their action times and in the same way this causes downtime within the process.

So, in this project the methodology will be developed that helps eliminate or reduce these downtimes and in the same way, that the process has a standardization of the activities of each operator.

Starting with a Discrete Event Simulation, a model will be developed with the help of the SIMIO Simulator program that represents the current process of the company, to know more about the system and thus obtain another perspective of the activities carried out by the operators. Once this first simulation model is realized, the SMED technique is implemented, where the analysis and the procedure followed when developing this technique for the reduction and standardization of activities and for the detailed observation of the new system will be presented in detail, a second simulation model is generated that represents the improvements obtained when implementing the SMED. Finally, the optimization of the second simulation model is presented by means of Genetic Algorithms within the @Risk Optimizer program for the standardization of routes that operators must follow.

The analysis of results will help us to understand the impact of this proposed methodology, taking advantage of the advantages of using these three techniques together and thus be able to observe the scope of the project.

Índice general

Introducción	14
Planteamiento del problema.	16
Objetivos	17
General	17
Específicos	17
Justificación.....	18
Metodología	19
Capítulo I.....	22
1.1. Introducción.	22
1.2. Generalidades de la empresa.	22
1.2.1. Misión.	23
1.2.2. Visión.	24
1.3. Generalidades del proyecto.	24
1.4. Conclusiones.	26
Capítulo II	27
2.1. Introducción	27
2.2. Estadística.	27
2.3. Probabilidad.	28
2.4. Lean Manufacturing.	29
2.4.1. Antecedentes.	29
2.4.2. Estructura del Sistema Lean.	30
2.5. SMED (Single Minute Exchange of Die).....	32
2.5.1. Antecedentes.	32
2.5.2. Metodología SMED.	32
2.6. Simulación.....	33
2.6.1. Metodología de la Simulación.....	34
2.7. Inteligencia artificial.	35
2.7.1. Algoritmos genéticos.....	35
2.7.1.1. Condiciones para una correcta implementación de algoritmos genéticos.	36
2.7.1.1.1. Codificación de las soluciones.	36
2.7.1.1.2. Creación de la población inicial.	37

2.7.1.1.3.	Función de evaluación.....	38
2.7.1.1.4.	Proceso de selección.....	38
2.7.1.1.5.	Operadores genéticos.	38
2.7.1.1.6.	Tratamiento de los individuos no factibles.....	39
2.7.1.1.7.	Criterio de parada.	39
2.8.	Conclusiones.	40
Capítulo III		41
3.1.	Introducción.	41
3.2.	Etapla 1: Diagnostico	42
3.2.1.	Recolección de datos.....	43
3.2.1.1.	layout del área de templado.....	44
3.2.1.2.	Cantidad de operadores que participan en cada área del proceso.....	45
3.2.1.3.	actividades realizadas por los operadores.....	46
3.2.1.4.	Medidas del área de templado.	47
3.2.1.5.	ubicación de herramienta y mesas de trabajo empleadas en el proceso.	48
3.2.1.6.	Grabaciones del proceso de cambio de corrida.	49
3.2.1.7.	Desglose de las actividades de los operadores en base al material documentado.	51
3.3.	Etapla 2: Primer modelo de simulación.....	57
3.3.1.	Programación del modelo de simulación.	58
3.3.2.	Vista 3D del modelo de simulación.	61
3.3.3.	Verificación y validación del modelo de simulación.	62
3.3.4.	Determinación del número óptimo de corridas en el modelo de simulación.	65
3.4.	Etapla 3: SMED.....	66
3.4.1.	Fase 1. Identificar actividades internas y externas.	66
3.4.2.	Fase 2. Convertir las actividades internas a externas.	74
3.4.3.	Fase 3. Organizar las actividades internas a externas.....	75
3.4.3.1.	Preparación previa de molde para comprobar medidas de corte.	75
3.4.3.2.	Preparación previa de broqueros para taladro.	76
3.4.3.3.	Desconectar solo una manguera para ajuste de posición de los fijadores neumáticos en máquina de pulido.	78
3.4.4.	Fase 4. Eliminar el set-up.....	80
3.4.4.1.	Juntar las puntas de las mangueras neumáticas.....	80
3.4.4.2.	Identificadores de color en mangueras neumáticas de fijadores de pieza para pulido. .	82
3.4.4.3.	Contar con piezas de cada modelo para el área de pintura.	83

3.4.4.4.	Inclusión de operador pintura al área de corte para realizar actividades en paralelo. ...	84
3.4.5.	Actividades de los operadores implementando mejoras de SMED.....	85
3.5.	Etapa 4: Segundo modelo de simulación para evaluar el SMED.....	97
3.5.1.	Programación del segundo modelo de simulación.....	98
3.5.2.	Determinación del número óptimo de corridas en el modelo de simulación.	101
3.6.	Etapa 5: Optimización del modelo mediante Algoritmos Genéticos.	102
3.6.1.	Desarrollo del modelo matemático.....	103
3.6.1.1.	Función objetivo.....	106
3.6.1.2.	Variables de decisión.	107
3.6.1.3.	Parámetros inciertos operadores de corte líneas 1 y 4.....	107
3.6.1.4.	Parámetros inciertos operadores de corte líneas 2 y 3.....	109
3.6.1.5.	Parámetros inciertos operadores de pintura.....	111
3.6.1.6.	Parámetros inciertos operadores de curvatura.....	112
3.6.1.7.	Valores deterministas de operadores de corte líneas 1 y 4.	113
3.6.1.8.	Valores deterministas de operadores de corte líneas 2 y 3.	113
3.6.1.9.	Valores deterministas de operadores de pintura.....	114
3.6.1.10.	Valores deterministas de operadores de curvatura.	114
3.6.1.11.	Rutas operadores del área de corte líneas 1 y 4.....	115
3.6.1.12.	Rutas operadores del área de corte líneas 2 y 3.....	117
3.6.1.13.	Rutas operadores del área pintura.	123
3.6.1.14.	Tiempos de espera del área de curvatura.....	124
3.6.1.15.	Tiempo total del área de curvatura.	124
3.6.1.16.	Restricciones del modelo.	125
3.6.1.16.1.	Restricción tiempo del proceso del área de curvatura.	125
3.6.1.16.2.	Restricción tiempo de espera de pieza de pintura a curvatura.....	125
3.6.1.16.3.	Restricción de rutas de operadores de pintura y corte líneas 2 y 3.....	126
3.6.2.	Optimización del modelo matemático.....	128
3.7.	Conclusiones.	130
Capítulo IV		132
4.1.	Introducción.	132
4.2.	Análisis de resultados del primer modelo de simulación.....	132
4.3.	Análisis de resultados del segundo modelo de simulación.....	136
4.4.	Análisis de resultados de la optimización del segundo modelo por AG.....	141
4.5.	Conclusiones.	144

Conclusión.....	145
Referencias Bibliográficas	148

Índice de figuras

Figura 1: Línea de mando del área de templado (López, 2023).	25
Figura 2: Representación de la estructura del sistema Lean. (Hernández & Vizán, 2013)	31
Figura 3: Diagrama de flujo del funcionamiento de los AG. (Lasserre, 2017)	40
Figura 4: Distribución de las zonas del área de producción de vidrio lateral (López, 2023).	42
Figura 5: Croquis del área de templado (López, 2023).	44
Figura 6: Medidas del área de templado (López, 2023).	48
Figura 7: Ubicación de elementos de trabajo (López, 2023).	49
Figura 8: Cambio R2 - Área de curvatura (López, 2023).	50
Figura 9: Cambio de brocas - Área de corte (López, 2023).	50
Figura 10: Ajuste de posición para impresión - Área de pintura (López, 2023).	50
Figura 11: Programación del proceso de cambio de corrida en SIMIO (López, 2023).	57
Figura 12: Programación Operador Pintura (López, 2023).	59
Figura 13: Programación Operador Corte: Línea 1 y 2 (López, 2023).	60
Figura 14: Programación Operador Curvatura y Montacargas (López, 2023).	60
Figura 15: Modelo 3D completo (López, 2023).	61
Figura 16: Operador buscando molde para comprobación de medidas perimetrales (López, 2023).	76
Figura 17: Operador del área de corte realizando el cambio de broca (López, 2023).	78
Figura 18: Operador del área de corte realizando el ajuste de posición desconectando 2 mangueras neumáticas (López, 2023).	79
Figura 19: Operador del área de corte realizando el ajuste de posición desconectando solo una manguera neumática (López, 2023).	79
Figura 20: Muestra de mangueras dispersas en guía para taladro (López, 2023).	81
Figura 21: Operador tomando las mangueras neumáticas correspondientes para conexión de guía para taladro (López, 2023).	81
Figura 22: Operador buscando manguera neumática para ajustar un fijador en área de pulido (López, 2023).	82
Figura 23: Operador trayendo pieza del área de corte para realizar ajustes (López, 2023).	83
Figura 24: Vista general del segundo modelo de simulación (López, 2023).	99
Figura 25: Nueva programación del operador del área de pintura (López, 2023).	100
Figura 26: Rutas posibles de los operadores de pintura (López, 2023).	104
Figura 27: Rutas posibles de los operadores de corte líneas 1 y 4 (López, 2023).	105
Figura 28: Rutas posibles de los operadores de corte líneas 2 y 3 (López, 2023).	105
Figura 29: Modelo matemático en Excel, AG @RiskOptimizer (López, 2023).	128
Figura 30: Definición del modelo, @RiskOptimizer (López, 2023).	129

Figura 31: Resultado de la simulación, SIMIO (López, 2023).	130
Figura 30: Resultado de la simulación del modelo en Excel, @RiskOptimizer (López, 2023).	130
Figura 31: Resultado de estadísticos de tiempos de espera en una simulación del modelo, SIMIO (López, 2023).	134
Figura 32: Resultado de estadísticos de llegada de operadores de corte y de pieza terminada en una simulación del modelo, SIMIO (López, 2023).....	135
Figura 33: Comparación de resultados del primer y segundo modelo de simulación (López, 2023).	138
Figura 34: Comparación de resultados de tiempos de espera del operador de curvatura (López, 2023).	139
Figura 35: Proceso de la optimización por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).	141
Figura 36: Resultado de optimización por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).	141
Figura 37: Rutas optimas del proceso de cambio de corrida, @RiskOptimizer (López, 2023).	142
Figura 38: Tiempo total del proceso optimizado por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).	143
Figura 39: Resultado de la simulación con cambio a rutas optimas, SIMIO (López, 2023).	143

Índice de tablas

Tabla 1: Número de operadores que participan en el cambio de corrida para cada zona.....	45
Tabla 2a: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores.....	46
Tabla 2b: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores.....	47
Tabla 3a: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.....	52
Tabla 3b: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.....	53
Tabla 3c: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.....	54
Tabla 4: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de pintura.	55
Tabla 5a: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de curvatura.....	55
Tabla 5b: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de curvatura.....	56
Tabla 6: Tiempos de 20 cambios de modelo y resultado de las 20 corridas de modelo de simulación en SIMIO.....	63
Tabla 7: Resultado de las 10 replicaciones del modelo de simulación.	65
Tabla 8a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.....	67
Tabla 8b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.....	68
Tabla 8c: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.....	69
Tabla 8d: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.....	70
Tabla 8e: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.....	71
Tabla 9a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de pintura....	71
Tabla 9b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de pintura. ..	72
Tabla 10a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de curvatura.	72
Tabla 10b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de curvatura.	73
Tabla 11a: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED. 85	
Tabla 11b: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED. 86	
Tabla 11c: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED. 87	
Tabla 11d: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED. 88	
Tabla 11e: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED. 89	
Tabla 12a: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED. 90	
Tabla 12b: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED. 91	
Tabla 12c: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED. 92	
Tabla 12d: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED. 93	
Tabla 12e: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED. 94	
Tabla 13: Actividades de los operadores de pintura con la implementación del SMED.	95

Tabla 14a: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores con SMED.	97
Tabla 14b: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores con SMED.	98
Tabla 15: Resultado de las 10 replicaciones del modelo de simulación.	101
Tabla 16: Resultado de las 10 corridas del modelo de simulación.....	133
Tabla 17: Resultado de los tiempos muertos del área de pintura y curvatura.	134
Tabla 18: Resultado de los tiempos promedio de finalización de operaciones operadores de corte.	136
Tabla 19: Resultado de los tiempos promedio del segundo modelo de simulación.	137
Tabla 20: Resultado de los tiempos muertos del área de pintura y curvatura.	139
Tabla 21: Resultado de los tiempos promedio de finalización de operaciones operadores de corte.	140

Introducción

La importancia que tiene la industria automotriz en México es de gran relevancia, dado que es considerada como un pilar económico importante por todos los beneficios que trae consigo, como lo son la generación de empleos a gran escala, capacitación del personal, la modernización tecnológica y el desarrollo de proveedores locales. (Vicencio, 2007)

Uno de los grandes retos que tiene la industria automotriz es que sus proveedores cumplan con los requerimientos que exigen las ensambladoras para que alcancen sus objetivos de producción. Los factores que más afectan a esta industria son: La falta de calidad en los productos nacionales, los precios inadecuados, plazos de entrega irregulares, la falta de confianza y el no desarrollar lazos de colaboración. (Canales, Villalpando, Blanco & Alarcón, 2018)

Por esta razón los proveedores de la industria automotriz buscan siempre optimizar sus procesos de producción, esto con la finalidad de mantener la competitividad frente a otros proveedores y de igual manera, ofrecer la calidad en sus productos y el cumplimiento de los plazos de entrega de estos mismos, como lo exige actualmente el mercado internacional.

Esta investigación se desarrolla en una empresa proveedora de vidrio para grandes marcas dentro de la industria automotriz, dado que elabora diferentes modelos de ventanas laterales y parabrisas para diversos modelos de automóviles. Por la importancia que se tiene en el cumplimiento de objetivos de producción dentro de esta empresa, se identificó un área de oportunidad en la preparación y cambio de modelo de las 4 líneas de producción de vidrio para ventanas laterales que afecta en el cumplimiento de sus objetivos.

Tomando esto en cuenta, se propone desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos para evaluar el procedimiento actual de preparación y cambio de modelo para posteriormente aplicar la técnica de SMED y así eliminar tareas innecesarias y reducir sus tiempos cuando se cambia de un modelo de vidrio a otro.

Para validar y analizar los cambios y recomendaciones resultantes de la aplicación del SMED, se desarrollará otro modelo de simulación de eventos discretos evaluando el nuevo procedimiento de preparación y cambio de modelo.

Por último, en base a los resultados obtenidos, se busca por medio de algoritmos genéticos los valores óptimos del proceso.

La metodología de investigación comprende las siguientes fases: a) Diagnóstico b) Simulación de eventos discretos c) Implementación de SMED d) Validación del SMED a través de Simulación de Eventos Discretos y e) Optimización del proceso de Simulación a través de Algoritmos Genéticos.

Planteamiento del problema.

Dentro de una empresa, la correcta gestión de sus procesos conlleva a cumplir con sus objetivos de producción, esto se vuelve más importante si debe cumplir con la demanda que los clientes exigen para que también cumplan con sus respectivas metas. De igual manera es bien sabido que dentro de las empresas hay contratos con los clientes, donde se acuerda que en dado caso que no se cumpla con los pedidos establecidos existen penalizaciones que pueden generar pérdidas importantes para la empresa.

En las industrias se presenta la problemática que en sus procesos existen actividades que generan pérdida de tiempo en el proceso, lo que se puede traducir a pérdida de dinero; estas actividades son llamadas muda o desperdicio dado que no crean valor y afectan de manera directa a que la producción no cumpla con lo que se tiene planeado. (Rajadell & Sánchez, 2010)

Otra problemática que se manifiesta dentro de las industrias, que va relacionado con lo mencionado anteriormente, es la no estandarización de los procesos, esto genera que el personal que influye directamente en la producción (como lo son operadores, personal de mantenimiento y ayudantes de área) no tengan un procedimiento ya establecido de cómo actuar ante ciertas circunstancias que se presenten durante el proceso, lo que causa una mayor pérdida de tiempo al estar improvisando al momento, no teniendo el equipo necesario para hacer la tarea o desempeñando prácticas que no son óptimas hablando en relación con el tiempo. (Hernández & Vizán)

En la empresa se identifica un área de oportunidad importante para la mejora de sus procesos en el área de fabricación de cristales laterales para distintos modelos de diferentes marcas de automóvil. En dichos procesos se presenta una notable pérdida de tiempos a causa de la no estandarización de sus actividades en los cambios de modelo. Esto origina que existan retrasos en su producción, poniendo en riesgo el cumplimiento de sus objetivos, y de igual manera, el de sus clientes.

Objetivos

El desarrollo del trabajo de investigación tiene como finalidad el cumplimiento de los siguientes objetivos.

General

Desarrollar una metodología basada en SMED, Simulación de Eventos Discretos y Algoritmos Genéticos para una empresa del Sector Automotriz con el objetivo de optimizar el proceso de preparación y cambio de modelo en el área de producción de vidrio lateral para automóviles.

Específicos

1. Definir el objeto de estudio y recolectar datos del procedimiento de preparación y cambio de modelo en el área de producción de vidrio lateral para automóviles.
2. Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos del área para analizar los procedimientos que se siguen en el proceso de preparación y cambio de modelo.
3. Aplicar la metodología SMED para poder identificar las actividades que puedan mejorar y estandarizar su proceso.
4. Validar las mejoras obtenidas al aplicar la metodología SMED por medio de simulación de eventos discretos y observar cómo funciona el nuevo proceso.
5. Desarrollar un modelo matemático optimizado por el uso de Algoritmos Genéticos para optimizar el nuevo proceso.

Justificación

En la actualidad, las empresas buscan constantemente alternativas que permitan conseguir soluciones o mejoras en sus procesos de producción, ya que el mercado se encuentra en constante cambio y se enfrentan a un entorno competitivo en el cual las principales empresas, al querer proteger sus intereses, buscan tener contratos con proveedores que les ayuden a cumplir con sus objetivos.

Bajo ese sentido, la empresa necesita desarrollar una estandarización de sus procesos para eliminar la muda existente por actividades que se siguen al hacer los cambios de modelo. Esta mejora se traduce a obtener altos estándares de calidad al menor costo posible y obtener una satisfacción en la demanda del cliente.

La metodología SMED se caracteriza por su sencilla implementación y gran impacto en los procesos de producción si se ejecuta de manera correcta. A través del SMED se logran crear nuevas estrategias que consiguen optimizar las operaciones y procesos.

Basándonos en la definición de Raúl Coss en su libro “Simulación, un enfoque práctico”, nos dice que “la simulación se basa en el análisis de un modelo del sistema real, permitiendo experimentar con él, de manera que se pueda hacer modificaciones que ayuden o mejoren el proceso mismo, sin que se afecte el sistema real” (Coss, 1990) Esta técnica puede ser de gran ayuda para la aplicación de SMED, dado que, sin necesidad de aplicar los cambios en forma real al proceso, se puede desarrollar una Simulación para analizar y evaluar el comportamiento de las mejoras implementadas, y no solo eso, también se puede tener otra perspectiva del mismo proceso donde facilite la observación de nuevas alternativas de mejora.

Los Algoritmos Genéticos se caracterizan por buscar la mejor solución dentro de un conjunto específico de soluciones. Aplicar esta técnica después de desarrollar la metodología SMED sería de gran beneficio a esta, dado que, por su capacidad de búsqueda y optimización, puede mejorar aún más el proceso de preparación y cambio de modelo, encontrando una solución óptima.

Para la empresa es de vital importancia disminuir sus tiempos en los cambios de modelo, dado que es un problema que afecta directamente a su producción. Por lo cual, en el presente trabajo se propone desarrollar e implementar una metodología SMED con el apoyo de Simulación de Eventos Discretos para observar qué actividades se pueden eliminar o disminuir sus tiempos de realización. En base a este análisis, hacer mejoras al proceso y evaluar los cambios efectuados para posteriormente aplicar la técnica de inteligencia artificial, llamada algoritmos genéticos, que buscará la solución óptima para este nuevo proceso y así lograr la optimización y la estandarización del procedimiento de cambio de modelo en el área de fabricación de vidrio lateral para automóviles.

Metodología

La metodología usada se divide en 5 etapas para la correcta implementación de las técnicas utilizadas en el desarrollo de este proyecto de investigación. A continuación, se desglosan las 5 etapas de la metodología con sus respectivas actividades.

a. Diagnóstico

La primera etapa de la metodología consta de 4 actividades a realizar, esto con el propósito de generar una base de datos que permita analizar y evaluar el proceso de preparación y cambio de modelo actual de la empresa.

- Reunión con responsables del área.
- Análisis del proceso actual de cambio de corrida.
- Recolección de datos de cambios de modelo.
- Grabación de videos en cambios de modelo.

b. Simulación de eventos discretos.

La segunda etapa de la metodología consiste en realizar una simulación de eventos discretos en software SIMIO para poder observar el procedimiento de cambio de modelo actual en

base a los datos obtenidos en la etapa uno y en la siguiente etapa analizar las actividades que se pueden mejorar. Para el desarrollo de esta etapa se tomó como base la metodología de Urquía y Villalba (2013).

- Definición del sistema.
- Planteamiento del modelo.
- Preparación de los datos de entrada.
- Construcción del modelo.
- Validación del modelo.

c. Implementación de SMED.

En esta tercera etapa se observa el comportamiento de la simulación realizada en la etapa anterior para empezar a implementar el SMED. El procedimiento para la implementación de esta técnica se basó en la metodología de Cruz, J. y M. H. Badii (2004).

- Identificar las actividades externas e internas.
- Convertir las actividades internas a externas.
- Mejoras los aspectos del Set-Up.
- Eliminar el Set-Up.

d. Validación del SMED a través de simulación de eventos discretos.

Para la cuarta etapa se hace otra simulación de eventos discretos, pero ahora considerando las mejoras propuestas de la implementación del SMED por lo que se sigue el mismo procedimiento para analizar, con ayuda del software SIMIO, las propuestas de optimización.

- Definición del sistema.
- Planteamiento del modelo.
- Preparación de los datos de entrada.
- Construcción del modelo.
- Obtención del número óptimo de corridas.

-
- e. Optimización del proceso de simulación a través de algoritmos genéticos.

Tomando los datos obtenidos en la etapa anterior, se procede a evaluar los resultados y analizar si se puede alcanzar un resultado óptimo por medio de la técnica de algoritmos genéticos.

- Generar modelo matemático representativo del sistema.
- Modelación en software para evaluación del algoritmo genético.
- Validación del modelo.
- Optimización del modelo matemático utilizando operadores genéticos establecidos.
- Análisis de resultados de la optimización.

Capítulo I

Generalidades.

1.1. Introducción.

En este capítulo se muestran aspectos importantes de la empresa donde se realizó este trabajo de investigación, tales como su ubicación, misión, los valores que sigue la empresa para alcanzar sus objetivos y de igual manera se menciona sobre los productos que fabrica. Por motivos de privacidad se llegó a un convenio para no mencionar el nombre verdadero de la empresa por lo que la llamaremos “Cristales SA”.

Dentro de este capítulo también se mencionan algunos aspectos importantes del proyecto, donde se explica el proceso de producción, la línea de mando que se sigue dentro del área donde se trabajó y también se expone generalmente sobre las técnicas que se emplearon en la realización de este proyecto para la optimización de su proceso.

1.2. Generalidades de la empresa.

De acuerdo con los lineamientos de la empresa para evitar plagios en sus procesos de producción se tomó la decisión de no dar el nombre de esta, por lo que la llamaremos Cristales SA y sólo se mencionarán algunos aspectos importantes de la misma.

La planta donde se realizó la investigación se ubica en la carretera a García km 10.5 s/n villa de García, en el estado de Nuevo León, México, a las afueras de la ciudad de Monterrey; la cual se encarga de fabricar diferentes tipos de vidrio templado destinados a una gran variedad de sectores industriales, como lo son la construcción, industria alimenticia, industria automotriz, farmacéutica, etc. Por lo que cuentan con diferentes plantas para la fabricación de sus productos dependiendo para qué sector serán destinados.

Fundada en 1909 en Monterrey, México, a lo largo de su historia Cristales SA ha demostrado su compromiso como líder de la industria vidriera gracias a sus constantes investigaciones e iniciativas de inversión tecnológica. Teniendo más de 110 años siendo líder en la elaboración de vidrio a través de sus procesos y productos vanguardistas, siempre procurando el desarrollo sostenible de la empresa, de su gente y de las comunidades donde opera; son una de las empresas más importantes del continente americano en la fabricación de vidrio, cuentan con una amplia experiencia y reputación que se expande por todo el mundo, participando y trabajando mano a mano con diferentes compañías en el desarrollo y supervisión de proyectos.

Dentro de sus objetivos está la innovación y mejora continua, esto debido al gran número de clientes que maneja, por lo tanto, esta empresa requiere una investigación constante para mejorar sus procesos y lograr la satisfacción de sus clientes mediante el cumplimiento en la calidad de sus productos.

Este proyecto se desarrolló dentro de su planta destinada a la industria automotriz, dado que son proveedores de vidrio templado para grandes marcas de automóviles como “GM”, “BMW”, “Volkswagen”, por mencionar algunas. Dentro de la planta se fabrican parabrisas y ventanas laterales para diversos modelos de autos.

1.2.1. Misión.

La empresa tiene como misión “Redefinir el poder de nuestras alianzas para crear valor y soluciones de vidrio innovadoras para nuestros clientes y las comunidades”. Para lograr este objetivo la empresa cuenta con un especial enfoque de innovación sobre el vidrio, buscando constantemente la mejora continua de sus procesos.

1.2.2. Visión.

Cristales SA tiene como visión “alcanzar el máximo potencial del vidrio para moldear la forma en la que nos moveremos, construiremos y viviremos en el futuro”. Para alcanzar dicha meta se establecen ciertas políticas que dan seguimiento a puntos importantes por los cuales la empresa es reconocida internacionalmente, las cuales son:

- Los clientes son y siempre serán el centro de sus actividades.
- Siempre exceder lo que se espera de la empresa con eficiencia, fiabilidad y calidad.
- Tener eficiencia en sus procesos y operación en la búsqueda constante de nuevas ideas para brindar más y mejores resultados.
- Su talento es esencial para lograr un resultado de calidad y un crecimiento en conjunto.

Todo lo anterior siendo una empresa socialmente responsable. A continuación, se mencionan los aspectos importantes del proyecto.

1.3. Generalidades del proyecto.

El proyecto se desarrolló en la planta Cristales SA destinada a la elaboración de vidrio para el sector automotriz, específicamente en el área de templado de vidrio para ventanas laterales de diferentes modelos de automóviles, debido a que se presentaban algunos retrasos en su proceso de cambio de corrida y esto mismo tiene un impacto importante en sus tiempos de producción, afectando así a su planeación y alargando los plazos de entrega de sus productos a los clientes.

Dentro del área de templado se cuentan con 3 áreas importantes, las cuales son “Corte”, “Pintura” y “Curvatura” y en cada una se elabora un proceso en específico para la elaboración del producto, también cuentan con sus respectivas máquinas y sus respectivos operadores que se encargan de realizar el cambio de corrida.

A continuación, en la Figura 1 se muestra la línea de mando dentro del área de templado con una breve explicación de las actividades que realizan durante el proceso de cambio de modelo.

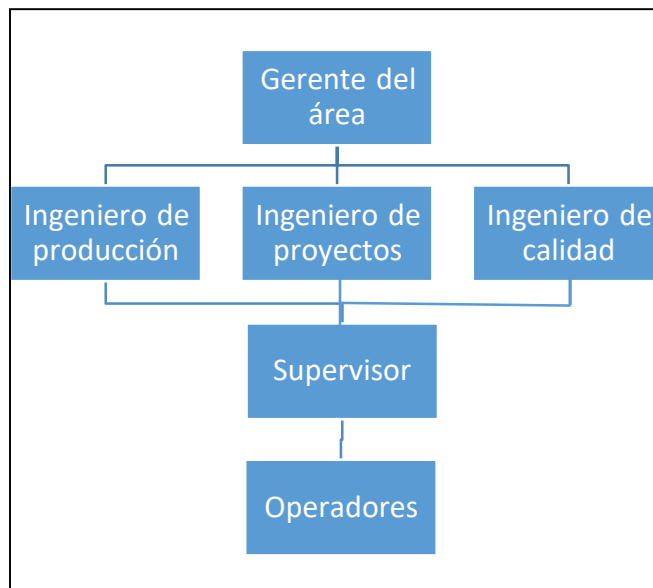


Figura 1: Línea de mando del área de templado (López, 2023).

Los que intervienen directamente con el cambio de corrida son el ingeniero de producción, dado que lleva la planeación del número de piezas a producir y el modelo que se va a elaborar; el ingeniero de producción le informa al supervisor sobre la planeación y posteriormente cuando el lote de piezas está completo, el supervisor les informa a los operadores que pueden realizar el cambio de corrida. El supervisor está capacitado junto a los operadores del área determinado para hacer las pruebas y evaluaciones correspondientes para decidir si una pieza cumple con las especificaciones del cliente.

El proyecto fue creado y está supervisado por el ingeniero de proyectos de la empresa, este mismo hizo la conexión con el Tecnológico de Orizaba para generar una propuesta del desarrollo del proyecto de investigación dentro de la planta. También se contó con el apoyo de los ingenieros de campo, operadores y personal administrativo de la compañía.

Teniendo en cuenta la información anterior, el proyecto consiste en aplicar técnicas de ingeniería para solucionar el problema en los retrasos generados con el cambio de corrida, por lo que se optó por aplicar la técnica SMED, debido a que esta técnica se especializa en

reducir los tiempos del proceso en el cambio de modelo, de igual manera se pudo analizar que implementar estos cambios a su proceso real pueden generar retrasos a su planeación y costos extra, por esta razón se decidió aplicar la técnica de Simulación de Eventos Discretos para así probar estos cambios mediante un modelo de simulación evitando retrasos en los tiempos de producción debido a las pruebas que se deben de hacer para probar los nuevos procedimientos originados del SMED, posteriormente mediante Algoritmos Genéticos, se prueba si el nuevo procedimiento de cambio de corrida se puede optimizar, para esto se desarrolla un modelo matemático que represente el sistema para que con ayuda de un programa computacional que pruebe el modelo siguiendo los principios de la técnica de Inteligencia Artificial (Algoritmos Genéticos) llegue a la solución más óptima.

1.4. Conclusiones.

El gran manejo de modelos de diferentes marcas reconocidas de autos hace que la empresa busque la mejora continua de sus procesos, lo que genera que proyectos de investigación sean ideales cuando se requiere una optimización. Los cuales hacen que se genere un trabajo en conjunto para generar diferentes perspectivas a la hora de abordar una problemática.

La comunicación y el conocimiento del proceso es parte fundamental cuando se requiere hacer un cambio que impacte de forma positiva a la producción. De igual manera que los trabajadores estén capacitados para que siempre estén abiertos al cambio que va a traer mejoras tanto a la empresa como a ellos mismos, para poder así desarrollar un trabajo en conjunto que ayude a desarrollar el proyecto de forma más efectiva.

Capítulo II

Marco teórico.

2.1. Introducción

En la industria la mayoría de las ocasiones se generan problemas debido a que no se tiene la información adecuada que les dé una visión completa a los aspectos que se pueden mejorar en sus procesos de producción. En este primer capítulo se muestra una recopilación de información con los temas y las técnicas empleadas para el desarrollo del proyecto; de igual manera, este trabajo de investigación tiene como objetivo el brindarle al lector una nueva visión de cómo poder aplicar estas técnicas, dado que este capítulo nos muestra una perspectiva amplia sobre el fundamento teórico que sustenta todas aquellas herramientas aplicadas dentro de este trabajo de investigación. De esa manera, se describen de manera breve el concepto de Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing) donde se muestra la estructura de esta filosofía para entender de mejor manera los objetivos a los que va enfocada; dentro de todas las técnicas que conforman esta filosofía se hace un énfasis en la técnica SMED que es parte importante para el desarrollo del proyecto. Posteriormente, se describen los aspectos importantes de la Simulación como lo son sus antecedentes y la metodología para aplicar esta técnica de la mejor forma posible. Finalmente se muestra información sobre la Inteligencia Artificial, donde se hace un énfasis en una de sus técnicas que son los Algoritmos Genéticos, para tener un enfoque previo de su funcionamiento y alcance.

2.2. Estadística.

La Estadística ha jugado un papel importante en la evolución de la sociedad a tal punto que ha trascendido hasta la actualidad y se hace presente de forma sencilla y natural todos los días. La estadística es una disciplina que tiene como objetivo principal, recolectar datos de cierta población o muestra para su posterior estudio o análisis, así como ayudar a la

comprensión rápida de los valores, organizándolos de forma que sea visible y de fácil captación para las personas por medio de gráficas, tablas, diagramas, etc.

Ahora considerando esta definición se puede explicar la importancia de la estadística en nuestro día a día, poniendo 2 ejemplos; el primero de ellos más común y sencillo, que es el saber si puedes pasar alguna materia en el examen final, lo que se hace es recolectar las calificaciones parciales, sacar el promedio y después analizar qué calificación necesitas obtener en el examen para poder aprobar.

Otro ejemplo, esta vez aplicado en la industria, es cuando se desea saber cuánto es el tiempo perdido de los trabajadores en cierta línea de producción, lo que se procede a hacer es tomar el tiempo de cada trabajador, desde lo que se tarda en ir al baño, hasta su tiempo de descanso habitual. Todo se puede recopilar en tablas para su estudio, presentación en gráficas y examinar como impactan esos tiempos en la producción. Con estos ejemplos se consigue observar que la estadística se puede aplicar en toda actividad en la que se desee estudiar cierto tipo de datos.

Otros propósitos en que la estadística se puede emplear, es como herramienta de trabajo, dado que aporta sus métodos para el manejo de datos y establecer conclusiones. También se utiliza para la investigación y solución de problemas, en ambos casos logra resolver preguntas que se presentan al resolver un problema y de esta forma comprender la información (Salazar C. & Del Castillo S. 2017 p.11).

2.3. Probabilidad.

Se sabe que la probabilidad ha estado presente desde tiempos muy remotos, por ejemplo, en los tantos hallazgos que se han informado en el estudio de las tumbas egipcias pertenecientes a la época de los faraones, se pudieron encontrar cubos con pequeñas incisiones circulares muy parecidas a los dados que se utilizan actualmente (Gutiérrez E. & Vladimirovna O. 2014 p.2); con este hecho se puede asumir que la probabilidad ha jugado un papel importante desde tiempos de la sociedad antigua.

Ahora bien, según Gutiérrez E. & Vladimirovna O. La Probabilidad es la disciplina que se encarga de representar cuantitativamente por medio de mediciones, la posibilidad de que ocurra un determinado suceso y esta misma, se basa en el estudio de la teoría combinatoria tomando en cuenta cálculos y funciones (Gutiérrez E. & Vladimirovna O. 2014 p.2).

Explicando un poco este concepto, cuando nos dice que se basa en el estudio de la teoría combinatoria, se refiere que al saber cuántas combinaciones pueden obtenerse, se puede aplicar la regla de Laplace, en la cual se toman los casos favorables y se divide entre el número de casos totales. La mayoría de las veces para representar de forma gráfica estas combinaciones, se utiliza un diagrama de árbol.

La Probabilidad sería una herramienta para evaluar la confiabilidad de los resultados y puede anticiparse a hechos en una población cuando solo se tenga información muestral (Mendenhall, Beaver & Beaver. 2010 p.128).

2.4. Lean Manufacturing.

El Lean Manufacturing o manufactura esbelta se entiende como un conjunto de técnicas que su objetivo principal es eliminar los desperdicios que surgen en los sistemas de fabricación dentro de una industria, entendiendo que el desperdicio es toda aquella actividad que no genera valor al producto que se fabrica y por las cuales los clientes no están dispuestos a pagar (Rajadell & Sánchez, 2010).

2.4.1. Antecedentes.

A comienzos del siglo XX es cuando surgen las técnicas de organización de la producción con los trabajos realizados por F.W. Taylor y Henry Ford, estos mismos formalizaron y modificaron los conceptos de fabricación en serie que habían empezado a ser aplicados a finales del siglo XIX.

La ruptura con estas técnicas se produce en Japón, en donde se encuentra la primera idea relacionada con el pensamiento Lean. En 1902, Sakichi Toyoda con su hijo Kiichiro fundadores de la Corporación Toyota Motor Company, inventaron un dispositivo semiautomático que daba origen al Sistema de Producción Toyota.

A finales de 1949, un colapso de las ventas obligó a Toyota a despedir a una gran parte de la mano de obra después de una larga huelga. En ese momento, dos jóvenes ingenieros de la empresa, Eiji Toyoda (sobrino de Kiichiro) y Taiicho Ohno, al que se le considera el padre del Lean Manufacturing, visitaron las empresas automovilísticas americanas. Observaron que el sistema rígido americano no era aplicable a Japón y que el futuro iba a pedir construir automóviles pequeños y modelos variados a bajo coste. Concluyeron que esto solo sería posible suprimiendo los stocks y toda una serie de despilfarros, incluyendo los de aprovechamiento de las capacidades humanas (Hernández y Vizán, 2013).

Después de la crisis del petróleo de 1973, se impuso en muchos sectores el nuevo sistema de manufactura esbelta (Lean Manufacturing), de manera que empezó a transformar la vida económica mundial por la difusión del toyotismo como sustituto del fordismo y del taylorismo. El propósito de la nueva forma de trabajar es eliminar todos los elementos innecesarios en el área de producción para alcanzar reducciones de costes, cumpliendo con los requerimientos de los clientes (Rajadell & Sánchez, 2010).

2.4.2. Estructura del Sistema Lean.

De manera muy común se toma como base el concepto de la “casa del sistema de producción Toyota” para explicar la filosofía Lean, como se vio en el apartado anterior, parte de la ideología del sistema Lean fue en base al sistema de JIT que manejaba Toyota. También se toma este concepto por su fácil interpretación, tomando las columnas de la casa como las partes que sostienen a esta filosofía. En la figura 2 se muestra una adaptación de este concepto según los autores Hernández y Vizán.

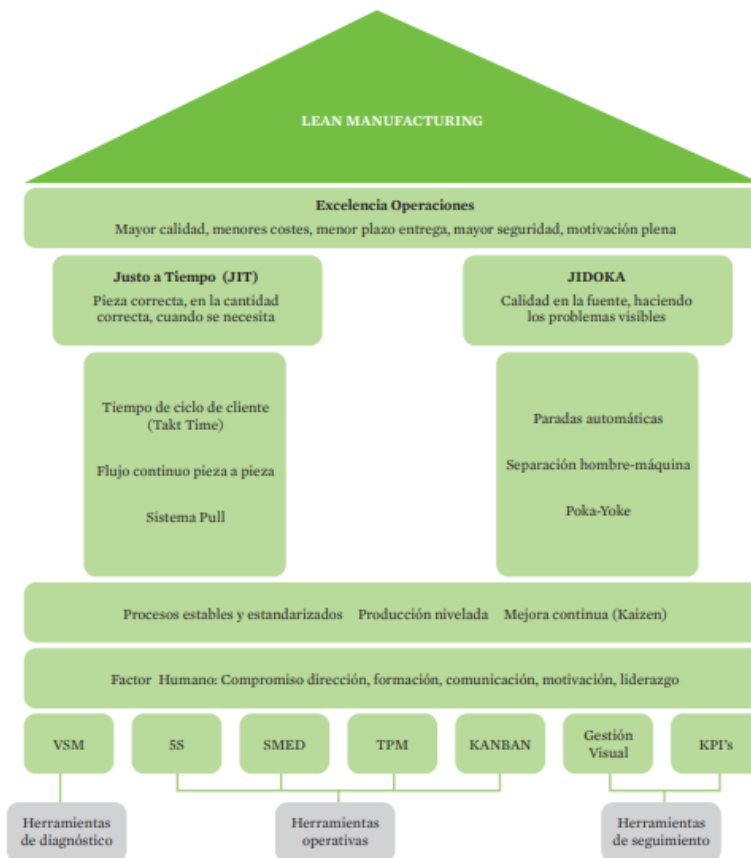


Figura 2: Representación de la estructura del sistema Lean. (Hernández & Vizán, 2013)

Estos autores proponen explicar el sistema Lean de la siguiente manera. Empezando por el techo, que se enfoca en la calidad y en el cumplimiento del tiempo de entrega, seguido de las columnas donde aparecen técnicas conocidas del sistema de producción Toyota, las cuales se encargan de fabricar el producto cuando se requiera y hacer la cantidad de producto necesaria.

La base se focaliza en la estandarización y estabilidad de los procesos. A estos cimientos tradicionales se les ha añadido el factor humano como clave en la implantación del Lean y se manifiesta en múltiples facetas como son el compromiso de la dirección, la formación de equipos dirigidos por un líder, la formación y capacitación del personal, los mecanismos de motivación y los sistemas de recompensa. Todos los elementos de esta casa se construyen a través de la aplicación de múltiples técnicas que han sido divididas según se utilicen para el

diagnóstico del sistema, a nivel operativo, o como técnicas de seguimiento. (Hernández y Vizán, 2013)

Teniendo en cuenta la estructura anterior y la visualización de las técnicas que se aplican en un sistema Lean, nos enfocaremos en la técnica SMED, esto por la importancia y la aplicación al presente proyecto.

2.5. SMED (Single Minute Exchange of Die).

2.5.1. Antecedentes.

SMED es una técnica creada por el ingeniero industrial Shingeo Shingo, el cual también es reconocido por una de las personas con más influencia en el diseño del sistema de producción Toyota. Esta metodología fue implementada después de la Segunda Guerra Mundial dado que lo que se necesitaba en ese entonces era fabricar pequeñas cantidades de producto por la falta de materias primas que dejaron los tiempos de posguerra. De igual manera se debían fabricar productos económicos y con buena calidad, para lograr esto se tenían que minimizar los costos de producción y un tiempo de fabricación lo más ajustado posible. (Ramos, 2018)

Es aquí donde entra esta nueva filosofía que toma herramientas de mejora continua, reduciendo así, las actividades que no generan valor al producto, mejorando los procesos y eliminando operación que consumen más recursos de los que se necesitan. A través de la metodología SMED, Shingeo Shingo mostró otra perspectiva del desperdicio, transformando las operaciones de producción en flujos continuos con el objetivo de entregar el producto al cliente en los tiempos establecidos. (Ramos, 2018)

2.5.2. Metodología SMED.

La metodología que implementó Shingeo Shingo consta de 4 pasos que se muestran a continuación. Para que la metodología SMED sea implementada correctamente, se deben

seguir los pasos en orden y no se deben hacer varios pasos a la vez o saltarse alguno. (Cruz & Badii, 2004)

1. Identificar las actividades internas y las actividades externas. Lo primero que se debe realizar es un listado de actividades secuenciales realizadas durante el Set-Up e identificar cuáles son internas (realizadas durante un paro de máquina) y externas (realizadas durante la operación normal de la máquina).
2. Convertir las actividades internas en externas. El tiempo en el cual el sistema no está produciendo, se le considera como desperdicio, por lo tanto, se requiere de su eliminación; En esta etapa, se revisará minuciosamente las actividades internas, para poder convertirlas en actividades externas y ganar más tiempo productivo.
3. Mejorar todos los aspectos del Set-Up. El tercer paso está orientado a la estandarización de actividades, y se podrán utilizar algunas herramientas como: Instrucciones de trabajo, procedimientos estándares de trabajo, diagramas de flujo, ayudas visuales y, diagramas de recorrido.
4. Eliminar el Set-Up. En el último paso de la metodología se deberá analizar el uso de diferentes mecanismos, como escantillones, poka yokes, plantillas, y demás implementos que ayuden a reducir drásticamente el tiempo del Set-Up, además se deberá evaluar el uso de la tecnología para la automatización de ciertas actividades.

La metodología cambia según los autores, agregando etapas previas o posteriores a la implementación, pero esto no afecta a la metodología original implementada por Shingeo Shingo, siempre se van a seguir estos 4 pasos.

2.6. Simulación.

La Segunda Guerra Mundial permitió el desarrollo de muchos avances tecnológicos, en esta etapa se crearon las bases de mucha tecnología que se utiliza actualmente, entre los diferentes avances y ciencias que se originaron a raíz de este periodo se encuentra la simulación, originándose con los trabajos de John Von Neumann y Stanislaw Ulama a fines de 1940, al unir el método de Montecarlo con una técnica matemática, con la finalidad de resolver

problemas de blindaje nuclear que eran demasiado costosos para la experimentación y demasiado complejos para el análisis.

La simulación se basa en el análisis de un modelo del sistema real, permitiendo experimentar con él, de manera que se pueda hacer modificaciones que ayuden o mejoren el proceso mismo, sin que se afecte el sistema real. (Coss, 1990)

2.6.1. Metodología de la Simulación.

Al realizar una simulación se presentan muchos riesgos, y si no se toman en cuenta todos estos riesgos al modelar el sistema, dan como resultado proyectos mucho más costosos de lo que se esperaba o con unos resultados finales pobres. Para reducir los riesgos es muy conveniente usar una metodología que considere todas las tareas necesarias. A continuación, se muestran los pasos que se debe seguir al desarrollar una simulación. (Banks, 2013)

- Formulación del problema. exponer el problema en el que se va a trabajar, incluyendo las asunciones que se crean oportunas.
- Objetivos. detallar las preguntas que deben ser respondidas, así como varios escenarios que deban ser investigados.
- Modelo conceptual. abstraer el sistema real en estudio mediante un modelo conceptual, formado por relaciones lógicas y matemáticas entre los componentes y la estructura del sistema; conviene que evolucione desde una versión simple hasta que alcance la complejidad apropiada.
- Recogida de datos. especificar los datos necesarios, su frecuencia y formato de forma que se puedan extraer de los registros existentes o bien que sea necesario establecer nuevos registros.
- Codificación del modelo. escribir el modelo conceptual anterior en el formato propio del software de simulación que se va a utilizar, construyendo así un modelo operacional.
- Verificación. comprobar que modelo operacional se comporta como se espera del modelo conceptual.

-
- Validación. determinar si el modelo conceptual representa adecuadamente al sistema real, idealmente comparando las entradas y salidas de cada uno.
 - Diseño de experimentos. decidir para cada escenario la longitud de la simulación, el número de repeticiones (replicaciones) y la forma en que se inicializa.
 - Producción y análisis. estimar métricas de rendimiento para cada escenario a partir de las replicaciones realizadas.
 - Ampliar producción y análisis. decidir, a la vista de los resultados obtenidos, si es necesario aumentar el número de réplicas y escenarios.

2.7. Inteligencia artificial.

La inteligencia artificial se puede definir como la capacidad de las máquinas para usar algoritmos, aprender de los datos y utilizar lo aprendido en la toma de decisiones tal y como lo haría un ser humano. Sin embargo, a diferencia de las personas, los dispositivos basados en IA no necesitan descansar y pueden analizar grandes volúmenes de información a la vez. Asimismo, la proporción de errores es significativamente menor en las máquinas que realizan las mismas tareas que sus contrapartes humanas. (Rouhiainen, 2018)

El campo de la inteligencia artificial hoy día engloba varias sub-áreas tales como los sistemas expertos, la lógica difusa, computación evolutiva, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, juego automático, visión artificial, procesamiento del lenguaje, robótica, sistemas basados en agentes, etc. (Min, 2010) En esta investigación se aplicará la técnica de algoritmos genéticos, por lo que se hará una investigación más detallada para esta misma.

2.7.1. Algoritmos genéticos.

Un algoritmo genético (AG) se puede definir como una técnica de búsqueda iterativa inspirada en los principios de selección natural, el cual se basa en la generación de poblaciones de individuos mediante la reproducción de los padres. Los AG no buscan

necesariamente imitar la evolución biológica sino generar estrategias de optimización. La mayoría de las veces se busca la mejor solución en un conjunto específico de soluciones. El conjunto de soluciones entre las que reside la solución deseada se llama espacio de búsqueda (también espacio de estado). Cada punto en el espacio de búsqueda es una posible solución y puede ser "marcado" con un valor de aptitud, dependiendo de la definición del problema.

2.7.1.1. Condiciones para una correcta implementación de algoritmos genéticos.

Para que un algoritmo genético sea implementado de forma correcta se deben de cumplir las siguientes condiciones. (Diego-Más, 2006)

- Codificación de las soluciones.
- Creación de la población inicial.
- Función de evaluación.
- Criterios de selección.
- Operadores genéticos.
- Tratamiento de los individuos no factibles.
- Parámetros de funcionamiento.
- Criterio de parada.

En los siguientes apartados se nos da una breve definición de cada punto.

2.7.1.1.1. Codificación de las soluciones.

La codificación de las soluciones es representada mediante una cadena de valores, estos valores principalmente son binarios [1,0] aunque se pueden representar mediante otros alfabetos como el decimal, el hexadecimal, o la codificación puede ser creada de acuerdo con la situación problemática. (Del Valle, 2017)

Para que una codificación sea considerada como correcta, debe cumplir con los siguientes incisos: (Pérez, 2004)

- a) Completitud. Cualquier solución del problema debe poder ser representada mediante la codificación.
- b) Coherencia. Cualquier cadena formada mediante la codificación debe representar una solución al problema.
- c) Uniformidad. Todas las soluciones deben poder ser representadas por un número igual de codificaciones, evitando que unas lo estén más o menos que otras. Cada cadena representa una y sólo una solución y cada solución es representada por una y sólo una cadena.
- d) Localidad. Debe existir proporcionalidad entre las variaciones de las codificaciones y las variaciones de los individuos representados. Si se producen pequeños cambios en las cadenas, deben producirse pequeños cambios en las soluciones, de igual manera, si se producen grandes cambios en las cadenas, se producirán grandes cambios en las soluciones.
- e) Sencillez. La codificación y decodificación de los individuos debe ser un proceso sencillo.

2.7.1.1.2. Creación de la población inicial.

La población inicial se crea de forma aleatoria, pero en algunas ocasiones se realiza aplicando técnicas heurísticas. Lo más conveniente es que la población tenga una amplia variación, esto se refiera a que los individuos tengan características diferentes. También debe tomarse en cuenta que el número de cadenas que representan a los individuos no factibles sea lo más reducido posible. (Diego-Más, 2006)

2.7.1.1.3. Función de evaluación.

La función de evolución es lo que se desea maximizar o minimizar, pero antes se tiene que evaluar cada individuo comparándolo con el resto de la población, para conocer su grado de aptitud y así saber que tan adaptados están al entorno. Esto es lo que hace una función aptitud, ayuda a conocer que tan buenas son las soluciones para resolver el problema.

Tomar una función aptitud ayuda a simplificar la función de evaluación, dado que puede no ser sencillo expresar de manera numérica el objetivo perseguido para la resolución del problema, y en caso de conseguirlo, la expresión de la función puede ser excesivamente compleja. (Diego-Más, 2006)

2.7.1.1.4. Proceso de selección.

Existen 3 procesos de selección dentro del algoritmo genético, los cuales son selección de los padres, selección de los supervivientes y si existe el caso, selección de los individuos de élite.

Los tipos de selección se clasifican según el tipo de muestreo que realizan, estos muestreos son: Directo, aleatorio y estocástico. (Diego-Más, 2006)

2.7.1.1.5. Operadores genéticos.

Para que una población avance, se desarrolle y evolucione es necesario que tenga descendencia y esta herede las mejores características de los padres que se seleccionan para el apareamiento, además tienen que existir individuos que sobrevivan debido a su mejor adaptación al medio ambiente donde se encuentran y por supuesto que de generación en generación existen pequeños cambios en los individuos llamados mutaciones que ocasionan mejoras en la nueva población. (Del Valle, 2017)

2.7.1.1.6. Tratamiento de los individuos no factibles.

El algoritmo genético es una técnica de búsqueda irrestrictiva. No se pueden establecer límites a la búsqueda puesto que no existen mecanismos para ello. Es casi imposible que las codificaciones que se presentan al buscar una solución sobrepasen los rangos de estos mismos, obteniendo individuos no factibles. (Diego-Más. 2006) Las estrategias que se desarrollan para evitar esto, son las siguientes:

- Descarte o penalización.
- Reparación.
- Codificación cerrada.

2.7.1.1.7. Criterio de parada.

Un algoritmo genético puede detener su funcionamiento de acuerdo a una de las siguientes formas (Diego-Más, 2006): número de generaciones, por convergencia, por tiempo de ejecución e interrupción del usuario.

En un algoritmo genético se pueden utilizar más de un tipo de paro, pero se debe tener cuidado en su elección dado que si se elige de forma incorrecta haría que el algoritmo no tuviera suficiente tiempo de búsqueda y no pueda encontrar la solución óptima. Al finalizar estas operaciones se habrá creado la generación $n + 1$, si ésta es igual al máximo número de generaciones la optimización se da por terminada, de lo contrario se repite el proceso evaluando a los nuevos individuos. (Del Valle, 2017) La figura 3 muestra un diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo genético.

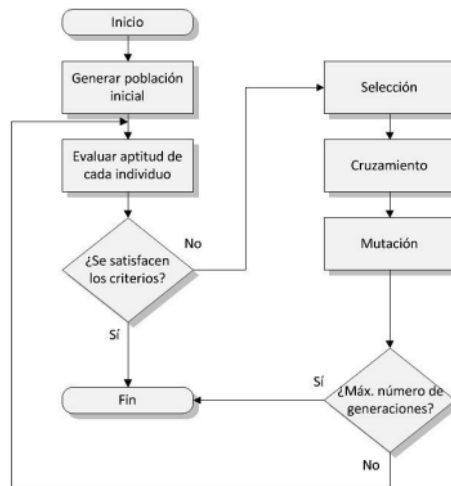


Figura 3: Diagrama de flujo del funcionamiento de los AG. (Lasserre, 2017)

2.8. Conclusiones.

Para desarrollar el proyecto se necesitó tener el conocimiento adecuado sobre las técnicas que se emplean en este trabajo, para eso se realizó un análisis y estudio de diferentes fuentes de información que nos permitieron obtener datos de forma detallada de cada método de interés que se mostró en este capítulo.

Toda la teoría forma parte importante de cualquier proyecto de investigación, dado que te puede servir como una guía para resolver la problemática que se te presente. De igual manera, la información obtenida en el marco teórico te puede respaldar con alguna metodología o dato que empleas en el desarrollo del proyecto para obtener resultados que representen de manera real y confiable al sistema.

El estudio previo de las metodologías a emplear en el proyecto te beneficia al momento de generar soluciones al problema. También el análisis de casos de estudio similares te puede dar otra perspectiva y otras opciones cuando se estén desarrollando mejoras al proceso.

Capítulo III

Desarrollo de la Metodología.

3.1. Introducción.

Dentro de este capítulo se muestra todo el proceso que se siguió al desarrollar este trabajo de investigación, de acuerdo con la metodología vista anteriormente. Este capítulo toma la información del Capítulo I con el propósito de alcanzar el objetivo principal de este trabajo, el cual es que por medio de la Simulación de Eventos Discretos se pueda evaluar el sistema actual para posteriormente aplicar la técnica SMED en la producción de vidrio para ventanas laterales de diferentes marcas y modelos de automóviles para que, una vez aplicado el SMED, se evalúen las mejoras nuevamente por medio de un modelo de simulación para posteriormente, analizar si se puede optimizar más este proceso con Algoritmos Genéticos.

Este capítulo inicia explicando el desarrollo de la primera etapa de la metodología, la cual es la etapa de diagnóstico, donde se hace el contacto con el área de producción y se estudia de manera profunda el proceso de cambio de corrida para entender completamente el sistema real para después, crear un modelo de Simulación de Eventos Discretos y evaluar el proceso de forma más detallada. En esta primera etapa se describe de manera detallada el funcionamiento del proceso, con los datos recolectados directamente de la planta con apoyo de los ingenieros y operadores encargados del área de producción.

3.2. Etapa 1: Diagnostico

Durante la visita al área de producción de vidrio lateral para diferentes modelos de automóviles, se obtuvieron los siguientes datos que servirán para hacer un modelo de simulación en el programa SIMIO, este modelo será una representación del sistema real, para así, posteriormente realizar un análisis del sistema y evaluar las actividades que hacen los operadores en los cambios de corrida para aplicar la técnica SMED. A continuación, se dará un resumen de los puntos que se consideran más importantes según lo observado en la visita.

El área de templado que es donde se enfoca este estudio, se encarga de la producción de diferentes modelos de vidrio lateral para diferentes marcas de automóvil; esta área se divide en 3 zonas importantes: área de corte, área de pintura o impresión y área de terminado o curvatura (Figura 4). Cada zona cuenta con sus respectivas máquinas y número de operadores que se encargan de ajustar dichos equipos cuando sucede un cambio de corrida.

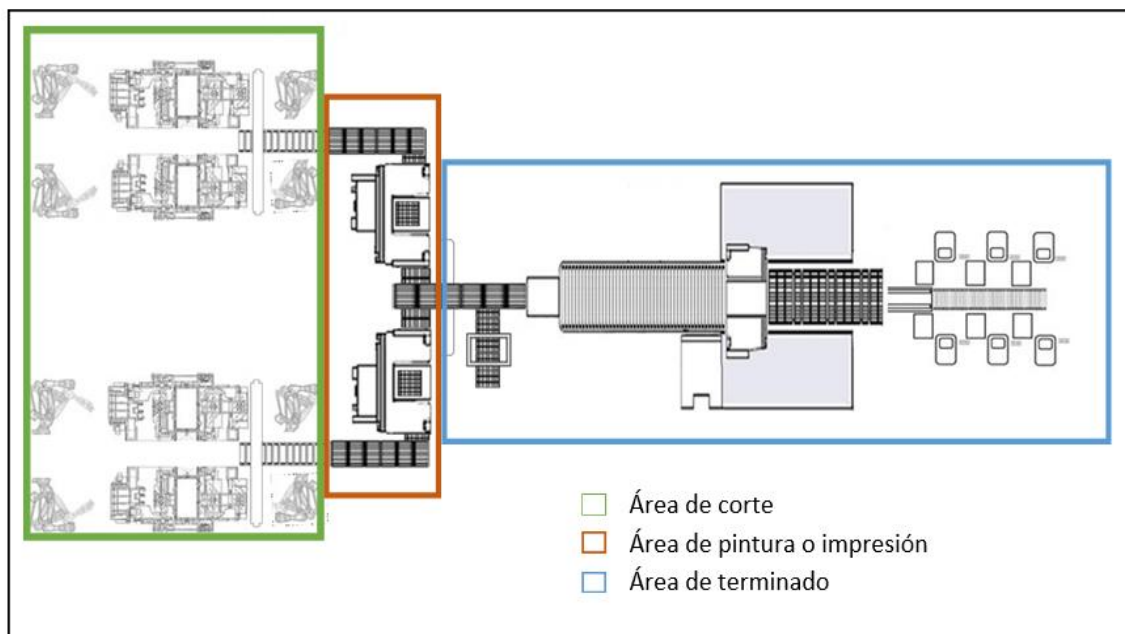


Figura 4: Distribución de las zonas del área de producción de vidrio lateral (López, 2023).

A continuación, se describen las actividades realizadas para la recolección de datos del sistema real durante el proceso de cambio de corrida o modelo.

3.2.1. Recolección de datos.

El objetivo principal de la visita a la planta fue el recolectar datos que permitieran elaborar un modelo de simulación del cambio de corrida en el programa SIMIO, para alcanzar este objetivo se hizo un trabajo de campo que consistió en grabar las actividades que realiza el supervisor junto con los operadores al hacer este cambio. Se contó con 3 equipos de grabación que se instalaron en puntos específicos del área donde se podía documentar de buena forma las tareas de los operadores. Para mayor entendimiento y detalle también se contaba con otro equipo de grabación que era transportado por un servidor y en cada cambio de corrida se enfocaba en seguir y grabar a un sólo operador de las diferentes zonas.

Otra actividad que se realizó durante la visita fue la medición de toda el área de templado, esto con el propósito de tomar las distancias que recorren los operadores, dado que el programa tiene comandos y herramientas que facilitan la simulación de los traslados por medio de estas distancias. Las medidas de toda el área se muestran en el apartado “Medidas del área de templado” que se muestra en los apartados de abajo.

Como complemento y apoyo para una mejor comprensión del sistema se entrevistaron a los expertos del área (conformados por los ingenieros, supervisor y operadores) para la descripción de sus actividades, se grabaron audios donde aclaran dudas de los procedimientos que realizan durante el cambio de corrida y se les pidió un análisis de los tiempos que se toman al realizar cada actividad para sacar el valor mínimo, máximo y el más probable, esto con el objetivo de definir estas variables aleatorias como una distribución triangular, dado que, como se ha visto en los cursos de probabilidad y estadística, la distribución triangular es extremadamente útil en el mundo real porque a menudo se puede estimar el valor mínimo, máximo y moda con la ayuda de los expertos del área, tomando en cuenta los tiempos registrados en los videos.

En los siguientes apartados se describen más a detalle los datos obtenidos.

3.2.1.1. Layout del área de templado.

Como se mencionó anteriormente el área de templado se divide en 3 zonas importantes, la división se debe a que en cada zona se especifica una parte del proceso de fabricación, por ejemplo, el área de corte cuenta con 4 líneas de producción como lo muestra la Figura 5 y cada línea tiene las mismas maquinas(que son las enumeradas del 1 al 5). El área de pintura cuenta con 2 casetas donde se imprimen los datos de cada modelo (numero 6) y cuando las piezas salen de estas 2 casetas pasan al área de terminado que solo es una línea con sus respectivas maquinas (enumeradas del 7 al 13). A continuación, se puede observar el croquis del área de templado y posteriormente se muestran los nombres de cada máquina.

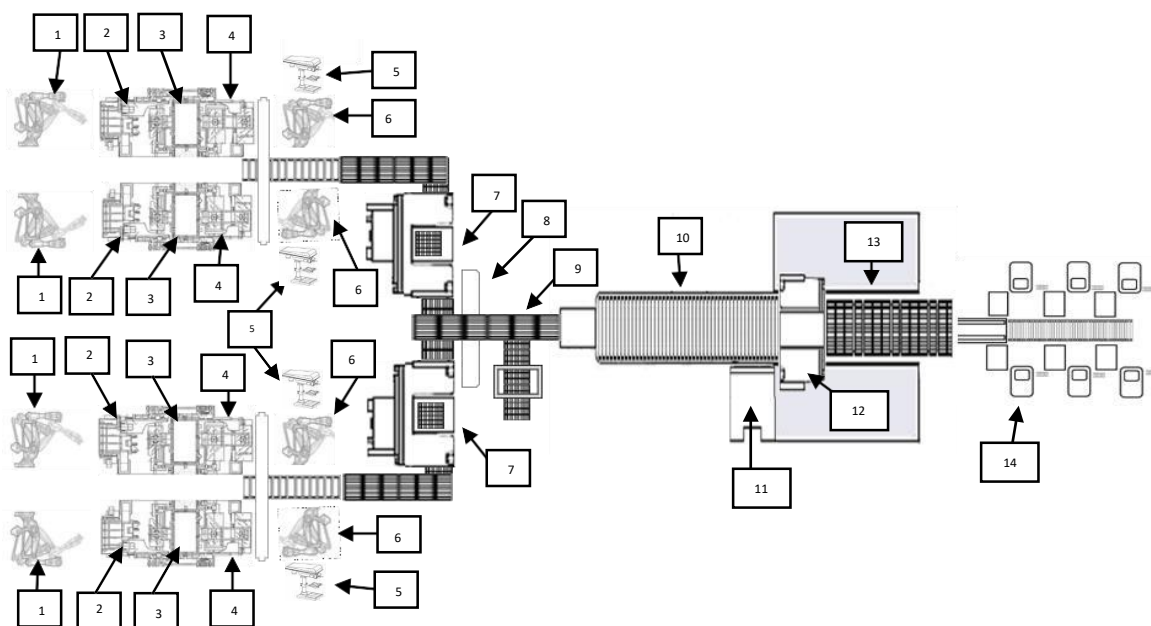


Figura 5: Croquis del área de templado (López, 2023).

Listado de las máquinas divididas por zona:

Área de corte.

1. Brazo automatizado para traslado y corte vertical.

-
2. Mesa de Corte.
 3. Máquina de corte perimetral y desprendido.
 4. Máquina pulidora.
 5. Taladro.
 6. Brazo automatizado para traslado de pieza.

Área de pintura.

7. Máquina de impresión.

Área de terminado/curvatura.

8. Elevador
9. Máquina de ajuste de posición de ajuste de entrada al Horno.
10. Horno.
11. Caseta/Panel de control de Horno.
12. R2 (Curvatura).
13. Enfriamiento.
14. Medición.

3.2.1.2. Cantidad de operadores que participan en cada área del proceso.

Durante el cambio de corrida existe una distribución de los operadores en cada zona del proceso, estos operadores están capacitados para realizar los ajustes necesarios para cada modelo, en la Tabla 1 se muestra el número de operadores para cada zona.

Tabla 1: Número de operadores que participan en el cambio de corrida para cada zona.

Área	Corte	Pintura	Curvatura
Número de Operadores	4	2	2

Como el área de corte cuenta con 4 líneas de producción, se distribuye un operador para cada línea, de igual manera para el área de pintura que se distribuye un operador para cada una de las 2 casetas y en el área de terminado las tareas se les distribuyen a 2 operadores y cabe resaltar que para el cambio de R2 se necesita un montacargas.

3.2.1.3. Actividades realizadas por los operadores.

En la siguiente tabla se muestra un listado de las actividades que siguen los operadores en el cambio de corrida divididas por zona, con su respectivo tiempo en que tardan en hacer la actividad dada por distribución triangular (DT) y distribución uniforme (DU), cada distribución fue definida mediante los expertos del área en conjunto con las grabaciones del cambio de corrida, se tomó la decisión de definir estas variables con las distribuciones triangular (DT) y uniforme (DU) por la poca documentación con respecto a los tiempos que tardan los operadores en realizar cada actividad del cambio de corrida, como se mencionó anteriormente la distribución triangular es extremadamente útil en el mundo real porque a menudo se puede estimar el valor mínimo, máximo y moda con la ayuda de los expertos del área.

Tabla 2a: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores.

Área	Actividad	Tiempo (min)
CORTE	Ajuste de brazo y mesa de corte	DT (6,9.5,12.5)
	Cambio de pieza de corte	DT (5,8,9.5)
	Ajuste de posición para pulidora	DT (2,3.33,4.6)
	Rectificación de medidas de corte	DU (3,5)

Tabla 2b: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores.

CORTE	Cambio de Brocas	DT (8,12,17)
	Ajuste de guías	DT (2.5,4,6)
	Ajuste de brazo en área de barrenos	DT (3,5,8)
PINTURA	Carga del programa y ajuste inicial de posición de impresión	DU (3,5)
	Ajuste y rectificación de impresión	DT (6.5,9.5,12)
CURVATURA	Cambio R2	DT (7.5,10,15)
	Configuración y ajuste de elevador	DT (3,3.6,4)
	Ajuste de posición	DT (2.5,3.1,4)
	Cambio de mesa para verificación	DU (2,4)

Cabe destacar que estas son las actividades principales que deben de hacer los operadores en sus respectivas áreas; no se incluyen los traslados y tareas secundarias que hacen los operadores pero que si se deben tener en cuenta a la hora de hacer el modelo de simulación para que represente el sistema real. Estos datos secundarios serán tomados de las grabaciones documentadas y analizados posteriormente en el programa SIMIO, de esta forma el siguiente paso será dividir las actividades externas e internas para empezar a aplicar el SMED.

3.2.1.4. Medidas del área de templado.

Una parte importante dentro de la simulación en el programa SIMIO es que se pueden modelar las distancias y los recorridos que hacen tanto el personal de una empresa como vehículos. Partiendo de esto, lo que se hizo durante la visita a la planta fue la toma de medidas de toda el área de templado, en la Figura 6 se muestran las medidas generales de toda el área, esto nos servirá para simularlas distancias que recorren los operadores al realizar el cambio

de corrida. Cabe destacar que se tienen anotaciones de medidas más detalladas.

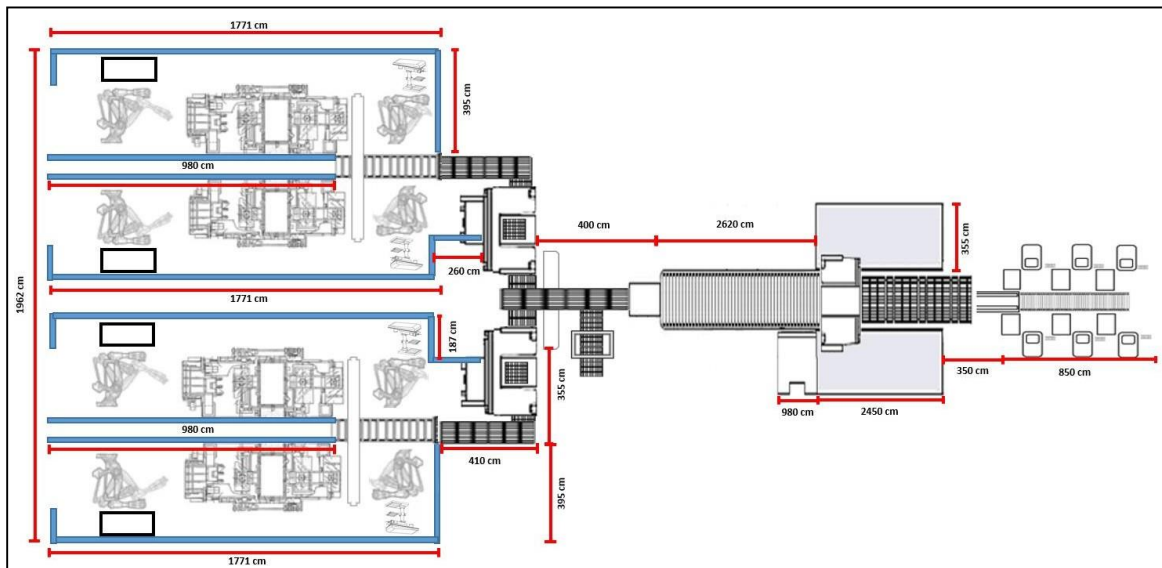


Figura 6: Medidas del área de templado (López, 2023).

Las divisiones de color azul son las mallas que cubren la zona de corte para evitar que el personal no autorizado ingrese, dado que las máquinas están en constante movimiento y podrían causar un accidente.

3.2.1.5. Ubicación de herramienta y mesas de trabajo empleadas en el proceso.

En la Figura 7 se muestran los principales elementos de trabajo con los que interactúan los operadores al realizar sus actividades durante el cambio de corrida, estas zonas serán incluidas dentro del modelo de simulación, dado que son zonas donde los operadores se trasladan para controlar la maquinaria para hacer ajustes y pruebas de las piezas. También se cuenta con información de las medidas de cada elemento y la distancia que debe de recorrer el personal para llegar a cada uno.

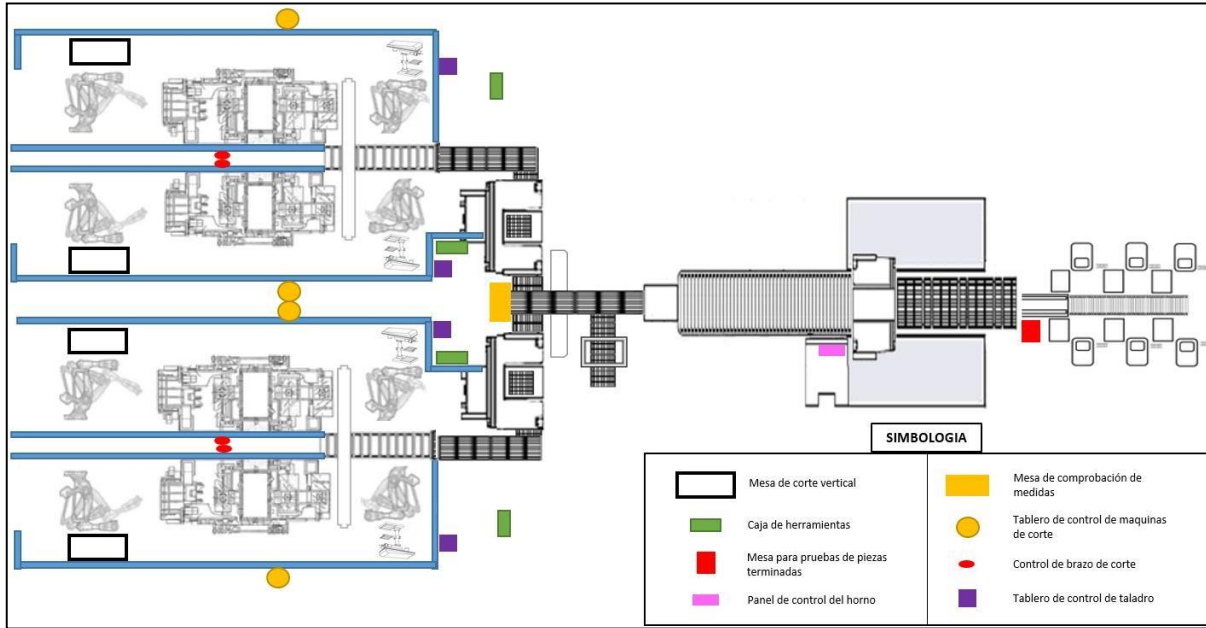


Figura 7: Ubicación de elementos de trabajo (López, 2023).

3.2.1.6. Grabaciones del proceso de cambio de corrida.

Como actividad principal que se hizo durante la estadía en la planta, fue la tomade videos para observar y entender cómo realizan las actividades los operadores durante el cambio de corrida; estos videos son de gran ayuda para obtener de ahí cada acción y traslado que realiza el operador y también para obtener tiempos de cada actividad que se realiza. Lo que se hizo a grandes rasgos fue colocar en lugares estratégicos de la planta equipos de video que pudieran grabar a los operadores mientras hacían el cambio de corrida, también lo que se decidió hacer para documentar de mejor forma las actividades de los operadores fue el seguir a estos mismos mientras hacían el cambio para obtener datos de los recorridos de forma más precisa. En la Figura 8, Figura 9 y Figura 10 se muestran algunas imágenes documentas de las actividades que realizan los operadores.

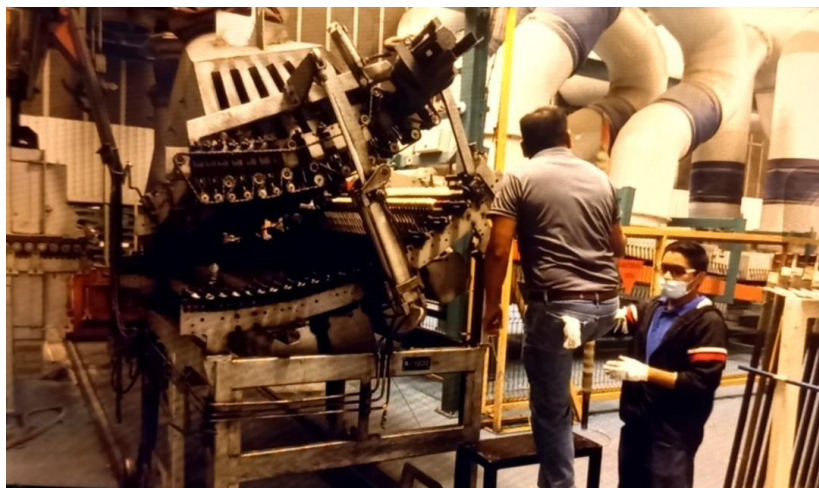


Figura 8: Cambio R2 - Área de curvatura (López, 2023).



Figura 9: Cambio de brocas - Área de corte (López, 2023).



Figura 10: Ajuste de posición para impresión - Área de pintura (López, 2023).

3.2.1.7. Desglose de las actividades de los operadores en base al material documentado.

A continuación, se muestran 3 tablas con las actividades realizadas por los operadores en sus respectivas áreas, en cada actividad aparecen sus tiempos promedio y el orden en que los operadores normalmente realizan estas mismas actividades en cada cambio de corrida de acuerdo con la información proporcionada por los mismos y por el material grabado en la visita a la planta. Todo el listado servirá para empezar el modelo de simulación en el programa SIMIO para posteriormente separar actividades externas e internas de acuerdo con la metodología SMED.

Como dato importante dentro del proceso de cambio de corrida es que, durante la ejecución de las tareas, las 3 áreas pueden empezar a realizar algunas actividades que no requieran una pieza maquinada para ajustar las máquinas, cuando lleguen a este punto, los operadores deben esperar a que el área anterior termine de ajustar su equipo para que les puedan enviar la pieza. Dicho en otras palabras, los operadores de curvatura deben esperar a que el área de pintura termine de ajustar su equipo para que les envíen la pieza maquinada y una vez que se cuente con la pieza, los operadores de curvatura pueden continuar con sus actividades. Lo mismo pasa con los operadores de pintura, que deben esperar al área de corte que envíe la pieza maquinada para que ellos puedan continuar con sus tareas.

Los únicos que no paran sus actividades son los operadores de corte, por esta razón esta área es de gran importancia en el proceso, dado que dependiendo el tiempo que tarden en enviar la pieza al área de pintura, también están afectando al área de curvatura para que puedan continuar su proceso.

Otro dato importante observado y analizado mediante el material documentado es que el tiempo de espera del operador de pintura para que llegue la pieza y pueda continuar sus operaciones es de 7 a 10 minutos y el operador de curvatura debe esperar la pieza entre 15 a 20 minutos.

En las tablas 4 y 5, la actividad sombreada de color gris es cuando se realiza esta pausa. Las actividades que aparecen sombreadas en color amarillo son actividades que tienen el tiempo definido dado que es el tiempo que la maquina realiza su función.

Área de corte

Tabla 3a: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)
1	Traslado del operador al controlador del brazo de corte	10
2	Mandar a "Home" al brazo de corte	30
3	Programar el brazo de corte para su respectivo modelo	20
4	Ajustar la toma de vidrio	80
5	Ajustar mesa de corte	60
6	Modificar punto de corte 1	80
7	Modificar punto de corte 2	80
8	Traslado de material a entrada	50
9	Ajuste de entrada de vidrio 1	80
10	Colocar pieza en banda transportadora	80
11	Cargar programa en automático	40
12	Traslado del operador al controlador de la máquina de corte y pulido	20
13	Cargar programa del modelo	35
14	Traslado del operador a la caja de herramientas por la llave de acceso	7
15	Traslado de regreso al panel de control	6
16	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7
17	Puesta de candado de seguridad	3
18	Traslado del operador al área de corte perimetral	6
19	Cambio de pieza de corte	480
20	Traslado del operador al panel de control	6
21	Quitar candado y cerrar la puerta	15
22	Poner en marcha la máquina de corte	10
23	Corte de pieza	40
24	Desprendido de pieza	20
25	Darle "Stop" para ajustar la máquina de pulido	2
26	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7
27	Puesta de candado de seguridad	5
28	Traslado del operador al área de pulido	6
29	Ajuste de área de pulido	120
30	Traslado del operador a la puerta	6
31	Quitar candado y cerrar la puerta	15

Tabla 3b: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.

32	Traslado del operador al panel de control	5
33	Ajustar máquina de pulido	50
34	Pulido de pieza	25
35	Darle "Stop" para entrar por la pieza	2
36	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7
37	Puesta de candado de seguridad	5
38	Traslado del operador al área de pulido para tomar la pieza	6
39	Traslado del operador a la mesa de comprobación de medidas	45
40	Búsqueda de guía para comprobación de medidas	40
41	Montar guía de medidas	10
42	Montar pieza sobre la guía de medición	3
43	Comprobación de medidas	30
44	Traslado del operador al área de barreno	47
45	Colocar la pieza en un lugar	3
46	Traslado del operador a la puerta de acceso del área de barreno	5
47	Tiempo en que la puerta da acceso al área	8
48	Desactivar sistema de la guía	30
49	Traslado del operador para desmontar la guía	5
50	Desmontar la guía	30
51	Trasladar la guía afuera del área	10
52	Tomar la guía correspondiente al modelo	3
53	Trasladar la nueva guía al área de barreno	10
54	Montar la guía nueva	60
55	Conectar las mangueras de la guía	65
56	Traslado de operador a mesa de herramientas para taladro	7
57	Tomar herramienta para cambio de broca	5
58	Traslado del operador al taladro	7
59	Quitar los broqueros	80
60	Traslado de operador a mesa de trabajo para cambio de broca	7
61	Cambio de broca	70
62	Traslado del operador al taladro	7
63	Montar broqueros	120
64	Traslado del operador al panel de control	5
65	Hacer pruebas del taladro	90
66	Traslado del operador por pieza de prueba	5
67	Traslado del operador al taladro y montar la pieza de prueba	5
68	Traslado del operador al panel de control	5
69	Hacer una perforación en pieza de prueba	12
70	Traslado del operador al taladro para cambiar posición de pieza	5
71	Traslado del operador al panel de control del taladro	5
72	Hacer una perforación en pieza de prueba	12
73	Traslado del operador al taladro	5
74	Comprobar si los barrenos no presentan fallas	8
75	Traslado del operador al panel de control	5

Tabla 3c: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de corte.

76	Ajustar programa del taladro	12
77	Hacer una perforación en pieza de prueba	12
78	Traslado del operador al taladro	5
79	Comprobar si el barreno es correcto	8
80	Quitar pieza de prueba y colocarla fuera del área	8
81	Traslado del operador por la pieza maquinada	7
82	Traslado del operador al taladro	7
83	Montar pieza maquinada sobre la guía	7
84	Traslado del operador al panel de control	5
85	Probar y configurar funcionamiento de la guía	25
86	Traslado del operador al taladro	5
87	Observar y configurar ajuste de mangueras de las guías	25
88	Traslado del operador al panel de control	5
89	Traslado del operador al taladro para mover la pieza de la guía	3
90	Traslado del operador al panel de control	5
91	Meter programa para prueba de guía y taladro	12
92	Maquinar la pieza para observar funcionamiento de guía y taladro	12
93	Traslado del operador al taladro	5
94	Tomar la pieza para inspección	10
95	Traslado del operador con pieza para banda transportadora	5
96	Traslado del operador al área de pintura	14
97	Comunicar a operador de pintura para marcar la pieza	7
98	Traslado del operador al panel de control para poner en automático	15
99	Configurar en automático el taladro	12
100	Cerrar la puerta	4
101	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	10
102	Configurar el programa a automático	15
103	Traslado del operador al controlador de brazo de corte	17
104	Ajuste de entrada de vidrio 2	80
105	Probar el funcionamiento del brazo de corte	30
106	Dejar el controlador con el programa cargado	5
107	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	17
108	Echar a andar la máquina de corte y pulido	90
109	Traslado del operador al taladro	10
110	Configurar la toma de la pieza con el brazo automatizado	110
111	Echar a andar el taladro	20
112	Hacer una perforación	12
113	Parar la banda transportadora de corte a pintura	4
114	Configurar la toma de la pieza hacia banda transportadora	135
115	Traslado del operador para encender la banda transportadora	6
116	Colocar los aparatos en su lugar	12
	Esperar a que salga la pieza del horno para tomar medidas	

Área de pintura

Tabla 4: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de pintura.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)
1	Preparar material para cambio	5
2	Aflojar pernos	35
3	Cambiar la placa con el diseño de impresión	25
4	Apretar los pernos	65
5	Cargar programa	63
6	Comprobar funcionamiento de la guía	35
7	Poner pintura	10
	Esperar pieza del área de corte	7 a 10 min
8	Ir por la pieza y colocarla en la mesa de impresión	43
9	Limpiar la pieza de ambos lados	73
10	Ajustar guía	195
11	Ajustar posición de impresión	368
12	Mandar la pieza a horno	10

Área de curvatura

Tabla 5a: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de curvatura.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)
1	Llamar al montacargas	10
2	Tiempo en que llega el montacargas al área del R2	240
3	Traslado del operador al panel de control del elevador	35
4	Parar el proceso del elevador	30
5	Traslado del operador al panel de control	15
6	Parar el proceso del R2	35
7	Traslado del operador al R2	6
8	Bajar los conductos superiores	15
9	Quitar los seguros del R2	8
10	Sacar el R2	16
11	Desconectar el R2	50
12	Maniobra del montacargas de sacar el R2	180
13	Maniobra del montacargas de trasladar el nuevo R2	210

Tabla 5b: Desglose de actividades realizadas por los operadores del área de curvatura.

14	Traslado del operador al área de R2	35
15	Conectar el nuevo R2	50
16	Meter y asegurar el nuevo R2	26
17	Subir los conductos superiores	15
18	Traslado del operador al elevador	35
	Esperar pieza del área de pintura	15 a 20 min
19	Ajustar el elevador	216
20	Traslado del operador a la máquina de posición para entrada al horno	18
21	Ajustar máquina de posición para entrada al horno	192
22	Traslado del operador al panel de R2	45
23	Poner en marcha el R2	37
24	Traslado de la pieza desde pintura hasta terminado	345
25	Checar medidas (por pieza)	35

Con estos datos se procede a realizar la siguiente etapa del proyecto que consiste en desarrollar un modelo de simulación que represente el sistema real del proceso de cambio de corrida para así, poder hacer un análisis de este mismo e implementar el SMED.

3.3. Etapa 2: Primer modelo de simulación.

A continuación, se muestra el desarrollo del primer modelo de simulación en el programa SIMIO, se optó por una simulación de eventos discretos por su gran versatilidad al programar las actividades de los trabajadores, dado que, dentro de esta simulación se programan las acciones paso a paso que deben de realizar las entidades que simulan a los operadores y las piezas. Estas mismas entidades se desplazan y mandan señales a otras para que realicen sus actividades dentro del área dada. Toda su programación fue tomada de los datos obtenidos en la visita a la planta de acuerdo con las actividades mostradas en las Tablas 3a, 3b, 3c, Tabla 4 y Tablas 5a y 5b, así también se tomó como guía el Layout del área de templado proporcionada por el ingeniero de proyectos de la planta para la ubicación de las áreas de trabajo de cada operador.

En la siguiente figura 11 se muestra como está conformado el modelo de simulación y se hace una descripción general de su funcionamiento.

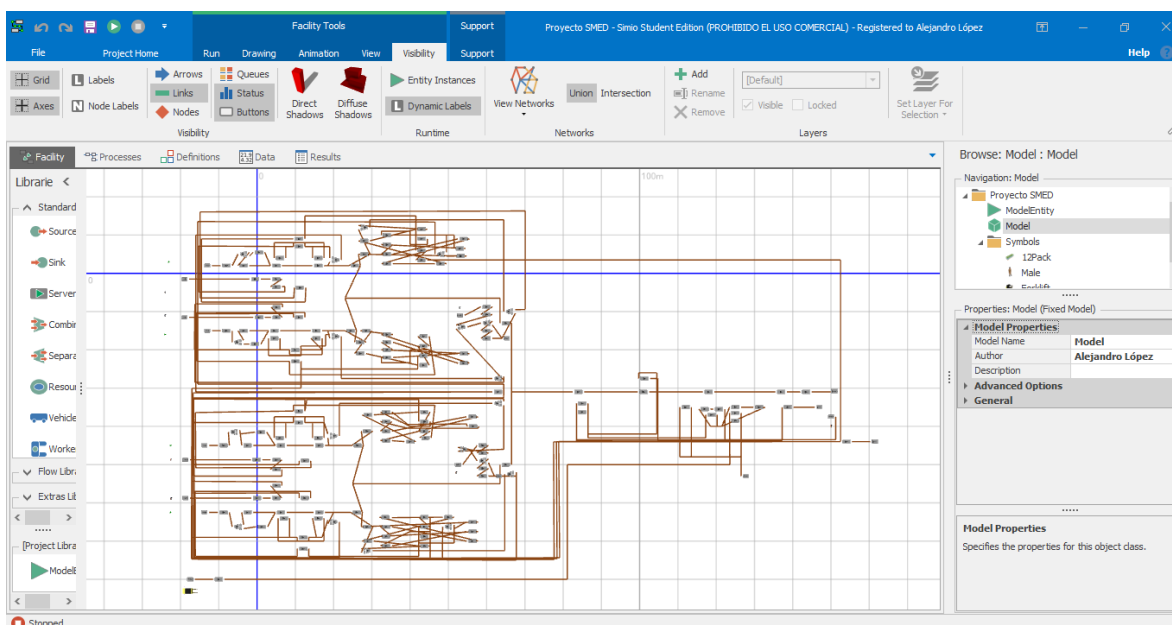


Figura 11: Programación del proceso de cambio de corrida en SIMIO (López, 2023).

En la Figura 11 se muestra una captura de pantalla del programa SIMIO donde se puede observar cómo se programaron los puntos y las áreas donde las entidades se pueden desplazar para realizar sus actividades correspondientes. Los rectángulos de color gris llamados “Servidores” son los puntos donde los operadores tienen que dirigirse de acuerdo con las actividades programadas dentro de SIMIO, estas actividades tienen su distribución de probabilidad respectiva que representan los tiempos que los operadores tardan en realizar cada actividad, cada servidor tiene su respectiva distribución de probabilidad que representa el tiempo en que los operadores tardan en realizar sus tareas, estas distribuciones se pueden observar en la Tabla 2, donde aparecen las actividades principales que deben seguir los operadores.

Por ultimo las líneas rojas que conectan a los “Servidores” son los caminos donde las entidades (operadores y piezas) pueden desplazarse dentro del programa. Estas áreas fueron representadas de esta forma para asemejarse al área real de templado.

En total para toda la programación de las actividades que siguen los operadores, se utilizaron ciento treinta y nueve “Servidores”, doce “Separadores” y diez “Combinadores”, con sus respectivos tiempos y programaciones para que siguieran la lógica del sistema real.

3.3.1. Programación del modelo de simulación.

En este apartado se explicará de manera general la programación que se realizó para simular el proceso de cambio de corrida, para cada entidad que representa a los operadores se le programaron las actividades que se deben realizar en cada área de proceso, para estas actividades se tomaron como referencia la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5, que son las actividades realizadas en el área de corte, pintura y curvatura respectivamente.

En la Figura 12 se puede observar la forma en que se programa en SIMIO para el operador de pintura, donde cada rectángulo de color gris son los iconos que representan a los “Servidores” donde se le indica a la entidad qué actividad debe hacer y su respectiva distribución con el tiempo que tarda en realizar dicha actividad. Las líneas que conectan cada

Servidor son “Paths” que estos le indican a la entidad a donde se debe de dirigir para realizar esta misma, dentro de estos “Paths” se le puede programar la distancia o el tiempo que tiene que desplazar el operador. Como se puede observar en la Tabla 4, el operador de pintura debe cumplir con doce actividades durante el proceso de cambio de corrida y en SIMIO estas doce actividades representan cinco “Servidores”, dos “Separadores” y un “Combinador” con su respectiva programación con comandos de SIMIO.

Otro punto importante dentro de la programación en SIMIO son los “Source” y los “Sink” que marca donde se genera la entidad y donde debe de salir para ser destruida. También dentro de cada Servidor se pueden programar “Triggers” y su funcionamiento dentro de este modelo consiste en lanzar un “Token” cuando la entidad pase por el servidor donde se programó y activar una de las diferentes herramientas de SIMIO, para este modelo se usó una opción llamada “Assign” que lo que hace es cambiar el estado de un “Servidor” de inactivo a activo y por medio de otra herramienta del programa llamada “Monitor” se pueda realizar esta acción dentro del programa diciéndole cuando debe de activarse. Un ejemplo puede ser que cuando el operador termine con todas sus actividades genere un “Trigger” al salir del último servidor, y por medio de esta programación dentro de SIMIO, le indica al operador de otra área que puede continuar con sus actividades activando el “Servidor” correspondiente.

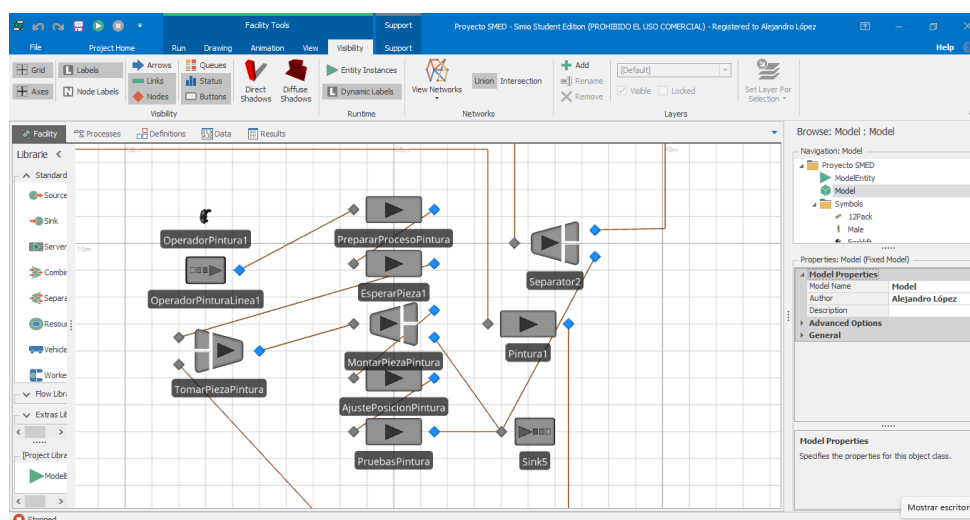


Figura 12: Programación Operador Pintura (López, 2023).

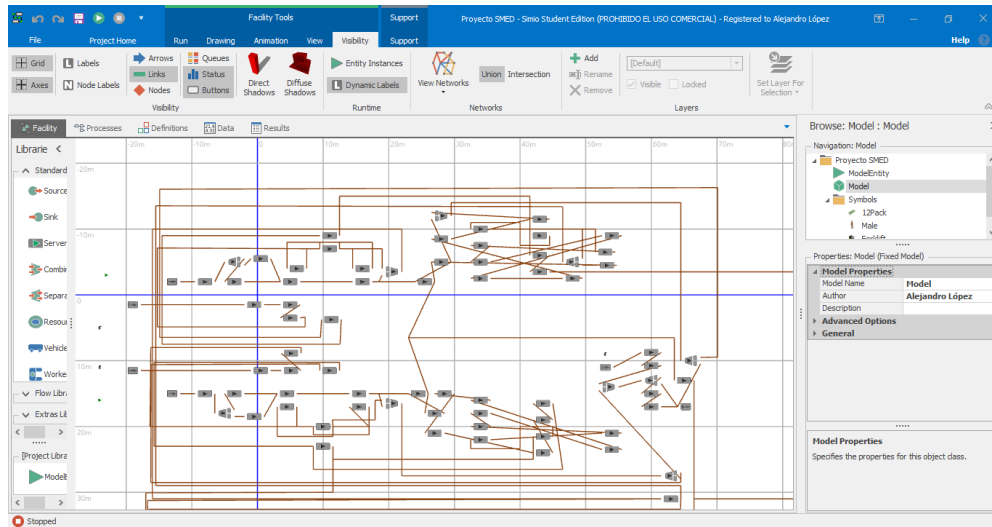


Figura 13: Programación Operador Corte: Línea 1 y 2 (López, 2023).

La Figura 13 muestra una captura de pantalla con la programación solo de las líneas 1 y 2 del área de corte no contando con las líneas 3 y 4 para una mejor visualización y resaltando que las líneas 1-4 y 2-3 son idénticas entre sí, dado que los operadores de corte varían ligeramente sus actividades y traslados, dependiendo la línea de corte.

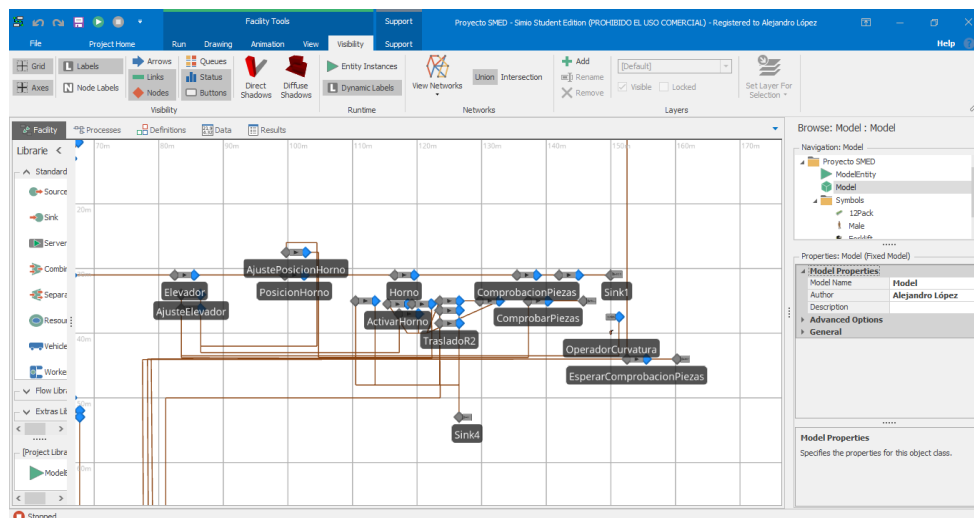


Figura 14: Programación Operador Curvatura y Montacargas (López, 2023).

En la Figura 14 se observa la programación que se desarrolló dentro del programa SIMIO, para seguir la lógica del sistema real, en el cual el operador de curvatura se coordina con el operador de montacargas para hacer el cambio de la maquina “R2” la cual, se encarga de

darle la curvatura al vidrio dependiendo el modelo que se fabrique y dependiendo el modelo que se quiera fabricar, se elige y se cambia el tipo de “R2”.

3.3.2. Vista 3D del modelo de simulación.

En este apartado se mostrará el diseño 3D del primer modelo de simulación dentro de SIMIO, en la siguiente figura se muestra una captura de pantalla de la ventana de simulación donde se pueden apreciar las diferentes entidades realizando sus actividades, así como también la división de las zonas de cada área. Cabe destacar que para una mejor visión de los recorridos de los operadores se optó que durante la simulación ocultar los diseños 3D de las maquinas que conforman el área de templado, pero en la Figura 12 se muestra el diseño en 3D completo, tomando en cuenta las máquinas y divisiones.

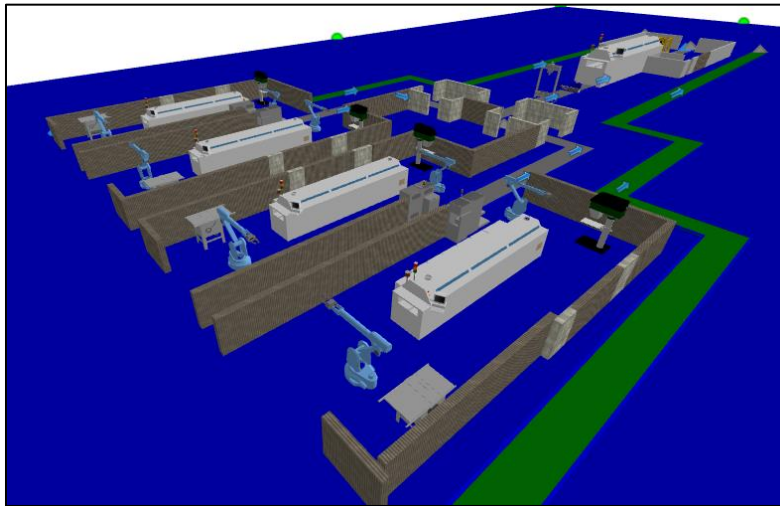


Figura 15: Modelo 3D completo (López, 2023).

3.3.3. Verificación y validación del modelo de simulación.

Se realizaron corridas piloto para verificar el funcionamiento del modelo, se examinó si las entidades (operadores y piezas) se trasladaban de forma correcta dentro del área establecida, si realizaban sus tareas en el orden programado y si cumplían con los tiempos registrados de acuerdo con las distribuciones de probabilidad mencionadas en apartados anteriores. Como dato importante el modelo simula un proceso completo de cambio de corrida.

Teniendo en cuenta las observaciones en las corridas piloto se llegó a la conclusión de que el modelo de simulación funciona de forma correcta, siguiendo la lógica del sistema real y posteriormente se procedió a realizar 20 corridas del modelo para calcular el tiempo promedio del cambio de corrida. Este tiempo, en cada corrida se tomó desde que los operadores empiezan a realizar sus respectivas tareas dentro de la simulación, hasta que 1 de los 4 operadores del área de corte terminen sus actividades y llegan al área de curvatura para comprobar si las medidas de la pieza cumplen con las especificaciones del cliente.

En la Tabla 6 se muestran los datos recabados en la visita a la planta de 20 cambios de modelo y también se muestran los resultados de las 20 corridas, calculando con estos datos, el promedio que nos arroja este modelo de simulación y el sistema real. Cabe destacar que el promedio del sistema real de acuerdo con datos proporcionados por ingenieros y operadores de la planta es de 65.1 min.

Con el resultado de estas corridas se pueden obtener las primeras conclusiones del modelo. Como se mencionó anteriormente, este modelo simula un cambio de corrida completo, por lo que el rango de tiempo desde que los operadores empiezan a realizar sus tareas hasta que sale la primera pieza que cumpla con las especificaciones del cliente, va desde 56 minutos hasta los 67 minutos, este rango cae dentro de los datos proporcionados por el personal de la planta, donde el promedio de su proceso es de 65.1 minutos. Con esto se puede concluir que el modelo funciona de manera correcta y los resultados caen dentro del promedio real, como último paso para corroborar que el modelo es representativo del sistema se debe hacer una validación estadística.

Teniendo estos datos se procede a realizar la validación estadística del modelo de simulación, para esto se realiza la prueba t-apareada, la cual confronta los datos reales del sistema con los datos obtenidos con el modelo de simulación. En la Tabla 6 se observan algunos de los cálculos que se deben de realizar de acuerdo con el procedimiento de la prueba t-apareada.

Tabla 6: Tiempos de 20 cambios de modelo y resultado de las 20 corridas de modelo de simulación en SIMIO.

Corridas	Tiempo promedio cambio de corrida del sistema (Xj)	Tiempo promedio cambio de corrida del modelo (Yj)	$Z_j = X_j - Y_j$	$[Z_i - \bar{Z}_{(n)}]^2$
1	63	66	-3	29.16
2	65	63	2	0.16
3	72	67	5	6.76
4	68	65	3	0.36
5	67	65	2	0.16
6	56	64	-8	108.16
7	69	58	11	73.96
8	61	64	-3	29.16
9	64	63	1	1.96
10	66	61	5	6.76
11	69	62	7	21.16
12	62	65	-3	29.16
13	70	56	14	134.56
14	65	62	3	0.36
15	57	62	-5	54.76
16	68	60	8	31.36
17	67	58	9	43.56
18	63	64	-1	11.56
19	67	63	4	2.56
20	63	66	-3	29.16
PROMEDIO	65.1	62.7	2.4	
			SUMA	614.8

Tiempo mínimo sistema real: 56 minutos.

Tiempo máximo sistema real: 72 minutos.

Tiempo mínimo modelo de simulación: 56 minutos.

Tiempo máximo modelo de simulación: 67 minutos.

Con estos cálculos ahora se procede a realizar la prueba t-apareada, se establece la hipótesis nula y la hipótesis alternativa, las cuales son las siguientes:

Con un nivel de confianza del 95% para Z, los cálculos se muestran a continuación:

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$\bar{Z}_{(20)} = \frac{\sum_{i=1}^{20} Z_i}{20} = 2.4$$

$$\hat{var}[\bar{Z}_{(20)}] = \frac{\sum_{i=1}^{20} [Z_i - \bar{Z}_{(20)}]^2}{20(20 - 1)} = 1.61$$

$$\bar{Z}_{(20)} \pm t_{20-1, 1-\frac{0.05}{2}} \sqrt{\hat{var}(\bar{Z}_{(20)})} = 2.4 \pm t_{20-1, 1-\frac{0.05}{2}} \sqrt{1.61}$$

$$= 2.4 \pm (2.093) \sqrt{1.61}$$

$$2.4 \pm 2.66$$

$$(5.06, -0.26)$$

El intervalo de confianza resultante si incluye al 0. Por lo que no se rechaza la hipótesis nula, se concluye que el modelo si representa al sistema.

3.3.4. Determinación del número óptimo de corridas en el modelo de simulación.

Para realizar la experimentación y analizar los resultados se debe obtener el número óptimo de corridas, esto se realiza con el objetivo de tener un resultado confiable estadísticamente.

Como primer paso se deben tener replicaciones del modelo para tomar tiempos promedio y sustituir los valores dentro de las ecuaciones, el número de replicaciones no afecta el resultado así que puede elegir cualquier número de preferencia menor a 30, en este caso se eligió usar 10 replicaciones tomando el tiempo promedio de cada corrida, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultado de las 10 replicaciones del modelo de simulación.

Replicación	Tiempo promedio de cambio de corrida en minutos
1	64
2	63
3	58
4	59
5	66
6	63
7	61
8	65
9	62
10	61

Se va a calcular el número óptimo de corridas con un nivel de confianza del 95% y con un error absoluto de 2 minutos y de los tiempos promedio se calcula la media y la varianza.

$$\text{Media } (\mu) = 62.2$$

$$\text{Varianza } (S^2) = 6.4$$

$$\text{Error absoluto } (\beta) = 2$$

$$\alpha = .05$$

Ahora con estos datos se procede a calcular el número de corridas óptimas.

$$i = 10$$

$$: 2.2622 \sqrt{\frac{6.4}{10}} = 1.80976 \leq 2$$

El número óptimo de corridas resultante son 10 y con esto se procede con la experimentación para estudiar y analizar el modelo.

3.4. Etapa 3: SMED.

En este apartado se muestran las 4 fases del SMED resaltando los posibles cambios que se podrían aplicar al proceso en cada fase y de igual manera, se muestran propuestas de mejora para que se reduzcan los tiempos de proceso de cambio de corrida, esto con el objetivo de evaluar la factibilidad de estas propuestas y posteriormente evaluar su impacto con un modelo de simulación de eventos discretos en el programa SIMIO.

3.4.1. Fase 1. Identificar actividades internas y externas.

Como primera etapa del SMED es la diferenciación de actividades externas e internas, por lo que, por medio del material grabado y documentado, se tomaron y se clasificaron las actividades que realizan los operadores de cada área, como lo muestran las tablas 8a, 8b, 8c, 8d, 8e, 9a, 9b, 10a y 10b.

Operación interna.

Preparación con maquina parada: Operaciones que no se pueden realizar con maquina en marcha.

Operación externa.

Preparación con maquina en marcha: Operaciones que se pueden realizar mientras la maquina está en funcionamiento.

Tabla 8a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA
1	Traslado del operador al controlador del brazo de corte	10	INTERNA
2	Mandar a "Home" al brazo de corte	30	INTERNA
3	Programar el brazo de corte para su respectivo modelo	20	EXTERNA
4	Ajustar la toma de vidrio	80	EXTERNA
5	Ajustar mesa de corte	60	EXTERNA
6	Modificar punto de corte 1	80	EXTERNA
7	Modificar punto de corte 2	80	EXTERNA
8	Traslado de material a entrada	50	EXTERNA
9	Ajuste de entrada de vidrio 1	80	EXTERNA
10	Colocar pieza en banda transportadora	80	EXTERNA
11	Cargar programa en automático	40	INTERNA
12	Traslado del operador al controlador de la máquina de corte y pulido	20	INTERNA
13	Cargar programa del modelo	35	INTERNA
14	Traslado del operador a la caja de herramientas por la llave de acceso	7	INTERNA
15	Traslado de regreso al panel de control	6	INTERNA
16	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA
17	Puesta de candado de seguridad	3	INTERNA
18	Traslado del operador al área de corte perimetral	6	INTERNA
19	Cambio de pieza de corte	480	INTERNA
20	Traslado del operador al panel de control	6	INTERNA

Tabla 8b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.

21	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA
22	Poner en marcha la máquina de corte	10	EXTERNA
23	Corte de pieza	40	EXTERNA
24	Desprendido de pieza	20	EXTERNA
25	Darle "Stop" para ajustar la máquina de pulido	2	INTERNA
26	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA
27	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA
28	Traslado del operador al área de pulido	6	INTERNA
29	Ajuste de área de pulido	120	INTERNA
30	Traslado del operador a la puerta	6	INTERNA
31	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA
32	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
33	Ajustar máquina de pulido	50	INTERNA
34	Pulido de pieza	25	EXTERNA
35	Darle "Stop" para entrar por la pieza	2	INTERNA
36	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA
37	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA
38	Traslado del operador al área de pulido para tomar la pieza	6	INTERNA
39	Traslado del operador a la mesa de comprobación de medidas	45	INTERNA
40	Búsqueda de guía para comprobación de medidas	40	INTERNA
41	Montar guía de medidas	10	INTERNA
42	Montar pieza sobre la guía de medición	3	INTERNA
43	Comprobación de medidas	30	INTERNA
44	Traslado del operador al área de barreno	47	INTERNA
45	Colocar la pieza en un lugar	3	INTERNA
46	Traslado del operador a la puerta de acceso del área de barreno	5	INTERNA
47	Tiempo en que la puerta da acceso al área	8	INTERNA
48	Desactivar sistema de la guía	30	INTERNA
49	Traslado del operador para desmontar la guía	5	INTERNA
50	Desmontar la guía	30	INTERNA
51	Traslado de la guía afuera del área	10	INTERNA

Tabla 8c: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.

52	Tomar la guía correspondiente al modelo	3	INTERNA
53	Trasladar la nueva guía al área de barreno	10	INTERNA
54	Montar la guía nueva	60	INTERNA
55	Conectar las mangueras de la guía	65	INTERNA
56	Traslado de operador a mesa de herramientas para taladro	7	INTERNA
57	Tomar herramienta para cambio de broca	5	INTERNA
58	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA
59	Quitar los broqueros	80	INTERNA
60	Traslado de operador a mesa de trabajo para cambio de broca	7	INTERNA
61	Cambio de broca	70	INTERNA
62	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA
63	Montar broqueros	120	INTERNA
64	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
65	Hacer pruebas del taladro	90	EXTERNA
66	Traslado del operador por pieza de prueba	5	INTERNA
67	Traslado del operador al taladro y montar la pieza de prueba	5	INTERNA
68	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
69	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA
70	Traslado del operador al taladro para cambiar posición de pieza	5	INTERNA
71	Traslado del operador al panel de control del taladro	5	INTERNA
72	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA
73	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA
74	Comprobar si los barrenos no presentan fallas	8	INTERNA
75	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
76	Ajustar programa del taladro	12	INTERNA
77	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA
78	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA
79	Comprobar si el barreno es correcto	8	INTERNA
80	Quitar pieza de prueba y colocarla fuera del área	8	INTERNA
81	Traslado del operador por la pieza maquinada	7	INTERNA

Tabla 8d: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.

82	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA
83	Montar pieza maquinada sobre la guía	7	INTERNA
84	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
85	Probar y configurar funcionamiento de la guía	25	EXTERNA
86	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA
87	Observar y configurar ajuste de mangueras de las guías	25	EXTERNA
88	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
89	Traslado del operador al taladro para mover la pieza de la guía	3	INTERNA
90	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA
91	Meter programa para prueba de guía y taladro	12	INTERNA
92	Maquinar la pieza para observar funcionamiento de guía y taladro	12	EXTERNA
93	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA
94	Tomar la pieza para inspección	10	INTERNA
95	Traslado del operador con pieza para banda transportadora	5	INTERNA
96	Traslado del operador al área de pintura	14	INTERNA
97	Comunicar a operador de pintura para marcar la pieza	7	INTERNA
98	Traslado del operador al panel de control para poner en automático	15	INTERNA
99	Configurar en automático el taladro	12	INTERNA
100	Cerrar la puerta	4	INTERNA
101	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	10	INTERNA
102	Configurar el programa a automático	15	INTERNA
103	Traslado del operador al controlador de brazo de corte	17	INTERNA
104	Ajuste de entrada de vidrio 2	80	EXTERNA
105	Probar el funcionamiento del brazo de corte	30	EXTERNA
106	Dejar el controlador con el programa cargado	5	INTERNA
107	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	17	INTERNA

Tabla 8e: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de corte.

108	Echar a andar la máquina de corte y pulido	90	EXTERNA
109	Traslado del operador al taladro	10	INTERNA
110	Configurar la toma de la pieza con el brazo automatizado	110	EXTERNA
111	Echar a andar el taladro	20	EXTERNA
112	Hacer una perforación	12	EXTERNA
113	Parar la banda transportadora de corte a pintura	4	INTERNA
114	Configurar la toma de la pieza hacia banda transportadora	135	EXTERNA
115	Traslado del operador para encender la banda transportadora	6	INTERNA
116	Colocar los aparatos en su lugar	12	INTERNA
	Esperar a que salga la pieza del horno para tomar medidas		

- Tiempo total promedio de actividades de operadores del área de corte en cambio de corrida = 53.3833 minutos
- Tiempo total promedio de actividades internas en área de corte = 31.88 minutos

Tabla 9a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de pintura.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA
1	Preparar material para cambio	5	INTERNA
2	Aflojar pernos	35	INTERNA
3	Cambiar la placa con el diseño de impresión	25	INTERNA
4	Apretar los pernos	65	INTERNA
5	Cargar programa	63	INTERNA
6	Comprobar funcionamiento de la guía	35	EXTERNA
7	Agregar tinta	10	INTERNA
	Esperar pieza de área de corte	7 a 15 min	

Tabla 9b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de pintura.

8	Ir por la pieza y colocarla en la mesa de impresión	43	INTERNA
9	Limpiar la pieza de ambos lados	73	INTERNA
10	Ajustar guía	195	INTERNA
11	Ajustar posición de impresión	368	EXTERNA
12	Mandar la pieza a horno	10	EXTERNA

- Tiempo total promedio de actividades de operadores del área de pintura en cambio de corrida (sin contar el tiempo de espera de pieza por parte de corte) = 15.45 minutos.
- Tiempo total promedio de actividades internas en área de pintura = 8.56 minutos.

Tabla 10a: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de curvatura.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA
1	Llamar al montacargas	10	INTERNA
2	Tiempo en que llega el montacargas al área del R2	240	INTERNA
3	Traslado del operador al panel de control del elevador	35	INTERNA
4	Parar el proceso del elevador	30	INTERNA
5	Traslado del operador al panel de control	15	INTERNA
6	Parar el proceso del R2	35	INTERNA
7	Traslado del operador al R2	6	INTERNA
8	Bajar los conductos superiores	15	EXTERNA
9	Quitar los seguros del R2	8	INTERNA
10	Sacar el R2	16	INTERNA
11	Desconectar el R2	50	INTERNA
12	Maniobra del montacargas de sacar el R2	180	INTERNA

Tabla 10b: Clasificación de actividades internas y externas de los operadores del área de curvatura.

13	Maniobra del montacargas de trasladar el nuevo R2	210	INTERNA
14	Traslado del operador al área de R2	35	INTERNA
15	Conectar el nuevo R2	50	INTERNA
16	Meter y asegurar el nuevo R2	26	INTERNA
17	Subir los conductos superiores	15	EXTERNA
18	Traslado del operador al elevador	35	INTERNA
	Esperar piezas para inspección	20 a 25 min	
19	Ajustar el elevador	216	INTERNA
20	Traslado del operador a la máquina de posición para entrada al horno	18	INTERNA
21	Ajustar máquina de posición para entrada al horno	192	INTERNA
22	Traslado del operador al panel de R2	45	INTERNA
23	Poner en marcha el R2	37	EXTERNA
24	Traslado de la pieza desde pintura hasta terminado	345	EXTERNA
25	Checar medidas (por pieza)	35	EXTERNA

- Tiempo total promedio de actividades de operador del área de curvatura en cambio de corrida (sin contar el tiempo de espera de pieza por parte de pintura) = 31.65 minutos.
- Tiempo total promedio de actividades internas en área de curvatura = 24.2 minutos.

Analizando el proceso de cada operador se observó como un área de oportunidad la zona de corte, dado que de las 116 actividades que realizan los operadores, se observó que 90 son actividades internas que consumen 31.88 min en promedio.

3.4.2. Fase 2. Convertir las actividades internas a externas.

En la segunda fase se debe hacer una reevaluación de las operaciones para considerar si algunas actividades internas se pueden eliminar, reducir o reclasificar a externas; esto se logra haciendo cambios en el proceso actual. Por tal motivo, como primer paso de esta etapa 2 se analizó el material obtenido con la finalidad de generar propuestas para cambiar algunas operaciones y con esto reducir el tiempo total del proceso.

Como se mencionó en el apartado anterior, de acuerdo con lo observado en el material grabado, se tomó la zona de corte como un área de oportunidad, esto debido a 2 puntos importantes; el primer punto es que el área de corte es donde los operadores realizan más actividades y traslados dentro del proceso de cambio de corrida y el segundo punto porque, como se explicó en el apartado “Desglose de las actividades de los operadores en base al material grabado” en el área de corte es donde, por así decirlo, parte todo el proceso, dado que esta área tiene que enviar una pieza maquinada a cada caseta del área de pintura para que pueda continuar sus actividades, para posteriormente cuando los operadores de pintura terminen de realizar sus tareas, envíen la pieza al área de curvatura para que puedan continuar su proceso.

Se analizó que existen traslados recurrentes que son innecesarios en el área de corte, en los siguientes puntos se marca el motivo de estos traslados que con previa preparación se pueden eliminar y estandarizar el proceso.

- Traslado por pieza de prueba para taladro: Para observar el funcionamiento y perforación del taladro se toma una pieza prueba que en algunas ocasiones no se tiene a la mano y requiere un traslado para buscar una, lo que se puede evitar si ya se cuenta con esta antes de iniciar la operación.
- Traslado por llave de seguridad para acceso a área de corte: Para entrar al área se necesita una llave de acceso, al no tenerla cerca se debe ir a buscar y este es un tiempo que se puede evitar si se carga durante el proceso.

-
- Traslado por herramienta para cambio de piezas: Se pudo notar que en algunas ocasiones no se contaba con la herramienta para el cambio de pieza, lo que genera tiempo en ir a tomar la herramienta cuando se puede preparar desde antes.

Dado que la mayor parte de los procesos de cambio de corrida dentro del área de templado son automatizados o requieren tener la máquina apagada, solo se eliminaron los traslados que se mostraron anteriormente, en las siguientes etapas se idearon sistemas para reducir los tiempos de las actividades que no se pudieron eliminar por completo.

3.4.3. Fase 3. Organizar las actividades internas a externas.

La tercera etapa consiste en organizar, estandarizar, secuenciar y mejorar las operaciones de preparación con el objetivo de optimizar el tiempo de la gestión de las fases de estas mismas.

A continuación, se muestran las mejoras a algunos procesos de preparación que se analizaron del material documentado y que se pueden aplicar al proceso para reducir tiempos al realizar actividades de cambio de corrida.

3.4.3.1. Preparación previa de molde para comprobar medidas de corte.

Se observó que en algunos casos al no tener montado el molde donde se comprueban si las medidas perimetrales de la pieza son correctas, se tenía que buscar entre todos los modelos para posteriormente colocarlo y tomar estas medidas, lo cual genera un desperdicio de tiempo que se puede evitar.



Figura 16: Operador buscando molde para comprobación de medidas perimetrales (López, 2023).

En la figura 16 se muestra un ejemplo de cómo el operador se encuentra buscando el molde o guía del modelo que se está elaborando en ese momento para tomar las medidas correspondientes, ya que encontró la guía de este modelo, debe desmontar un molde con el que se trabajó anteriormente, que todavía está puesto sobre la base; una vez que quitó el molde anterior del lugar, ahora debe colocar la guía del modelo que se va a fabricar en este cambio de corrida, y posteriormente, montar la pieza maquinada sobre esta misma y con un micrómetro tomar las medidas perimetrales para comprobar que el corte esté bien hecho.

Esta actividad se analizó que se podía mejorar mediante una preparación y montaje previo del molde o guía del modelo que se esté fabricando, para que se tenga listo cuando comience el proceso de cambio de corrida dado que, al buscar, desmontar la guía anterior y montar el molde adecuado, se convierte en desperdicio de tiempo donde bien se podría montar directamente la pieza maquinada si se tuviera ya lista la guía arriba de la base para así estandarizar el proceso.

3.4.3.2. Preparación previa de broqueros para taladro.

Durante el procedimiento que realizan los operadores de corte se pudo observar y analizar que las actividades en el cambio de broca se pueden eliminar si el equipo se prepara con antelación al inicio del cambio de corrida, para esto se necesitan tener reservas de broqueros

para que mientras todavía se esté produciendo un lote, el operador cambie la broca para el modelo que se vaya a maquinar cuando se complete este mismo, eliminado así esta actividad con sus respectivos traslados hacia la mesa de trabajo y también los traslados por herramienta y equipo.

Cabe destacar que la necesidad de utilizar más broqueros es para que no se utilice el mismo que anteriormente está montado en el taladro y así eliminar actividades que ayuden a reducir el tiempo del proceso, ya que se pudo observar que después de desmontar el broquero del taladro el operador realizaba tareas que se podían estandarizar y eliminar con previa preparación del equipo.

Aquí una explicación del procedimiento que siguen actualmente los operadores en el cambio de broca: después de desmontar el broquero, el operador se tiene que trasladar a la mesa de trabajo para el cambio de broca, en algunas ocasiones no se tiene lista la herramienta de trabajo para el cambio de esta por lo que conlleva a realizar dos traslados extra, después de tener la herramienta necesaria se tiene que fijar el broquero a la mesa de trabajo para poder quitar la broca. Posteriormente en el mismo broquero se monta y se fija la broca correspondiente al modelo que se va a producir para después llevarlo nuevamente al área de taladro e instalarlo a este mismo.

Con esta mejora el procedimiento sería el siguiente: el operador con la herramienta necesaria desmonta el broquero del modelo que se fabricó anteriormente para después tomar el broquero ya con la broca del modelo a fabricar que instaló previamente al inicio del proceso y lo monta al taladro, terminando así el proceso.

En la Figura 17 se observa a un operador del área de corte sustituyendo una broca durante el proceso de cambio de corrida.



Figura 17: Operador del área de corte realizando el cambio de broca (López, 2023).

3.4.3.3. Desconectar solo una manguera para ajuste de posición de los fijadores neumáticos en máquina de pulido.

De acuerdo con el material documentado del cambio de corrida, en el ajuste de posición de fijadores neumáticos para pulido de pieza, los cuales tienen la función de que por medio de un vacío que se genera al succionar la pieza, estos se fijan a la base del equipo y también fijan la pieza para que, mientras se esté realizando el proceso de pulido, el vidrio no se pueda mover; se pudo notar que durante este proceso algunos operadores desconectaban solo una manguera neumática de cada fijador, lo que impide la succión de estos mismos para así poder moverlos y ajustar su posición sobre la base a la medida y forma de la pieza que se está maquinando. Mientras que otros desconectaban las dos mangueras neumáticas con las que cuentan estos fijadores, llegando al mismo resultado.

En las Figuras 18 y 19 muestran cómo dos operadores diferentes desconectan dos y una manguera neumática respectivamente para realizar el proceso de ajuste de posición de fijadores.



Figura 18: Operador del área de corte realizando el ajuste de posición desconectando 2 mangueras neumáticas (López, 2023).



Figura 19: Operador del área de corte realizando el ajuste de posición desconectando solo una manguera neumática (López, 2023).

En las figuras anteriores se pueden observar a dos operadores distintos ajustando un fijador neumático para su ajuste de posición, la diferencia es que el operador que se muestra en la Figura 18 desconecta las 2 mangueras neumáticas del fijador donde se pueden ver sus puntas ligeramente dentro de los círculos rojos. Mientras que en la figura 19 el operador desconecta solo una manguera neumática del fijador, la cual está sosteniendo en su mano dentro del círculo rojo.

Así que para mejorar el proceso y para ahorrar tiempo de acuerdo con lo analizado, se estandariza el proceso para que los operadores de corte solo desconecten una manguera neumática en lugar de las dos y así reducir el tiempo del proceso.

Con estas mejoras de preparación y estandarización de las actividades se concluye la tercera etapa del SMED, dando paso a la cuarta y última etapa de esta técnica.

3.4.4. Fase 4. Eliminar el set-up.

En la cuarta etapa es donde se realiza un análisis profundo de las operaciones internas para minimizar o eliminar el tiempo de operación de estas actividades.

A continuación, se muestran las mejoras a implementar para posteriormente ser evaluadas mediante un segundo modelo de Simulación de Eventos Discretos en el programa SIMIO, estas mejoras consisten en el cambio rápido de equipo, incorporación de nuevos elementos y análisis de inclusión de operarios para realizar actividades en paralelo.

3.4.4.1. Juntar las puntas de las mangueras neumáticas.

Esta mejora surgió a raíz que se observó que el operador al montar la guía para taladro pierde un tiempo en conectar las mangueras neumáticas de la misma, si bien, estas ya tienen un código de color que facilitan la identificación de cada grupo para su conexión, pero al tener las puntas dispersas, como se muestra en la Figura 20, se pierde tiempo en la conexión por lo que para mejorar el proceso si se juntan un poco más las puntas (dejando un espacio para tener margen de movimiento) se facilita este proceso, teniendo así la conexión más directa, estas mangueras se pueden sujetar por medio de cinchos de plástico.



Figura 20: Muestra de mangueras dispersas en guía para taladro (López, 2023).

En la Figura 20 se observa como las mangueras neumáticas están dispersas entre sí, por esta razón se pierde un tiempo en juntar el grupo de mangueras que se van a conectar, dado que se debe estar juntando una por una como se muestra en la Figura 21.



Figura 21: Operador tomando las mangueras neumáticas correspondientes para conexión de guía para taladro (López, 2023).

Como se puede observar en la Figura 21, aunque el operador ya conectó la mayoría de las mangueras de la guía, aún debe de juntar las que faltan debido a esta separación que existen entre sí y es por esta razón que, al juntar las mangueras, sujetándolas un poco más cerca de

las puntas mediante cinchos de plástico, la conexión sería más rápida y directa, disminuyendo el tiempo de montaje de la guía para taladro.

3.4.4.2. Identificadores de color en mangueras neumáticas de fijadores de pieza para pulido.

Se observó que durante el ajuste de posición para fijar el vidrio que entra a pulido se deben de desconectar las mangueras de los fijadores para cambiar la posición de acuerdo con la medida del modelo que se va a fabricar. Se notó que los operadores toman un tiempo para buscar la manguera que desean desconectar debido a que el color de todas las mangueras es parecido, tal como se muestra en la Figura 22, esto mismo no se observó durante la conexión de la guía para taladro debido a que las mangueras neumáticas de esta cuentan con colores diferentes que facilitaban su identificación.



Figura 22: Operador buscando manguera neumática para ajustar un fijador en área de pulido (López, 2023).

En la Figura 22 se observan las mangueras que van conectadas a los fijadores son de colores muy similares, lo que dificulta al operador la identificación inmediata de la conexión que necesita desconectar para poder ajustar el fijador, lo que conlleva a que este siga el rastro de la manguera y genere un desperdicio de tiempo que se puede eliminar.

Dicho esto, para optimizar el proceso y para que el operador identifique de forma más rápida la manguera neumática que desea desconectar, la mejora que se va a evaluar es que cada fijador cuente con un color de manguera diferente, lo que facilitaría al operador la identificación de cada fijador con sus respectivas conexiones neumáticas.

3.4.4.3. Contar con piezas de cada modelo para el área de pintura.

Durante la visita a la planta y con apoyo del material grabado se pudo observar que durante el cambio de corrida el operador de pintura debe esperar una pieza ya cortada y pulida del área de corte para que empiece a ajustar la posición de impresión, tal como se explica en el apartado “Desglose de las actividades de los operadores en base al material documentado”; cuando inicia el cambio de corrida el operador de pintura realiza primero los ajustes que no necesitan una pieza ya maquinada por el operador de corte y muy frecuentemente debe esperar esta pieza de 7 a 10 minutos para que empiece a ejecutar sus operaciones restantes, esto es un tiempo muerto considerable, dado que durante este periodo de espera, el operador de pintura permanece en paro sin poder realizar algún ajuste.



Figura 23: Operador trayendo pieza del área de corte para realizar ajustes (López, 2023).

En la Figura 23 se observa como el operador de pintura va por la pieza ya maquinada al área de corte, ya que sin esta no puede realizar sus ajustes de impresión y esto genera desperdicio

de tiempo al tener que esperar esta misma. Para evitar este tiempo de espera la mejora que se desea evaluar es que se tengan piezas de cada modelo guardadas de procesos anteriores para que el operador de pintura no tenga que esperar a realizar sus operaciones de ajuste que necesitan una pieza ya cortada.

3.4.4.4. Inclusión de operador pintura al área de corte para realizar actividades en paralelo.

Siguiendo un poco con el punto anterior en el cual se plantea una forma de que el operador de impresión no tenga tiempos muertos, también otra mejora que se desea probar es que, durante este tiempo de espera, el operador de impresión se involucre con tareas del área de corte, solo en las líneas 2 y 3, realizando operaciones en paralelo con el fin de reducir tiempos. Al ser solo dos operadores del área de pintura lo que se decide es que trabajen en las 2 líneas más cercanas con su área, las cuales son las que ya se mencionaron, y para las líneas 1 y 4 seguirán realizando todas sus actividades con sus respectivas mejoras.

Las operaciones del área de corte que realizaría el operador de pintura son desmontar y montar la guía de taladro y quitar el broquero. Lo que genera que el operador de corte se libere de estas actividades facilitando también su proceso, dado que al tener ya desmontado el broquero, llegaría directamente a montar el nuevo con la broca correspondiente al modelo, para posteriormente al también ya tener instalada la guía del taladro se dedicaría solo a realizar pruebas del barreno sobre la pieza.

También al involucrar al operador de pintura en estas actividades se eliminan los tiempos muertos de estos operadores haciendo que el nivel de desempeño del trabajador aumente y disminuyan los tiempos del proceso de cambio de corrida.

Con esto termina la implementación de las 4 fases del SMED al proceso del cambio de corrida, en el siguiente apartado se muestran cómo quedan las actividades de los operadores ya con las mejoras implementadas.

3.4.5. Actividades de los operadores implementando mejoras de SMED.

En este apartado se muestran como quedaron las actividades de los operadores de corte y pintura, ya con las mejoras implementadas del SMED, con sus respectivos tiempos. Cabe señalar que al área de curvatura no se le realizó ninguna mejora debido a que la mayoría del tiempo muerto es porque debe esperar la pieza ya maquinada por las dos áreas anteriores, este tiempo de espera va desde los 15 hasta los 20 minutos, por lo que se realizó más énfasis a estas áreas para que enviaran la pieza lo más pronto posible y que el operador de curvatura pudiera ejecutar sus tareas de forma más rápida, para que se reduzca así el tiempo de proceso.

La eliminación y el cambio en los tiempos dentro de las actividades fueron acordadas de acuerdo con el material documentado, se analizó cuanto tiempo se podía eliminar o reducir al implementar cada mejora y el tiempo que se establece en cada tabla es de acuerdo con este análisis.

Tabla 11a: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA	DURACION CON MEJORAS (SEG)
1	Traslado del operador al controlador del brazo de corte	10	INTERNA	10
2	Mandar a "Home" al brazo de corte	30	INTERNA	30
3	Programar el brazo de corte para su respectivo modelo	20	EXTERNA	20
4	Ajustar la toma de vidrio	80	EXTERNA	80
5	Ajustar mesa de corte	60	EXTERNA	60
6	Modificar punto de corte 1	80	EXTERNA	80
7	Modificar punto de corte 2	80	EXTERNA	80
8	Traslado de material a entrada	50	EXTERNA	50
9	Ajuste de entrada de vidrio 1	80	EXTERNA	80
10	Colocar pieza en banda transportadora	80	EXTERNA	80
11	Cargar programa en automático	40	INTERNA	40
12	Traslado del operador al controlador de la máquina de corte y pulido	20	INTERNA	20

Tabla 11b: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED.

13	Cargar programa del modelo	35	INTERNA	35
	Traslado del operador a la caja de herramientas por la llave de acceso	7	INTERNA	0
	Traslado de regreso al panel de control	6	INTERNA	0
14	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
15	Puesta de candado de seguridad	3	INTERNA	3
16	Traslado del operador al área de corte perimetral	6	INTERNA	6
17	Cambio de pieza de corte	480	INTERNA	420
18	Traslado del operador al panel de control	6	INTERNA	6
19	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA	15
20	Poner en marcha la máquina de corte	10	EXTERNA	10
21	Corte de pieza	40	EXTERNA	40
22	Desprendido de pieza	20	EXTERNA	20
23	Darle "Stop" para ajustar la máquina de pulido	2	INTERNA	2
24	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
25	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA	5
26	Traslado del operador al área de pulido	6	INTERNA	6
27	Ajuste de área de pulido	120	INTERNA	120
28	Traslado del operador a la puerta	6	INTERNA	6
29	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA	15
30	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
31	Ajustar máquina de pulido	50	INTERNA	40
32	Pulido de pieza	25	EXTERNA	25
33	Darle "Stop" para entrar por la pieza	2	INTERNA	2
34	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
35	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA	5
36	Traslado del operador al área de pulido para tomar la pieza	6	INTERNA	6
37	Traslado del operador a la mesa de comprobación de medidas	45	INTERNA	45
	Búsqueda de guía para comprobación de medidas	40	INTERNA	0
	Montar guía de medidas	10	INTERNA	0
38	Montar pieza sobre la guía de medición	3	INTERNA	3
39	Comprobación de medidas	30	INTERNA	30

Tabla 11c: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED.

40	Traslado del operador al área de barreno	47	INTERNA	47
41	Colocar la pieza en un lugar	3	INTERNA	3
42	Traslado del operador a la puerta de acceso del área de barreno	5	INTERNA	5
43	Tiempo en que la puerta da acceso al área	8	INTERNA	8
	Desactivar sistema de la guía	30	INTERNA	0
	Traslado del operador para desmontar la guía	5	INTERNA	0
	Desmontar la guía	30	INTERNA	0
	Trasladar la guía afuera del área	10	INTERNA	0
	Tomar la guía correspondiente al modelo	3	INTERNA	0
	Trasladar la nueva guía al área de barreno	10	INTERNA	0
	Montar la guía nueva	60	INTERNA	0
	Conectar las mangueras de la guía	65	INTERNA	0
	Traslado de operador a mesa de herramientas para taladro	7	INTERNA	0
	Tomar herramienta para cambio de broca	5	INTERNA	0
	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	0
	Quitar los broqueros	80	INTERNA	0
	Traslado de operador a mesa de trabajo para cambio de broca	7	INTERNA	0
	Cambio de broca	70	INTERNA	0
	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	0
44	Montar broqueros	120	INTERNA	120
45	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
46	Hacer pruebas del taladro	90	EXTERNA	90
	Traslado del operador por pieza de prueba	5	INTERNA	0
	Traslado del operador al taladro y montar la pieza de prueba	5	INTERNA	0
47	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
48	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
49	Traslado del operador al taladro para cambiar posición de pieza	5	INTERNA	5
50	Traslado del operador al panel de control del taladro	5	INTERNA	5
51	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
52	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5

Tabla 11d: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED.

53	Comprobar si los barrenos no presentan fallas	8	INTERNA	8
54	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
55	Ajustar programa del taladro	12	INTERNA	12
56	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
57	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
58	Comprobar si el barreno es correcto	8	INTERNA	8
59	Quitar pieza de prueba y colocarla fuera del área	8	INTERNA	8
60	Traslado del operador por la pieza maquinada	7	INTERNA	7
61	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	7
62	Montar pieza maquinada sobre la guía	7	INTERNA	7
63	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
64	Probar y configurar funcionamiento de la guía	25	EXTERNA	25
65	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
66	Observar y configurar ajuste de mangueras de las guías	25	EXTERNA	25
67	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
68	Traslado del operador al taladro para mover la pieza de la guía	3	INTERNA	3
69	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
70	Meter programa para prueba de guía y taladro	12	INTERNA	12
71	Maquinar la pieza para observar funcionamiento de guía y taladro	12	EXTERNA	12
72	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
73	Tomar la pieza para inspección	10	INTERNA	10
74	Traslado del operador con pieza para banda transportadora	5	INTERNA	5
	Traslado del operador al área de pintura	14	INTERNA	0
	Comunicar a operador de pintura para marcar la pieza	7	INTERNA	0
75	Traslado del operador al panel de control para poner en automático	15	INTERNA	15
76	Configurar en automático el taladro	12	INTERNA	12
77	Cerrar la puerta	4	INTERNA	4
78	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	10	INTERNA	10

Tabla 11e: Actividades de los operadores de corte líneas 2 y 3 con la implementación del SMED.

79	Configurar el programa a automático	15	INTERNA	15
80	Traslado del operador al controlador de brazo de corte	17	INTERNA	17
81	Ajuste de entrada de vidrio 2	80	EXTERNA	80
82	Probar el funcionamiento del brazo de corte	30	EXTERNA	30
83	Dejar el controlador con el programa cargado	5	INTERNA	5
84	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	17	INTERNA	17
85	Echar a andar la máquina de corte y pulido	90	EXTERNA	90
86	Traslado del operador al taladro	10	INTERNA	10
87	Configurar la toma de la pieza con el brazo automatizado	110	EXTERNA	110
88	Echar a andar el taladro	20	EXTERNA	20
89	Hacer una perforación	12	EXTERNA	12
90	Parar la banda transportadora de corte a pintura	4	INTERNA	4
91	Configurar la toma de la pieza hacia banda transportadora	135	EXTERNA	135
92	Traslado del operador para encender la banda transportadora	6	INTERNA	6
93	Colocar los aparatos en su lugar	12	INTERNA	12
	Esperar a que salga la pieza del horno para tomar medidas			

En las Tablas 11a, 11b, 11c, 11d y 11e se muestra como quedaron las actividades de los operadores de las líneas 2 y 3 del área de corte ya implementando las mejoras que se obtuvieron con la implementación del SMED. Las actividades sombreadas en color rojo son las operaciones que se eliminaron o cambiaron dentro del proceso de cambio de corrida y en la última columna, de color rojo se observan los nuevos tiempos de estas operaciones que se eliminaron, o bien, redujeron sus tiempos. De las 116 actividades que realizaba el operador de corte en el anterior proceso, ahora solo realiza 93.

- Tiempo total del proceso del operador de corte líneas 2 y 3 sin SMED = 53.38 minutos.

- Tiempo total del proceso del operador de corte líneas 2 y 3 con SMED = 44.4 minutos.

Tabla 12a: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA	DURACION CON MEJORAS (SEG)
1	Traslado del operador al controlador del brazo de corte	10	INTERNA	10
2	Mandar a "Home" al brazo de corte	30	INTERNA	30
3	Programar el brazo de corte para su respectivo modelo	20	EXTERNA	20
4	Ajustar la toma de vidrio	80	EXTERNA	80
5	Ajustar mesa de corte	60	EXTERNA	60
6	Modificar punto de corte 1	80	EXTERNA	80
7	Modificar punto de corte 2	80	EXTERNA	80
8	Traslado de material a entrada	50	EXTERNA	50
9	Ajuste de entrada de vidrio 1	80	EXTERNA	80
10	Colocar pieza en banda transportadora	80	EXTERNA	80
11	Cargar programa en automático	40	INTERNA	40
12	Traslado del operador al controlador de la máquina de corte y pulido	20	INTERNA	20
13	Cargar programa del modelo	35	INTERNA	35
	Traslado del operador a la caja de herramientas por la llave de acceso	7	INTERNA	0
	Traslado de regreso al panel de control	6	INTERNA	0
14	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
15	Puesta de candado de seguridad	3	INTERNA	3
16	Traslado del operador al área de corte perimetral	6	INTERNA	6
17	Cambio de pieza de corte	480	INTERNA	420
18	Traslado del operador al panel de control	6	INTERNA	6
19	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA	15
20	Poner en marcha la máquina de corte	10	EXTERNA	10
21	Corte de pieza	40	EXTERNA	40
22	Desprendido de pieza	20	EXTERNA	20
23	Darle "Stop" para ajustar la máquina de pulido	2	INTERNA	2

Tabla 12b: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED.

24	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
25	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA	5
26	Traslado del operador al área de pulido	6	INTERNA	6
27	Ajuste de área de pulido	120	INTERNA	120
28	Traslado del operador a la puerta	6	INTERNA	6
29	Quitar candado y cerrar la puerta	15	INTERNA	15
30	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
31	Ajustar máquina de pulido	50	INTERNA	40
32	Pulido de pieza	25	EXTERNA	25
33	Darle "Stop" para entrar por la pieza	2	INTERNA	2
34	Tiempo en que la puerta da acceso al área	7	INTERNA	7
35	Puesta de candado de seguridad	5	INTERNA	5
36	Traslado del operador al área de pulido para tomar la pieza	6	INTERNA	6
37	Traslado del operador a la mesa de comprobación de medidas	45	INTERNA	45
	Búsqueda de guía para comprobación de medidas	40	INTERNA	0
	Montar guía de medidas	10	INTERNA	0
38	Montar pieza sobre la guía de medición	3	INTERNA	3
39	Comprobación de medidas	30	INTERNA	30
40	Traslado del operador al área de barreno	47	INTERNA	47
41	Colocar la pieza en un lugar	3	INTERNA	3
42	Traslado del operador a la puerta de acceso del área de barreno	5	INTERNA	5
43	Tiempo en que la puerta da acceso al área	8	INTERNA	8
44	Desactivar sistema de la guía	30	INTERNA	30
45	Traslado del operador para desmontar la guía	5	INTERNA	5
46	Desmontar la guía	30	INTERNA	30
47	Trasladar la guía afuera del área	10	INTERNA	10
48	Tomar la guía correspondiente al modelo	3	INTERNA	3
49	Trasladar la nueva guía al área de barreno	10	INTERNA	10
50	Montar la guía nueva	60	INTERNA	60
51	Conectar las mangueras de la guía	65	INTERNA	25
	Traslado de operador a mesa de herramientas para taladro	7	INTERNA	0
	Tomar herramienta para cambio de broca	5	INTERNA	0

Tabla 12c: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED.

	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	0
	Quitar los broqueros	80	INTERNA	0
	Traslado de operador a mesa de trabajo para cambio de broca	7	INTERNA	0
	Cambio de broca	70	INTERNA	0
	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	0
52	Montar broqueros	120	INTERNA	120
53	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
54	Hacer pruebas del taladro	90	EXTERNA	90
	Traslado del operador por pieza de prueba	5	INTERNA	0
	Traslado del operador al taladro y montar la pieza de prueba	5	INTERNA	0
55	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
56	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
57	Traslado del operador al taladro para cambiar posición de pieza	5	INTERNA	5
58	Traslado del operador al panel de control del taladro	5	INTERNA	5
59	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
60	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
61	Comprobar si los barrenos no presentan fallas	8	INTERNA	8
62	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
63	Ajustar programa del taladro	12	INTERNA	12
64	Hacer una perforación en pieza de prueba	12	EXTERNA	12
65	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
66	Comprobar si el barreno es correcto	8	INTERNA	8
67	Quitar pieza de prueba y colocarla fuera del área	8	INTERNA	8
68	Traslado del operador por la pieza maquinada	7	INTERNA	7
69	Traslado del operador al taladro	7	INTERNA	7
70	Montar pieza maquinada sobre la guía	7	INTERNA	7
71	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
72	Probar y configurar funcionamiento de la guía	25	EXTERNA	25
73	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
74	Observar y configurar ajuste de mangueras de las guías	25	EXTERNA	25

Tabla 12d: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED.

75	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
76	Traslado del operador al taladro para mover la pieza de la guía	3	INTERNA	3
77	Traslado del operador al panel de control	5	INTERNA	5
78	Meter programa para prueba de guía y taladro	12	INTERNA	12
79	Maquinar la pieza para observar funcionamiento de guía y taladro	12	EXTERNA	12
80	Traslado del operador al taladro	5	INTERNA	5
81	Tomar la pieza para inspección	10	INTERNA	10
82	Traslado del operador con pieza para banda transportadora	5	INTERNA	5
	Traslado del operador al área de pintura	14	INTERNA	0
	Comunicar a operador de pintura para marcar la pieza	7	INTERNA	0
83	Traslado del operador al panel de control para poner en automático	15	INTERNA	15
84	Configurar en automático el taladro	12	INTERNA	12
85	Cerrar la puerta	4	INTERNA	4
86	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	10	INTERNA	10
87	Configurar el programa a automático	15	INTERNA	15
88	Traslado del operador al controlador de brazo de corte	17	INTERNA	17
89	Ajuste de entrada de vidrio 2	80	EXTERNA	80
90	Probar el funcionamiento del brazo de corte	30	EXTERNA	30
91	Dejar el controlador con el programa cargado	5	INTERNA	5
92	Traslado del operador al panel de control de corte y pulido	17	INTERNA	17
93	Echar a andar la máquina de corte y pulido	90	EXTERNA	90
94	Traslado del operador al taladro	10	INTERNA	10
95	Configurar la toma de la pieza con el brazo automatizado	110	EXTERNA	110
96	Echar a andar el taladro	20	EXTERNA	20
97	Hacer una perforación	12	EXTERNA	12

Tabla 12e: Actividades de los operadores de corte líneas 1 y 4 con la implementación del SMED.

98	Parar la banda transportadora de corte a pintura	4	INTERNA	4
99	Configurar la toma de la pieza hacia banda transportadora	135	EXTERNA	135
100	Traslado del operador para encender la banda transportadora	6	INTERNA	6
101	Colocar los aparatos en su lugar	12	INTERNA	12
	Esperar a que salga la pieza del horno para tomar medidas			

En las Tablas 12a, 12b, 12c, 12d y 12e se muestra como quedaron las actividades de los operadores de las líneas 1 y 4 del área de corte ya implementando las mejoras que se obtuvieron con la implementación del SMED. Las actividades sombreadas en color rojo son las operaciones que se eliminaron o cambiaron dentro del proceso de cambio de corrida y en la última columna, de color rojo se observan los nuevos tiempos de estas operaciones que se eliminaron, o bien, redujeron sus tiempos. De las 116 actividades que realizaba el operador de corte en el anterior proceso, ahora solo realiza 101.

- Tiempo total del proceso del operador de corte líneas 1 y 4 sin SMED = 53.38 minutos.
- Tiempo total del proceso del operador de corte líneas 1 y 4 con SMED = 47.45 minutos.

Ahora en la Tabla 13 se muestra como quedó el orden de las actividades del operador de pintura, ya implementando las mejoras y las operaciones que realiza dentro del área de corte en las líneas 2 y 3 para eliminar el tiempo de espera.

Tabla 13: Actividades de los operadores de pintura con la implementación del SMED.

#	ACTIVIDAD	DURACION (SEG)	IDENTIFICAR OPERACIÓN INTERNA/EXTERNA
1	Preparar material para cambio	5	INTERNA
2	Aflojar pernos	35	INTERNA
3	Cambiar la placa con el diseño de impresión	25	INTERNA
4	Apretar los pernos	65	INTERNA
5	Cargar programa	63	INTERNA
6	Comprobar funcionamiento de la guía	35	EXTERNA
7	Agregar tinta	10	INTERNA
8	Traslado del operador al panel de control del taladro	5	INTERNA
9	Desactivar sistema de la guía	30	INTERNA
10	Traslado del operador para desmontar la guía	5	INTERNA
11	Desmontar la guía	30	INTERNA
12	Trasladar la guía afuera del área	10	INTERNA
13	Tomar la guía correspondiente al modelo	3	INTERNA
14	Trasladar la nueva guía al área de barreno	10	INTERNA
15	Montar la guía nueva	60	INTERNA
16	Conectar las mangueras de la guía	25	INTERNA
17	Quitar los broqueros	80	INTERNA
18	Ir por la pieza y colocarla en la mesa de impresión	43	INTERNA
19	Limpiar la pieza de ambos lados	73	INTERNA
20	Ajustar guía	195	INTERNA
21	Ajustar posición de impresión	368	EXTERNA
22	Mandar la pieza a horno	10	EXTERNA

Como se puede observar en la Tabla 13 se muestra el orden de las actividades del operador de pintura después de implementar el SMED, de las 12 actividades que eran anteriormente, aumentaron a 22 pero se eliminó el tiempo de espera que iba desde los 7 a los 10 minutos donde el operador no podía realizar ninguna actividad, ahora este tiempo se aprovecha para que el operador realice operaciones en el área de corte.

- Tiempo total del proceso del operador de pintura sin SMED y con el tiempo de espera = 22.45 a 25.45 minutos.

-
- Tiempo total del proceso del operador de corte con SMED = 19.75 minutos.

Con esto se concluye esta tercera etapa de la metodología donde se explicó cómo se implementó la técnica SMED en sus cuatro fases y concluyendo con la estandarización de las actividades de los operadores. Ahora teniendo estas mejoras en el proceso, se probará su impacto mediante un segundo modelo de Simulación de Eventos Discretos en el programa SIMIO.

3.5. Etapa 4: Segundo modelo de simulación para evaluar el SMED.

Para evaluar el impacto de las mejoras expuestas en el apartado anterior al implementar el SMED en el proceso de cambio de corrida; se realiza un segundo modelo de Simulación de Eventos Discretos representando al nuevo sistema implementando el SMED en el programa SIMIO, modificando los tiempos en los que se deben de realizar las actividades con el proceso ya optimizado y de igual manera los cambios que sufrieron los operadores de corte y pintura, para reducir el tiempo de proceso y eliminar los tiempos muertos tal como se explicó en la Etapa 3.

Para esta etapa se tomaron como referencia para la programación la secuencia y los tiempos de las Tablas 11a, 11b, 11c, 11d y 11e para programar las actividades del operador de corte líneas 2 y 3, para las líneas 1 y 4 se tomaron las Tablas 12a, 12b, 12c, 12d y 12e. Por último la Tabla 13 para los operadores de pintura.

Para definir la distribución de probabilidad se tomó como guía la Tabla 2 que fue elaborada con ayuda del personal experto de cada área y se le restó el tiempo de cada actividad o traslado que se eliminó en el desarrollo del SMED, y de igual manera también se le redujo el tiempo de actividades que se optimizaron para que se realizaran en menor tiempo. Por lo que en las Tablas 14a y 14b se muestran las nuevas distribuciones de probabilidad de cada actividad que representa el tiempo en que se realizan estas tareas ya con la optimización que se logró con el SMED.

Tabla 14a: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores con SMED.

Área	Actividad	Tiempo(min)
CORTE	Ajuste de brazo y mesa de corte	DT (6, 9.5, 12.5)
	Cambio de pieza de corte	DT (5, 8, 9.5)
	Ajuste de posición para pulidora	DT (1, 2.33, 3.6)
	Rectificación de medidas de corte	DT (0.66, 1.1, 1.33)

Tabla 14b: Distribución de probabilidad de cada actividad realizada por los operadores con SMED.

CORTE	Montaje y ajuste de guía (líneas 1 y 4)	DT (1.6, 2.8, 4)
	Cambio de Brocas (líneas 1 y 4)	DT (0.9, 1.33, 2)
	Montaje de Broqueros	DT (1.1, 2.25, 3.33)
	Ajuste de brazo en área de barrenos	DT (3, 5, 8)
PINTURA	Carga del programa y ajuste inicial de posición de impresión	DU (3, 5)
	Montaje y ajuste de guía (líneas 2 y 3)	DT (1.6, 2.8, 4)
	Cambio de Brocas (líneas 2 y 3)	DT (0.9, 1.33, 2)
	Ajuste y rectificación de impresión	DT (6.5, 9.5, 12)
CURVATURA	Cambio R2	DT (7.5, 10, 15)
	Configuración y ajuste de elevador	DT (3, 3.6, 4)
	Ajuste de posición	DT (2.5, 3.1, 4)
	Cambio de mesa para verificación	DU (2, 4)

3.5.1. Programación del segundo modelo de simulación.

De acuerdo a la información proporcionada en los apartados anteriores se modeló un nuevo sistema implementando las mejoras obtenidas al realizar el SMED, en la Figura 24 se muestra una vista general de la nueva programación que se hizo dentro del programa SIMIO, donde se muestra un ligero cambio con respecto a la programación del sistema real del proceso, dado que, donde se modificó en gran parte este modelo fue en la reducción de sus tiempos y en la eliminación de actividades del operador de corte y, con respecto al operador de pintura,

como se observa en la Tabla 12 aumentó el número de actividades para eliminar el desperdicio de tiempo que se generaba al esperar la pieza.

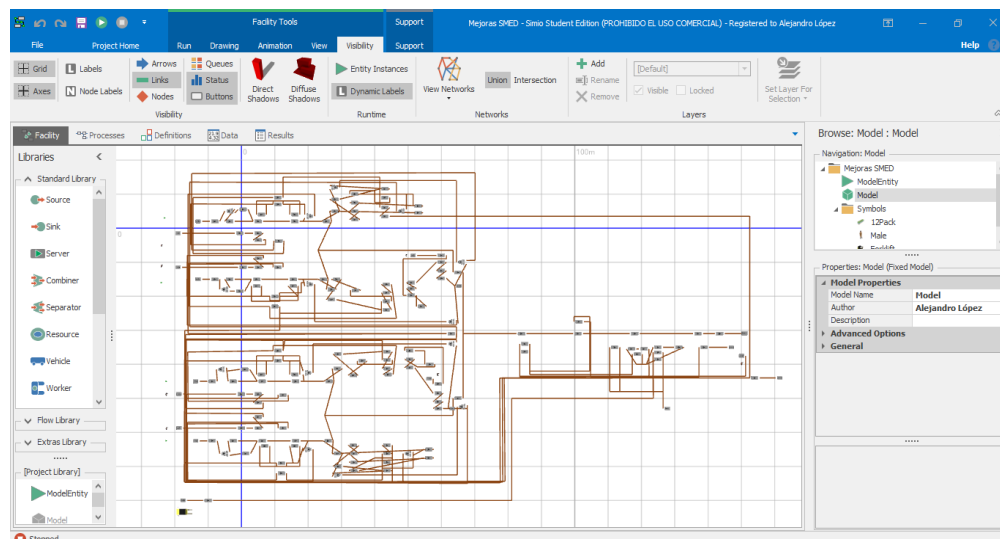


Figura 24: Vista general del segundo modelo de simulación (López, 2023).

En total para toda la programación de las actividades que siguen los operadores en este segundo modelo de simulación, se utilizaron ciento treinta y cuatro “Servidores”, diez “Separadores” y ocho “Combinadores”, con sus respectivos tiempos y comandos para que siguieran la lógica del sistema ya implementando las mejoras.

Como se puede notar, solo se eliminaron 5 “Servidores” con respecto al primer modelo de simulación y tal como se mencionó anteriormente, donde se realizó la mayor parte de los cambios fue en los tiempos dentro de estos “Servidores” dado que en la mayoría se redujeron los tiempos de operación.

Donde se hizo un cambio importante dentro de la programación fue con el operador de pintura, ya que se le agregaron actividades de los operadores de corte de las líneas 2 y 3 para eliminar su tiempo de espera (Tabla 12). Por lo que se hizo un cambio con la conexión de los “Servidores”, añadiendo las tareas de montaje e instalación de guía para taladro y el desinstalar broquero. Estas actividades, como se explicó en apartados anteriores, les pertenecían a las líneas 2 y 3 del área de corte, pero al implementar el SMED, se decidió que

el operador del área de pintura hiciera operaciones en paralelo junto con estas líneas. En la Figura 25 se observa el área donde se desplaza la entidad que representa al operador de pintura, así como también su nueva programación, donde se le añadieron las actividades que anteriormente eran del área de corte.

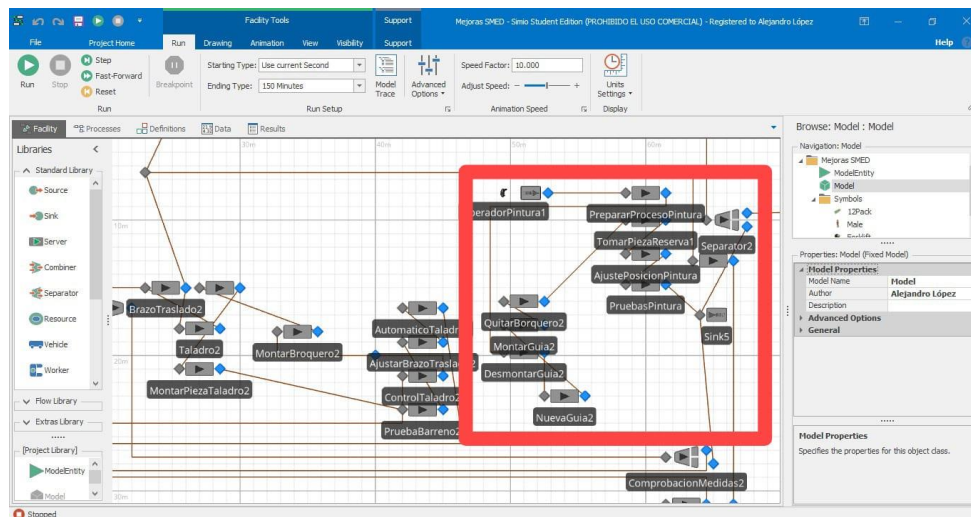


Figura 25: Nueva programación del operador del área de pintura (López, 2023).

La zona delimitada por el recuadro rojo es la programación que le corresponde al área de pintura y otro cambio que se puede notar es que se eliminó el “Servidor” donde indicaba la acción que debía de esperar una pieza cortada. En esta figura solo se muestra la programación de un operador de pintura, pero al estandarizar el proceso, los dos operadores de esta área trabajarían de la misma forma, por lo que se cuenta con la misma programación.

Para las líneas de corte 1 y 4 la programación en cuanto a “Servidores” y la lógica con respecto al primer modelo de simulación no cambió, sólo se realizaron cambios con respecto a sus tiempos en realización de las tareas (Tabla 13). Para las líneas 2 y 3 los cambios que se hicieron, fue la eliminación de las actividades que ahora realizan los operadores de pintura y también la reducción de tiempos de acuerdo con las mejoras establecidas. Ahora se procede a calcular el número óptimo de corridas para realizar un buen análisis del nuevo proceso de cambio de corrida dentro del programa SIMIO.

3.5.2. Determinación del número óptimo de corridas en el modelo de simulación.

Antes de continuar con la experimentación y analizar los resultados se debe obtener el número óptimo de corridas, esto se realiza con el objetivo de tener un resultado confiable estadísticamente.

Como primer paso se deben tener replicaciones del modelo para tomar tiempos promedio y sustituir los valores dentro de las ecuaciones, el número de replicaciones no afecta el resultado así que puede elegir cualquier número de preferencia menor a 30, en este caso se eligió usar 10 replicaciones tomando el tiempo promedio de cada corrida, tal como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultado de las 10 replicaciones del modelo de simulación.

Replicación	Tiempo promedio de cambio de corrida en minutos
1	49
2	55
3	51
4	54
5	56
6	50
7	57
8	49
9	48
10	52

Se va a calcular el número óptimo de corridas con un nivel de confianza del 95% y con un error absoluto de 2 minutos y de los tiempos promedio se calcula la media y la varianza.

$$\text{Media } (\mu) = 52.1$$

$$\text{Varianza } (S^2) = 10.32$$

$$\text{Error absoluto } (\beta) = 2$$

$$\alpha = .05$$

Ahora con estos datos se procede a calcular el número de corridas óptimas.

$$i = 10$$

$$2.2981 \geq 2$$

$$i = 11$$

$$2.158 \geq 2$$

$$i = 12$$

$$2.041 \geq 2$$

$$i = 13$$

$$1.9413 \leq 2$$

El número óptimo de corridas resultante son 13 y con esto se procede con la experimentación para estudiar y analizar el modelo.

3.6. Etapa 5: Optimización del modelo mediante Algoritmos Genéticos.

En esta última etapa se busca optimizar el segundo modelo de simulación donde se toman en cuenta las mejoras del SMED, para lograr este objetivo se decide realizar la optimización con el apoyo de un Algoritmo Genético, este Algoritmo Genético fue desarrollado por el equipo de trabajo de PALISADE, en el que integran la utilización de @Risk, permitiendo la obtención de simulaciones rápidas, optimizaciones precisas y una interfaz de usuario intuitiva, lo que le permite ser aplicado con gran facilidad. Así mismo, su aplicación es muy diversa en problemas de optimización, permitiendo al usuario declarar variables, restricciones y funciones objetivo de acuerdo con la naturaleza de cada problema. Este

Algoritmo Genético funciona como un complemento para Microsoft Excel, permitiendo la obtención de reportes numéricos y gráficos de gran ayuda para el analista.

Para esto se debe realizar un modelo matemático que represente al segundo modelo de simulación donde se incluyan los parámetros inciertos, valores deterministas y se decidan cuáles van a ser las variables de decisión que permita optimizar el modelo matemático dentro del programa. Teniendo el modelo matemático se procede a desarrollarlo dentro del programa Excel para que con ayuda del programa @Risk logre optimizar este modelo.

3.6.1. Desarrollo del modelo matemático.

Un modelo matemático, es la descripción de un hecho o fenómeno del mundo real en lenguaje numérico, donde uno de sus principales objetivos es ayudar a estudiar cómo se comportan las estructuras complejas frente a aquellas situaciones que no pueden ser vistas con facilidad por el hombre en el ámbito real.

Para optimizar el modelo matemático se decide establecer las variables de decisión con las cuales el programa va a estar cambiando los valores para llegar a un resultado óptimo. Durante la realización de la simulación del sistema en SIMIO se pudo observar que la programación que se realizaba de las rutas que debían seguir los operadores no cambian a menos que el programador cambie la ruta que quisiera probar y, si quisiera probar todas las rutas posibles para analizar el impacto que tienen al tiempo total de proceso, se tendría que realizar un modelo de simulación diferente probando cada combinación. Por esta razón se decide tomar como variables de decisión todas las rutas posibles que pueden seguir los operadores de corte y pintura, dado que estos son los que tuvieron mejoras mediante la aplicación del SMED.

Debido a que la búsqueda de una ruta considera una gran cantidad de variables las cuales realizan constantes interacciones entre sí para la búsqueda de un resultado óptimo, es necesario describirlo a través de un sistema de ecuaciones para ser resuelto con ayuda de @Risk.

Usualmente, la mayoría de los modelos matemáticos se componen por una serie de funciones objetivos sujetos a una determinada cantidad de restricciones, y el modelo a usar dentro de este proyecto no es la excepción a ello, se inicia con la definición de las funciones objetivo para reducir el tiempo total del proceso, posteriormente se da paso a la definición de las restricciones del modelo y finalmente se presenta el modelo matemático completo que es capaz de definir matemáticamente las condiciones que se desea obtener de una ruta óptima.

Como primer punto se definieron todas las rutas posibles que pueden seguir los operadores durante el proceso de cambio de corrida, como se mencionó en apartados anteriores, el orden en que los operadores realizan las actividades no está estandarizada, por lo tanto, los operadores pueden seguir cualquier ruta que ellos elijan y esto puede originar un desperdicio de tiempo considerable dado que pueden optar por seguir una ruta que consuma mucho más tiempo. En la Figura 26, Figura 27 y Figura 28, se muestran todas las rutas que pueden seguir los operadores de pintura, operadores corte de las líneas 1 y 4, y los operadores de corte de las líneas 2 y 3 respectivamente.

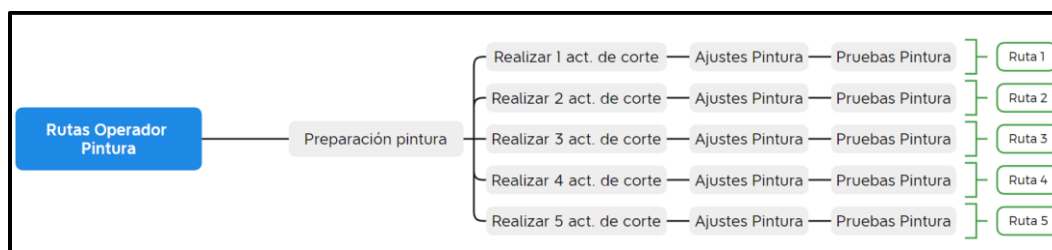


Figura 26: Rutas posibles de los operadores de pintura (López, 2023).

En la Figura 26 se pueden observar las 5 rutas posibles que pueden seguir los operadores de pintura, las variaciones son debido al número de actividades donde se involucran en el área de corte, específicamente en las líneas 2 y 3 por su cercanía, haciendo actividades en paralelo con los operadores de esta área, con esto se puede probar cuantas actividades debe de realizar el operador de pintura optimizando el proceso.

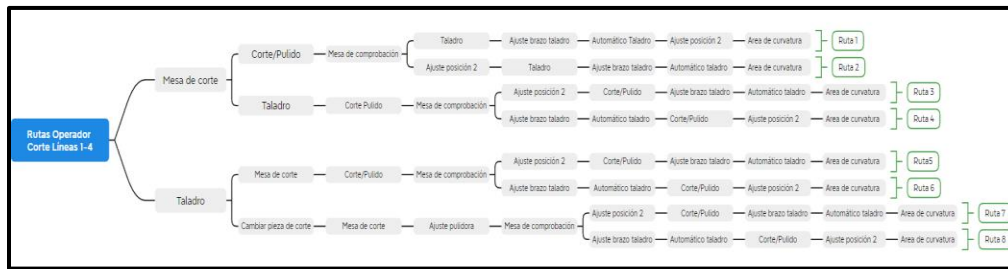


Figura 27: Rutas posibles de los operadores de corte líneas 1 y 4 (López, 2023).

Para los operadores de corte de las líneas 1 y 4 (Figura 27) solo se presentan 8 variaciones de rutas, donde las posibilidades cambian de acuerdo de la posición en la que se decida empezar a realizar el proceso y en base a esto se va a evaluar la ruta óptima.

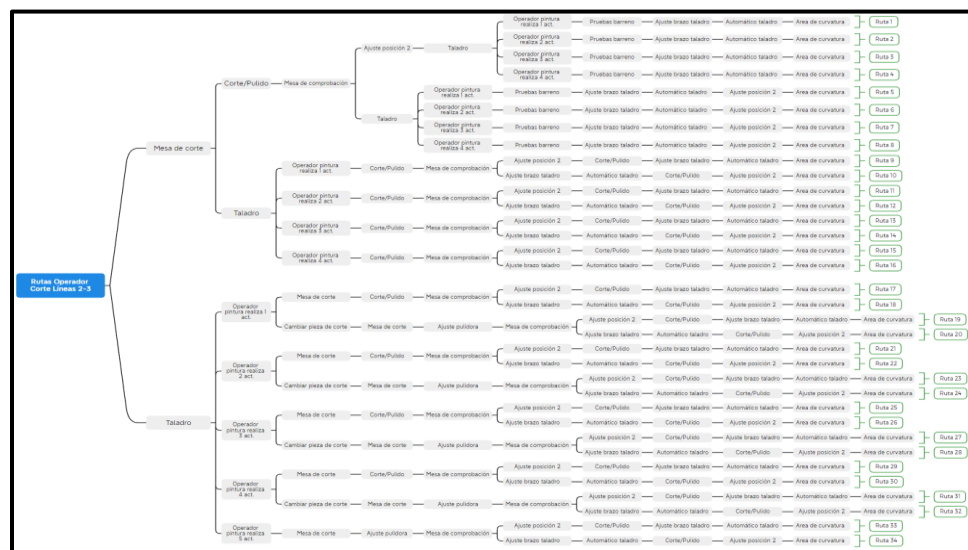


Figura 28: Rutas posibles de los operadores de corte líneas 2 y 3 (López, 2023).

Para los operadores de corte de las líneas 2 y 3 (Figura 28) aumentan considerablemente sus variaciones de rutas con respecto a las otras 2 líneas de esta área, obteniendo así 34 rutas posibles. El aumento de las variables se debe a que en estas 2 líneas se involucra al operador de pintura realizando actividades en paralelo. La razón por la cual se decide que los operadores de pintura solo se involucren en esta área y no en las líneas 1 y 4, se debe a la lejanía de estas 2 últimas líneas ya que están a los extremos del área y para llegar a ellas se requiere caminar distancias de hasta 50 metros.

Aclarando este punto también es importante destacar que tanto los operadores de pintura y los operadores de corte de las líneas 2 y 3 en la ruta que elijan deben de tener el mismo número de actividades a realizar, por ejemplo, si el operador de pintura sigue la ruta 3 donde realiza solo 3 actividades en paralelo con los operadores de estas líneas, entonces los operadores de corte de las líneas 2 y 3 solo pueden elegir rutas donde el operador realice exactamente 3 actividades. Teniendo esto en cuenta, se procede a desarrollar el modelo empezando por la función objetivo.

3.6.1.1. Función objetivo.

Lo que se busca es optimizar el tiempo total del proceso de cambio de corrida para que el proceso sea optimo se debe minimizar la duración del mismo por lo que la función objetivo fue definida como el promedio entre la sumatoria del tiempo total de los operadores de corte con el tiempo en que tarda en llegar la pieza ya terminada al área de comprobación de medidas, se toma solo el tiempo total de los operadores de corte dado que en el proceso estos son los últimos operadores en terminar sus tarea y enviar la pieza cortada a impresión y curvatura. Por lo tanto, la función objetivo fue definida en la Ecuación 3.2.

Minimizar $TP = \text{Tiempo total del proceso de cambio de corrida}$

$$= \frac{[RO_{c1x} + PH + TM_1 + TM_2] + [RO_{c2j} + PH + TM_1 + TM_2]}{2} \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

$RO_{c1x}_{x \rightarrow 8}$ = Ruta optima del operador de corte líneas 1 y 4.

$RO_{c2j}_{j \rightarrow 34}$ = Ruta optima del operador de corte líneas 2 y 3.

PH = Proceso Horno.

TM₁ = Toma de medidas para pieza terminada 1.

TM₂ = Toma de medidas para pieza terminada 2.

3.6.1.2. Variables de decisión.

Como siguiente paso se definen todos los valores que representan el sistema para una mejor comprensión del modelo matemático, empezando por las variables de decisión que como se mencionó anteriormente, para este modelo serán las rutas optimas de los operadores de corte y pintura. A continuación, se definen estas variables.

Variable de decisión ruta del operador de corte líneas 1 y 4.

$$RO_{c1x}$$

Donde:

$$X = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]$$

Variable de decisión ruta del operador de corte líneas 2 y 3.

$$RO_{c2j}$$

Donde:

$$j = [1, 2, 3, 4, 5, 6 \dots 34]$$

Variable de decisión ruta del operador de pintura.

$$RO_{pk}$$

Donde:

$$k = [1, 2, 3, 4, 5]$$

3.6.1.3. Parámetros inciertos operadores de corte líneas 1 y 4.

En esta sección se muestra la nomenclatura de las actividades que realizan los operadores de las líneas 1 y 4 del área de corte, que corresponden a los parámetros inciertos dentro del sistema, con su respectiva distribución de probabilidad de acuerdo con datos proporcionados por trabajadores de la planta.

AT_{V1} = Ajuste toma de vidrio operadores líneas 1 y 4 = DT (100,150,195).

AP_{C1} = Ajuste punto de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (135,210,290)

AP_{E1} = Ajuste de primera posición de entrada operadores líneas 1 y 4 = DT (125,210,265)

CCP₁ = Control corte/pulido operadores líneas 1 y 4 = DT (35,40,50)

CPC₁ = Cambio de pieza de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (280,420,500)

AP₁ = Ajuste pulidora operadores líneas 1 y 4 = DT (60,140,220)

MCM₁ = Mesa de comprobación medidas de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (40,65,80)

CT₁ = Control taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (28,35,42)

DG₁ = Desmontar guía operadores líneas 1 y 4 = DT (25,35,40)

MG₁ = Montar guía operadores líneas 1 y 4 = DT (70,135,200)

QB₁ = Quitar broquero operadores líneas 1 y 4 = DT (55,80,120)

MB₁ = Montar broquero operadores líneas 1 y 4 = DT (70,135,200)

MPT₁ = Montar pieza taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (80,120,180)

PB₁ = Pruebas barreno operadores líneas 1 y 4 = DT (120,215,285)

AP_{E2} = Ajuste segunda posición de entrada operadores líneas 1 y 4 = DT (80,115,180)

ACP₁ = Automático corte/pulido operadores líneas 1 y 4 = DT (15,25,35)

ABT₁ = Ajuste de brazo traslado operadores líneas 1 y 4 = DT (130,250,300)

AT₁ = Automático taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (30,45,60)

TMP_{C1} = Traslado mesa de corte a punto de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (8,10,14)

TP_{CT1} = Traslado punto de corte a taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (25,27,32)

TP_{CCP1} = Traslado punto de corte a corte/pulido operadores líneas 1 y 4 = DT (17,20,25)

TP_{CCU1} = Traslado punto de corte a curvatura operadores líneas 1 y 4 = DT (75,85,100)

TP_{PC1} = Traslado corte/pulido a pieza de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (4,4,6)

TP_PP₁ = Traslado corte/pulido a pulidora operadores líneas 1 y 4 = DT (6,9,12)

TP_PMC₁ = Traslado corte pulido a mesa comprobación de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (35,45,55)

TP_PT₁ = Traslado corte/pulido a taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (10,10,15)

TP_PCU₁ = Traslado corte/pulido a curvatura operadores líneas 1 y 4 = DT (60,70,70)

TMCM₁ = Traslado mesa de comprobación de corte a mesa de corte operadores líneas 1 y 4 = DT (20,22,26)

TMCT₁ = Traslado mesa de comprobación de corte a taladro operadores líneas 1 y 4 = DT (40,47,47)

TTCU₁ = Traslado de taladro a curvatura operadores líneas 1 y 4 = DT (55,65,65)

3.6.1.4. Parámetros inciertos operadores de corte líneas 2 y 3.

Para este apartado se observa lo mismo que el anterior pero ahora es la nomenclatura de las actividades que realizan los operadores de las líneas 2 y 3 del área de corte, que corresponden a los parámetros inciertos dentro del sistema, con su respectiva distribución de probabilidad de acuerdo con datos proporcionados por trabajadores de la planta.

AT_{V2} = Ajuste toma de vidrio operadores líneas 2 y 3 = DT (100,150,195).

AP_{C2} = Ajuste punto de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (135,210,290)

AP_{E3} = Ajuste de primera posición de entrada operadores líneas 2 y 3 = DT (125,210,265)

CCP₂ = Control corte/pulido operadores líneas 2 y 3 = DT (35,40,50)

CPC₂ = Cambio de pieza de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (280,420,500)

AP₂ = Ajuste pulidora operadores líneas 2 y 3 = DT (60,140,220)

MCM₂ = Mesa de comprobación medidas de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (40,65,80)

CT₂ = Control taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (28,35,42)

DG₂ = Desmontar guía operadores líneas 2 y 3 = DT (25,35,40)

MG₂ = Montar guía operadores líneas 2 y 3 = DT (70,135,200)

QB₂ = Quitar broquero operadores líneas 2 y 3 = DT (55,80,120)

MB₂ = Montar broquero operadores líneas 2 y 3 = DT (70,135,200)

MPT₂ = Montar pieza taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (80,120,180)

PB₂ = Pruebas barreno operadores líneas 2 y 3 = DT (120,215,285)

AP_{E4} = Ajuste segunda posición de entrada operadores líneas 2 y 3 = DT (80,115,180)

ACP₂ = Automático corte/pulido operadores líneas 2 y 3 = DT (15,25,35)

ABT₂ = Ajuste de brazo traslado operadores líneas 2 y 3 = DT (130,250,300)

AT₂ = Automático taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (30,45,60)

TMP_{C2} = Traslado mesa de corte a punto de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (8,10,14)

TP_{C2} = Traslado punto de corte a taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (25,27,32)

TP_{CCP2} = Traslado punto de corte a corte/pulido operadores líneas 2 y 3 = DT (17,20,25)

TP_{CCU2} = Traslado punto de corte a curvatura operadores líneas 2 y 3 = DT (75,85,100)

TP_{PC2} = Traslado corte/pulido a pieza de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (4,4,6)

TP_{PP2} = Traslado corte/pulido a pulidora operadores líneas 2 y 3 = DT (6,9,12)

TP_{PMC2} = Traslado corte pulido a mesa comprobación de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (35,45,55)

TP_{PT2} = Traslado corte/pulido a taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (10,10,15)

TP_{PCU2} = Traslado corte/pulido a curvatura operadores líneas 2 y 3 = DT (60,70,70)

TMCM₂ = Traslado mesa de comprobación de corte a mesa de corte operadores líneas 2 y 3 = DT (20,22,26)

TMCT₂ = Traslado mesa de comprobación de corte a taladro operadores líneas 2 y 3 = DT (40,47,47)

TTCU₂ = Traslado de taladro a curvatura operadores líneas 2 y 3 = DT (55,65,65)

3.6.1.5. Parámetros inciertos operadores de pintura.

Dando seguimiento a los apartados anteriores, ahora se muestra la nomenclatura de las actividades que realizan los operadores del área de pintura, que corresponden a los parámetros inciertos dentro del sistema, con su respectiva distribución de probabilidad de acuerdo con datos proporcionados por trabajadores de la planta.

PP = Parar proceso pintura = DT (200,250,295)

CPC_P = Cambiar pieza de corte por operador pintura = DT (280,420,500)

CT_P = Control taladro por operador pintura = DT (28,35,42)

CCP_P = Control corte/pulido por operador pintura = DT (35,40,50)

DG_P = Desmontar guía por operador pintura = DT (25,35,40)

MG_P = Montar guía por operador pintura = DT (70,135,200)

QB_P = Quitar broquero por operador pintura = DT (55,80,120)

MB_P = Montar broquero por operador pintura = DT (70,135,200)

MP_P = Montar pieza en área de pintura = DT (10,15,20)

API = Ajuste posición de impresión = DT (110,115,250)

PI = Pruebas de impresión = DT (275,370,450)

TPT = Traslado pintura a taladro = DT (10,15,20)

TPP_C = Traslado de pintura pieza de corte = DT (9,10,12)

TPG = Traslado de pintura a guía = DT (15,20,20)

3.6.1.6. Parámetros inciertos operadores de curvatura.

Como últimos parámetros inciertos dentro del sistema, se declara la nomenclatura de las actividades que siguen los operadores del área de curvatura, que corresponden a los parámetros inciertos dentro del sistema, con su respectiva distribución de probabilidad de acuerdo con datos proporcionados por trabajadores de la planta.

PE = Parar elevador = DT (25,32,38)

SH = Parar horno = DT (25,35,40)

DR2 = Desmontar R2 = DT (75,90,105)

TR2 = Traslado R2 = DT (130,150,180)

CNR2 = Cargar nuevo R2 = DT (165,180,210)

MR2 = Montar nuevo R2 = DT (45,60,85)

CR2 = Conectar R2 = DT (100,120,150)

AH = Activar horno = DT (27,37,47)

AE = Ajustar elevador = DT (190,215,240)

APH = Ajuste posición de entrada de pieza a horno = DT (175,190,210)

TCE = Traslado de comprobación a elevador = DT (35,40,50)

TEH = Traslado elevador a horno = DT (35,35,40)

TEP_H = Traslado de elevador a entrada de posición a horno = DT (16,18,20)

TP_HC = Traslado de posición de entrada a horno a comprobación = DT (35,40,45)

TRE = Traslado de R2 a elevador = DT (30,35,40)

TRH = Traslado de R2 a horno = DT (8,10,10)

M = Tiempo de llegada del montacargas = DT (200,240,285)

3.6.1.7. Valores deterministas de operadores de corte líneas 1 y 4.

Los valores deterministas son aquellos que no cambian o no tienen variación en el sistema, en este apartado se declara la nomenclatura de los valores deterministas dentro del proceso que siguen los operadores del área de corte de las líneas 1 y 4.

PC_{T1} = Tiempo de acceso de la puerta del área de corte/pulido = 7 seg.

PP_{T1} = Tiempo de acceso de la puerta del área de pulido = 7 seg.

PT_{T1} = Tiempo de acceso de la puerta del área de taladro = 7 seg.

TP_{C1} = Tiempo de proceso corte perimetral = 60 seg.

TP_{P1} = Tiempo de proceso de pulido de pieza = 25 seg.

TPB_{T1} = Tiempo de proceso de brazo traslado = 4 seg.

TPTal₁ = Tiempo de proceso taladro = 12 seg.

3.6.1.8. Valores deterministas de operadores de corte líneas 2 y 3.

En este apartado de igual forma se declaran los valores deterministas de los operadores del área de corte, pero ahora de las líneas 2 y 3. Como se puede notar, son los mismos valores y procesos que siguen los operadores de corte en las líneas 1 y 4, pero es importante separar la nomenclatura para evitar confusión, dado que, exceptuando estos valores deterministas, siguen diferente configuración de actividades entre sí.

PC_{T2} = Tiempo de acceso de la puerta del área de corte/pulido = 7 seg.

PP_{T2} = Tiempo de acceso de la puerta del área de pulido = 7 seg.

PT_{T2} = Tiempo de acceso de la puerta del área de taladro = 7 seg.

TP_{C2} = Tiempo de proceso corte perimetral = 60 seg.

TP_{P2} = Tiempo de proceso de pulido de pieza = 25 seg.

TPB_{T2} = Tiempo de proceso de brazo traslado = 4 seg.

TP_{Tal2} = Tiempo de proceso taladro = 12 seg.

3.6.1.9. Valores deterministas de operadores de pintura.

Se presentan los valores deterministas de los operadores de pintura, los cuales solo son 3 debido a que solo siguen un proceso automático que es la impresión de los datos del cliente, las demás actividades en el cambio del proceso presentan diferentes valores al ser realizadas por el personal de esta área. Dicho en otras palabras, solo cuentan con un proceso automatizado que tiene un tiempo establecido en su proceso que es la impresión y también se toman en cuenta los tiempos que tardan las puertas en dar acceso a las áreas en las que tienen actividades durante el proceso.

PC_{TP} = Tiempo de acceso de la puerta del área de corte = 7 seg.

PT_{TP} = Tiempo de acceso de la puerta del área de taladro = 7 seg.

$PImp$ = Proceso de impresión = 5 seg.

3.6.1.10. Valores deterministas de operadores de curvatura.

De igual forma que los operadores de pintura, se presenta a continuación la nomenclatura de los valores deterministas de los operadores del área de curvatura, los cuales solo cuentan con

3 máquinas automatizadas con un tiempo de proceso fijo, las demás actividades son realizadas por el personal con una variación de tiempos.

PH = Proceso Horno = 300 seg.

TM₁ = Toma de medidas de primera y segunda pieza terminadas = 70 seg.

TM₂ = Toma de medidas de tercera y cuarta pieza terminadas = 70 seg.

Con todos los valores del sistema ya definidos se procede a realizar los cálculos para poder calcular la ruta óptima del proceso, para esto se definen las ecuaciones de todas las rutas posibles de los operadores de corte líneas 1 y 4 (8 rutas), operadores de corte líneas 2 y 3 (34 rutas) y operadores del área de pintura (5 rutas).

3.6.1.11. Rutas operadores del área de corte líneas 1 y 4.

$$\begin{aligned}
 RO_{C1,1} = & TMP_{C1} + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + CCP_1 + CPC_1 + AP_1 + TC_P P_{C1} + TC_P P_1 + \\
 & PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + TP_{C1} + TP_{P1} + TC_P MC_1 + TMCT_1 + MCM_1 + CT_1 + DG_1 + MG_1 + \\
 & QB_1 + MB_1 + MPT_1 + PB_1 + ABT_1 + AT_1 + TP_C T_1 + AP_{E2} + TP_C CP_1 + ACP_1 + TC_P CU_1 + \\
 & TC_P P_{C1} + CCO_1 + TPB_{T1} + TPTal_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RO_{C1,2} = & TMP_{C1} + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + CCP_1 + CPC_1 + TC_P P_{C1} + TC_P P_1 + \\
 & CCP_1 + TC_P P_1 + AP_1 + TC_P MC_1 + MCM_1 + TMCM_1 + AP_{E2} + TP_C T_1 + CT_1 + DG_1 + MG_1 + \\
 & QB_1 + MB_1 + MPT_1 + PB_1 + ABT_1 + AT_1 + TC_P T_1 + ACP_1 + TC_P CU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + \\
 & TP_{C1} + TP_{P1} + TPB_{T1} + TPTal_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,3} = & TMP_{C1} + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C T_1 + CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + CPC_1 \\
& + TC_P T_1 + CCP_1 + TC_P P_{C1} + CPC_1 + TC_P P_{C1} + TC_P P_1 + AP_1 + TC_P MC_1 \\
& + TMCM_1 + MCM_1 + AP_{E2} + TP_C CP_1 + ACP_1 + TC_P T_1 + MPT_1 + PB_1 + ABT_1 \\
& + AT_1 + TTCU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + TP_{C1} + TP_{P1} + TP_{B_{T1}} + TPTal_1 \\
& + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,4} = & TMP_{C1} + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C T_1 + CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + TC_P T_1 + \\
& CCP_Z + TC_P P_{C1} + TC_P P_{C1} + CPC_1 + AP_1 + TC_P P_1 + TC_P MC_1 + TMCT_1 + MCM_1 + MPT_1 + \\
& PB_1 + ABT_1 + AT_1 + ACP_1 + TC_P T_1 + TP_C CP_1 + AP_{E2} + TP_C CU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + \\
& TP_{C1} + TP_{P1} + TP_{B_{T1}} + TPTal_1 + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,5} = & CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + TP_C T_1 + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + CCP_1 + \\
& TC_P P_{C1} + TC_P P_{C1} + CPC_1 + AP_1 + TC_P P_1 + TC_P MC_1 + MCM_1 + TMCM_1 + AP_{E2} + TP_C CP_1 + \\
& TC_P T_1 + MPT_1 + PB_1 + APC_1 + ABT_1 + AT_1 + TTCU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + TP_{C1} + TP_{P1} + \\
& TP_{B_{T1}} + TPTal_1 + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,6} = & CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + TP_C T_1 + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + CCP_1 + \\
& TC_P P_{C1} + TC_P P_{C1} + CPC_1 + AP_1 + TC_P P_1 + TC_P MC_1 + MCM_1 + TMCT_1 + MPT_1 + PB_1 + \\
& ABT_1 + AT_1 + TC_P T_1 + ACP_1 + TP_C CP_1 + AP_{E2} + TP_C CU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + TP_{C1} + \\
& TP_{P1} + TP_{B_{T1}} + TPTal_1 + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,7} = & CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + TC_P T_1 + CCP_1 + CPC_1 + TC_P P_{C1} + TC_P P_{C1} + \\
& TP_C CP_1 + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + AP_1 + TC_P P_1 + TC_P MC_1 + MCM_1 + TMCT_1 + \\
& AP_{E2} + TP_C CP_1 + ACP_1 + TC_P T_1 + MPT_1 + PB_1 + ABT_1 + AT_1 + TTCU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + \\
& PT_{T1} + TP_{C1} + TP_{P1} + TP_{B_{T1}} + TPTal_1 + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.9}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C1,8} = & CT_1 + DG_1 + MG_1 + QB_1 + MB_1 + TC_P T_1 + CCP_1 + CPC_1 + TC_P P_{C1} + TC_P P_{C1} + \\
& TP_C CP_1 + AT_{V1} + AP_{C1} + AP_{E1} + TP_C CP_1 + AP_1 + TC_P P_1 + TC_P MC_1 + MCM_1 + TMCT_1 +
\end{aligned}$$

$$MPT_1 + PB_1 + ABT_1 + AT_1 + TC_P T_1 + ACP_1 + TP_C CP_1 + AP_{E2} + TP_C CU_1 + PC_{T1} + PP_{T1} + PT_{T1} + TP_{C1} + TP_{P1} + TPB_{T1} + TPTal_1 + CCP_1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.10}$$

3.6.1.12. Rutas operadores del área de corte líneas 2 y 3.

$$RO_{C2,1} = TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + CCP_2 + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C T_2 + CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$RO_{C2,2} = TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + CCP_2 + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C T_2 + CT_2 + QB_2 + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$RO_{C2,3} = TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + CCP_2 + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C T_2 + CT_2 + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$RO_{C2,4} = TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + CCP_2 + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C T_2 + CT_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$RO_{C2,5} = TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TP_C T_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 + TC_P P_{C2} + CCP_2 + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,6} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + CT_2 \\
& + QB_2 + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TP_C T_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 \\
& + TC_P CU_2 + TC_P P_{C2} + CCP_2 + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.16}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,7} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + CT_2 \\
& + MB_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TP_C T_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 \\
& + TC_P CU_2 + TC_P P_{C2} + CCP_2 + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.17}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,8} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + CT_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TP_C T_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P CU_2 \\
& + TC_P P_{C2} + CCP_2 + TPB_{T2} + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.18}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,9} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + CPC_2 + TC_P T_2 \\
& + CCP_2 + TC_P P_{C2} + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + TMCM_2 \\
& + MCM_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 \\
& + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.19}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,10} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 \\
& + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.20}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,11} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + QB_2 + MB_2 + CPC_2 + TC_P T_2 \\
& + CCP_2 + TC_P P_{C2} + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + TMCM_2 \\
& + MCM_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 \\
& + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.21}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,12} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 \\
& + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.22}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,13} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + MB_2 + CPC_2 + TC_P T_2 + CCP_2 \\
& + TC_P P_{C2} + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + TMCM_2 + MCM_2 \\
& + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.23}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,14} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + CT_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} \\
& + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + MPT_2 + PB_2 \\
& + ABT_2 + AT_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.24}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,15} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CPC_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + CPC_2 \\
& + TC_P P_{C2} + TC_P P_2 + AP_2 + TC_P MC_2 + TMCM_2 + MCM_2 \\
& + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + CT_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 \\
& + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.25}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,16} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C T_2 + TC_P CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} \\
& + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + TMCT_2 + MCM_2 + MPT_2 + CT_2 + PB_2 \\
& + ABT_2 + AT_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TP_{B_{T2}} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.26}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,17} = & CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 \\
& + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 \\
& + AP_{E4} + TP_C CP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + APC_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TP_{B_{T2}} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.27}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,18} = & CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 \\
& + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TP_{B_{T2}} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.28}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,19} = & CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 \\
& + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 \\
& + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TP_{B_{T2}} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.29}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,20} = & CT_2 + MG_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 \\
& + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TP_{B_{T2}} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,21} = & CT_2 + QB_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} \\
& + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} \\
& + TP_C CP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + APC_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} \\
& + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.31}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,22} = & CT_2 + QB_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} \\
& + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + MPT_2 + PB_2 \\
& + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.32}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,23} = & CT_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} \\
& + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + AP_{E4} \\
& + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} \\
& + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.33}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,24} = & CT_2 + QB_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} \\
& + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 \\
& + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 \\
& + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 \\
& + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.34}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,25} = & CT_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} \\
& + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 \\
& + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + APC_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} \\
& + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,26} = & CT_2 + MB_2 + TP_C T_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} \\
& + CPC_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 \\
& + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} \\
& + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.36}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,27} = & CT_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} + AP_{C2} \\
& + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + AP_{E4} \\
& + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} \\
& + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \dots \text{Ecuación 3.37}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,28} = & CT_2 + MB_2 + TC_P T_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} + AP_{C2} \\
& + AP_{E3} + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + MPT_2 + PB_2 \\
& + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.38}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,29} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 \\
& + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 \\
& + CT_2 + PB_2 + APC_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} \\
& + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.39}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,30} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + CPC_2 + AP_2 \\
& + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + MPT_2 + CT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 \\
& + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + PT_{T2} + TP_{C2} \\
& + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.40}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,31} = & TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} \\
& + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 \\
& + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + CT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.41}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,32} = & TP_C CP_2 + CCP_2 + CPC_2 + TC_P P_{C2} + TC_P P_{C2} + TP_C CP_2 + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} \\
& + TP_C CP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 + TMCT_2 + MPT_2 + CT_2 + PB_2 \\
& + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} \\
& + PT_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} + TPTal_2 + CCP_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.42}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,33} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 \\
& + TMCM_2 + AP_{E4} + TP_C CP_2 + ACP_2 + TC_P T_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 \\
& + TTCU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} \\
& + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.43}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{C2,34} = & TMP_{C2} + AT_{V2} + AP_{C2} + AP_{E3} + TP_C CP_2 + CCP_2 + AP_2 + TC_P P_2 + TC_P MC_2 + MCM_2 \\
& + TMCT_2 + MPT_2 + PB_2 + ABT_2 + AT_2 + TC_P T_2 + ACP_2 + TP_C CP_2 + AP_{E4} \\
& + TP_C CU_2 + PC_{T2} + PP_{T2} + TP_{C2} + TP_{P2} + TPB_{T2} \\
& + TPTal_2 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.44}
\end{aligned}$$

3.6.1.13. Rutas operadores del área pintura.

$$RO_{P1} = PP + TPG + CT_P + DG_P + TPT + MP_P + API + PI + PImp \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$\begin{aligned}
RO_{P2} = & PP + TPG + CT_P + DG_P + MG_P + TPT + MP_P + API + PI \\
& + PImp \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.46}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{P3} = & PP + TPG + CT_P + DG_P + MG_P + QB_P + TPT + MP_P + API + PI + \\
& PImp \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.47}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RO_{P4} = & PP + TPG + CT_P + DG_P + MG_P + QB_P + MB_P + TPT + MP_P + API + PI + \\
& PImp \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.48}
\end{aligned}$$

$$RO_{P5} = PP + TPP_C + CPC_P + TPP_C + CCP_P + CT_P + DG_P + MG_P + TPT + MP_P + API + PI \\ + Plmp + TPP_C + TPG + PC_{TP} + PT_{TP} \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.49}$$

3.6.1.14. Tiempos de espera del área de curvatura.

Ahora solo se toman los tiempos de espera del área de curvatura para posteriormente sacar el tiempo total de esta área, después de la implementación del SMED, esta es la única área con tiempos de espera, dado que el área de pintura y corte ya no tienen que esperar ninguna pieza, por lo que se muestran las ecuaciones para calcular el tiempo de espera de llegada del montacargas y el tiempo de espera que tarda pintura en enviar la pieza ya impresa.

Tiempo de espera montacargas:

$$TEM = M - (PE + SH + DR2) \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.50}$$

Tiempo de espera pieza pintura:

$$TEP = RO_{PK} - (TCE + PE + TEH + SH + TRH + DR2 + TR2 + CNR2 + MR2 + CR2 \\ + AH + TRH) \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.51}$$

3.6.1.15. Tiempo total del área de curvatura.

Por último se calculó el tiempo total del área de curvatura para observar cuánto dura su proceso tomando en consideración los tiempos de espera, este tiempo también sirve como guía dado que debe ser menor al tiempo total de los operadores de corte, dado que el operador de curvatura debe terminar antes sus actividades para activar el horno, que es donde deben de pasar las piezas ya cortadas para darle su curvatura y es el proceso que toma más tiempo en realizar; si los operadores de curvatura terminaran después que los del área de corte, aumentaría el tiempo total del proceso considerablemente. Esto se define en las restricciones del modelo.

$$\begin{aligned}
TTAC = & TEM + TEP + PE + SH + DR2 + TR2 + CNR2 + MR2 + CR2 + AH + AE \\
& + APH + TCE + TEH + TEP_H + TP_H C + TRE + TRH \\
& + TRH \qquad \qquad \qquad \dots \qquad \qquad \qquad Ecuación 3.52
\end{aligned}$$

3.6.1.16. Restricciones del modelo.

Dentro de este apartado se muestran las restricciones del modelo matemático, estas restricciones nos ayudan a darle lógica al modelo y un buen funcionamiento durante la simulación.

3.6.1.16.1. Restricción tiempo del proceso del área de curvatura.

Como se mencionó en el apartado anterior, una de las restricciones que se definen fue para que el operador de curvatura no termine antes sus actividades que los operadores de corte, esto debido a que, si el operador de curvatura no ha activado el horno, las piezas cortadas no pueden pasar y esto conlleva a que los operadores de corte tengan tiempo de espera por parte de curvatura lo cual aumentaría el tiempo total del proceso y no sería una optimización a este mismo.

$$TTAC < RO_{C1X} \qquad \dots \qquad Ecuación 3.53$$

$$TTAC < RO_{C2j} \qquad \dots \qquad Ecuación 3.54$$

3.6.1.16.2. Restricción tiempo de espera de pieza de pintura a curvatura.

Siguiendo la lógica del apartado anterior, también aplica para para el tiempo que espera el operador del área de curvatura a que termine sus actividades y ajustes el área de pintura, este tiempo no puede ser negativo porque esto sería un indicativo de que los operadores del área de pintura están terminando antes sus procesos lo cual es un indicativo de que el operador de

esta área está teniendo tiempo muerto que bien podría aprovechar para realizar alguna actividad en paralelo con el área de corte.

$$TEP > 1 \quad \dots \quad \text{Ecuación 3.55}$$

3.6.1.16.3. Restricción de rutas de operadores de pintura y corte líneas 2 y 3.

Para que el modelo matemático siga una lógica de acuerdo al proceso que realizan los operadores, se definen unas restricciones para que las actividades de los operadores de pintura y los operadores de corte líneas 2 y 3 tengan coherencia entre sí, dado que estos mismos realizan actividades en paralelo y por lo tanto dentro del modelo se deben definir correctamente las actividades cuando se hacen en conjunto; por ejemplo, si el operador de pintura realiza 2 actividades dentro del área de corte, entonces el operador de corte debe de tomar en cuenta que estas actividades ya se realizaron y por lo tanto, debe omitirlas y seguir otra ruta para continuar con su proceso.

Si:

$$RO_{PK}$$

$$\text{Cuando } k = 1$$

Entonces:

$$RO_{C2j}$$

$$j = (1, 5, 9, 10, 17, 18, 19, 20)$$

Si:

$$RO_{PK}$$

$$\text{Cuando } k = 2$$

Entonces:

$$RO_{C2j}$$

$$j = (2, 6, 11, 12, 21, 22, 23, 24)$$

Si:

$$RO_{PK}$$

$$\text{Cuando } k = 3$$

Entonces:

$$RO_{C2j}$$

$$j = (3, 7, 13, 14, 25, 26, 27, 28)$$

Si:

$$RO_{PK}$$

$$\text{Cuando } k = 4$$

Entonces:

$$RO_{C2j}$$

$$j = (4, 8, 15, 16, 29, 30, 31, 32)$$

Si:

$$RO_{PK}$$

$$\text{Cuando } k = 5$$

Entonces:

$$RO_{C2j}$$

$$j = (33, 34)$$

3.6.2. Optimización del modelo matemático.

Para la optimización del modelo se utiliza una interfaz dentro del programa Excel creado por la empresa Palisade llamado @Risk, el cual por medio de Algoritmos Genéticos y por la facilidad del ingreso de datos y operaciones dentro de la hoja de cálculo de Excel, optimiza el modelo matemático definiendo su función objetivo, también las variables y valores que conforman el sistema y de igual manera se pueden definir las restricciones del modelo, en la Figura 29 se muestra parte el modelo matemático que fue modelado en Excel.

The screenshot displays the @Risk Optimizer interface within an Excel environment. The top ribbon includes tabs for 'Archivo', 'Inicio', 'Insertar', 'Disposición de página', 'Fórmulas', 'Datos', 'Revisar', 'Vista', 'Ayuda', and '@RISK'. The '@RISK' tab is active, showing options for 'Iteraciones' (1000), 'Simulaciones' (1), and 'Simular'. Below the ribbon, the spreadsheet is organized into several columns, each representing a different operator or activity. The columns are labeled 'Operadores Corte Líneas 1 y 4', 'Operadores Corte Líneas 2 y 3', 'Operadores Pintura', and 'Operadores Curvatura'. Each column contains a list of activities with associated times and parameters. The bottom of the screen shows a status bar with 'Listo' and 'Accesibilidad: es necesario investigar'.

Figura 29: Modelo matemático en Excel, AG @RiskOptimizer (López, 2023).

Antes de iniciar con la optimización del modelo el programa te pide definir sus restricciones y el valor que se desea optimizar, ya sea maximizando o minimizando este mismo, para este modelo se desea minimizar la media del tiempo total del proceso, en la Figura 30 se observa cómo se definieron los valores dentro del programa.

Dentro del programa también se pide definir sus variables de decisión, para estas últimas el programa te pide ingresar con que valores se desea empezar la optimización para que en base a este valor inicial empiece a optimizar, para este caso se decide que los operadores de corte y de pintura sigan la ruta número 1 dado que es la ruta que se definió en el modelo SIMIO con las mejoras implementadas por medio del SMED.

RISKOptimizer- Modelo

Meta de optimización: **Minimo**

Celda: **L51**

Optimizar: **Media**

Tipo de análisis: ☒ Estandar ☐ Frontera eficiente

Rangos de celdas ajustables

	Mínimo	Rango	Máximo	Valores
☒ 1		<= B3	<= 8	Entero
☒ 1		<= B4	<= 5	Entero
☒ 1		<= B6	<= 34	Entero

Restricciones

	Descripción	Fórmula	Tipo
☒		=L34 < F87	Dura
☒		=L33 > 1	Dura

Aceptar Cancelar

Figura 30: Definición del modelo, @RiskOptimizer (López, 2023).

Para la validación de este modelo se comprobó la coherencia y por medio de diferentes corridas se dio soporte al funcionamiento correcto del modelo. Por último, se compararon los tiempos del modelo en SIMIO para analizar si los resultados coinciden. En la Figura 31 y la Figura 32 se muestran los resultados de las simulaciones en el programa SIMIO y el programa @RiskOptimizer respectivamente.

TiempoLlegadaPieza	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	52.8998
			Maximum (Min...	56.1560
			Minimum (Min...	49.8268
			Observations	4.0000

Figura 31: Resultado de la simulación, SIMIO (López, 2023).

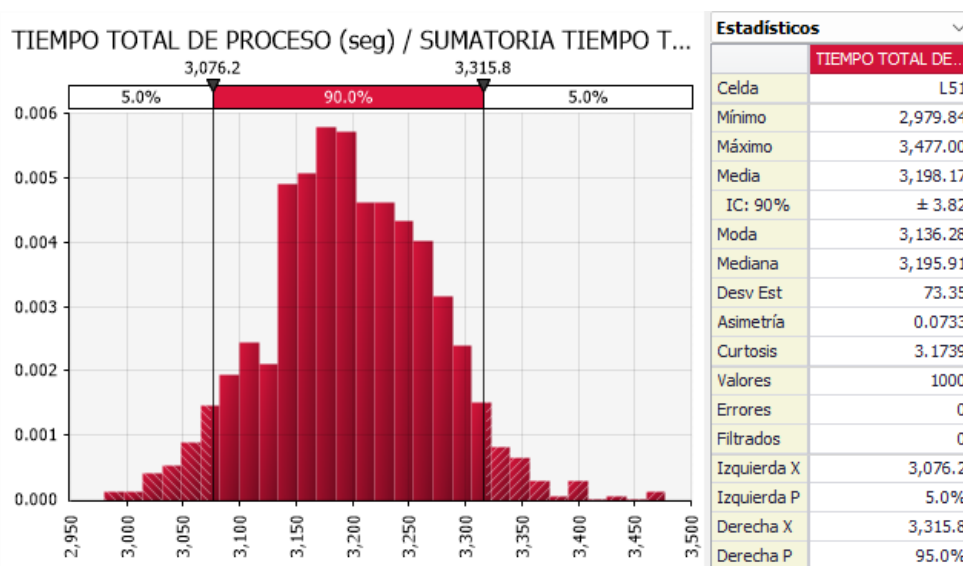


Figura 30: Resultado de la simulación del modelo en Excel, @RiskOptimizer (López, 2023).

Al comparar los resultados de las dos simulaciones se puede observar que el tiempo promedio del proceso en la simulación en SIMIO es de 52.89 minutos, mientras que en la simulación en @RiskOptimizer es de 53.3 minutos, de igual manera si analizamos los tiempos máximos y mínimos de la simulación solo varía por un minuto, por lo que se comprueba que el modelo matemático fue bien definido y funciona de forma lógica al simular el proceso.

3.7. Conclusiones.

A lo largo del desarrollo de este proyecto como se pudo notar que la meta establecida era optimizar el proceso minimizando el tiempo en que se hacía el cambio de corrida por lo que se realizó primeramente fue el modelo de simulación en SIMIO para comprender de mejor

forma el proceso real, dado que al elaborar un modelo de simulación, lo primero que se debe de hacer es la toma de datos de todo el proceso lo que ayudó de forma importante a la comprensión del mismo, dado que se adentra más a las opiniones de los ingenieros y operadores que dentro del intercambio de ideas también surgían propuestas de mejora que ayudan a alcanzar las metas establecidas.

La aplicación de la técnica SMED fue de gran ayuda y aporte al proyecto, dado que es una metodología muy bien establecida que permite la implementación por etapas de mejoras al proceso, dando también oportunidad que exista un intercambio de ideas con los expertos del área para crear alternativas de solución que den otra perspectiva a cómo abordar la problemática existente.

La Simulación de Eventos Discretos es una técnica que dentro del programa SIMIO por su manejo accesible al usuario, permite una representación fiel al sistema real si se conoce y se estudió a fondo el mismo, dado que así al programador puede notar irregularidades al estar configurando y programando el modelo. De igual manera como se observó a lo largo del desarrollo de la metodología de este proyecto, se pueden hacer estudios de cada cambio o mejora del proceso sin necesidad de para el mismo, lo que conllevaría a tener retrasos en la planeación de la producción.

Realizar un modelo matemático que represente al sistema es una tarea demasiado compleja que necesita un conocimiento completo del mismo proceso para tomar en cuenta cada valor y variable que afecte directamente al resultado, por lo que la recolección de datos y las visitas a la planta indirectamente aparte de ser importantes para desarrollar un modelo de simulación representativo del sistema real, también ayudó a la modelación matemática y al planteamiento de las variables de decisión que en este caso se conocía la necesidad de estandarizar el proceso, ya que no había como tal un orden establecido al realizar las actividades.

Los Algoritmos Genéticos del programa @RiskOptimizer es una herramienta muy completa al querer evaluar modelos monocriterio, esto quiere decir que la optimización solo tenga un objetivo, para casos multicriterio se deben consultar diferentes opciones. La interfaz del programa es muy intuitiva para el usuario y con las funciones y fórmulas de Excel ayuda al programador pasar el modelo matemático de forma precisa.

Capítulo IV

Resultados

4.1. Introducción.

El análisis de resultados es una etapa en la que podemos observar si las propuestas de mejora tienen un impacto positivo al proceso original. Los resultados más importantes para este estudio son los datos obtenidos de las simulaciones en SIMIO, donde se presentan las mejoras al proceso real por medio de la aplicación del SMED, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en la simulación del proceso real y los resultados del segundo modelo de simulación con las mejoras del SMED. Por último, se analizan los datos obtenidos al optimizar el modelo matemático que representa al proceso mejorado por medio de Algoritmos genéticos en el programa @RiskOptimizer.

4.2. Análisis de resultados del primer modelo de simulación.

De acuerdo con el número óptimo de corridas que se calculó anteriormente se lanzaron 10 simulaciones del primer modelo de simulación en SIMIO que representa al sistema real del proceso de cambio de corrida, en la Tabla 16 se muestran los datos obtenidos de estas simulaciones.

Tabla 16: Resultado de las 10 corridas del modelo de simulación.

Replicación	Tiempo promedio de cambio de corrida en minutos
1	61
2	59
3	64
4	63
5	61
6	65
7	63
8	63
9	66
10	65
Promedio	63

De acuerdo con los resultados de las 10 replicaciones del modelo de simulación, el tiempo promedio del proceso de cambio de corrida es de 63 minutos.

Para un mayor análisis del proceso se tomaron los tiempos de espera de los operadores de pintura y el tiempo de espera del operador de curvatura, en los cuales hay un paro en las actividades de estas dos áreas porque necesitan tener una pieza ya cortada para continuar sus actividades por parte de pintura y esta área le debe de enviar una pieza ya con la impresión correspondiente al área de curvatura, por lo que se programaron estadísticos dentro del programa que midieran estos tiempos muertos que presentan estas 2 áreas. En la Figura 31 se muestran los datos obtenidos de una simulación donde se pueden observar estos estadísticos.

Object Type ▾	Object Name ▲	Data Source ▲ ▾	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▾	Average Total
Model	Model	TiempoEsperaOPCurvatura	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	33.7998
					Maximum (Min...	33.7998
					Minimum (Min...	33.7998
					Observations	1.0000
		TiempoEsperaOPPintura	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	25.0612
					Maximum (Min...	26.0751
					Minimum (Min...	24.0474
					Observations	2.0000
		TiempoStopOPCurvatura	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	14.3311
					Maximum (Min...	14.3311
					Minimum (Min...	14.3311
					Observations	1.0000
		TiempoStopOPPintura	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	4.1585
					Maximum (Min...	4.5386
					Minimum (Min...	3.7783
					Observations	2.0000

Figura 31: Resultado de estadísticos de tiempos de espera en una simulación del modelo, SIMIO (López, 2023).

Con estos estadísticos se calcula el tiempo total de tiempo muerto de estas dos áreas; para el área de pintura se resta $TiempoEsperaOPPintura - TiempoStopOPPintura$ y para el área de curvatura se resta $TiempoEsperaOPCurvatura - TiempoStopOPCurvatura$. Teniendo esto en cuenta se realizan 10 replicaciones para obtener los promedios de los tiempos de espera de cada área.

Tabla 17: Resultado de los tiempos muertos del área de pintura y curvatura.

Replicación	Promedios de tiempos muertos del operador de pintura (min)	Promedios de tiempos muertos del operador de curvatura (min)
1	21	20
2	23	19
3	22	20
4	24	23
5	22	20
6	24	22
7	22	21
8	22	20
9	23	21
10	24	23
Promedio	22.7	20.9

Por último, se toman los tiempos promedio de los operadores de corte, esto debido a que estos son los últimos operadores en terminar sus actividades y después de finalizar solo se espera a que la pieza pase por los procesos de las maquinas faltantes que son tiempos ya fijos, para terminar con el proceso, por lo que es importante tomar estos tiempos para saber en qué tiempo finalizan por completo todos los operadores sus actividades.

En la Figura 32 se observa el estadístico que toma el tiempo en que llegan los operadores de corte al área de comprobación de medidas, que es donde terminan sus actividades todos los operadores y también se muestra el estadístico del tiempo en que llega la pieza al área de comprobación de medidas que es donde termina todo el proceso.

Data Source ▼	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲ ▼	Average Total
TiempoLlegadaPieza	UserSpecified	TallyValue	Average (Minutes)	61.1071
			Maximum (Minutes)	63.6534
			Minimum (Minutes)	58.2558
			Observations	4.0000
TiempoLlegadaOperadorCorte	UserSpecified	TallyValue	Average (Minutes)	54.9207
			Maximum (Minutes)	56.9674
			Minimum (Minutes)	52.3751
			Observations	8.0000

Figura 32: Resultado de estadísticos de llegada de operadores de corte y de pieza terminada en una simulación del modelo, SIMIO (López, 2023).

En la Tabla 18 se observan los resultados de las 10 corridas del tiempo promedio en que terminan sus operaciones los operadores de curvatura.

Tabla 18: Resultado de los tiempos promedio de finalización de operaciones operadores de corte.

Replicación	Tiempo promedio de finalización de actividades operadores corte (min)
1	55
2	52
3	52
4	54
5	54
6	53
7	53
8	51
9	52
10	54
Promedio	53

4.3. Análisis de resultados del segundo modelo de simulación.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos del segundo modelo de simulación en donde se implementan las mejoras del SMED. Como se calculó anteriormente el número óptimo de corridas para realizar la experimentación son 13 por lo que en la Tabla 19 se muestra el resultado de estas mismas con su promedio.

Tabla 19: Resultado de los tiempos promedio del segundo modelo de simulación.

Replicación	Tiempo promedio de finalización de actividades operadores corte (min)
1	53
2	52
3	53
4	52
5	51
6	51
7	53
8	53
9	52
10	52
11	53
12	50
13	52
Promedio	52.07

En la Figura 33 se pueden observar la comparación de los resultados de las 10 simulaciones del primer y segundo modelo de simulación, donde se puede analizar de forma visual la disminución del tiempo total del proceso.

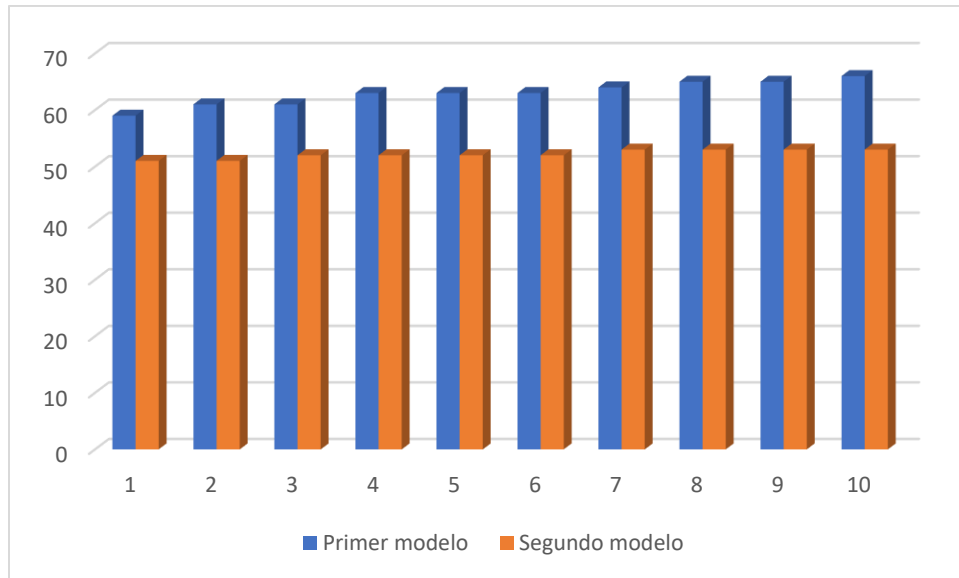


Figura 33: Comparación de resultados del primer y segundo modelo de simulación (López, 2023).

Comparando los resultados del primer modelo de la Tabla 16 y del segundo modelo de la Tabla 19 se puede ver una disminución de 10.93 minutos que equivale al 17.34% del tiempo total del proceso de cambio de corrida al implementar las mejoras de SMED.

De igual manera se comparan los datos de los tiempos muertos de cada simulación, al implementar las mejoras de SMED el tiempo muerto del operador de pintura se elimina completamente del proceso, debido a que ahora se aprovecha este tiempo al ya tener una pieza lista para realizar sus ajustes y también al hacer actividades en paralelo con los operadores de corte líneas 2 y 3 (ver figura 34 y tabla 20).

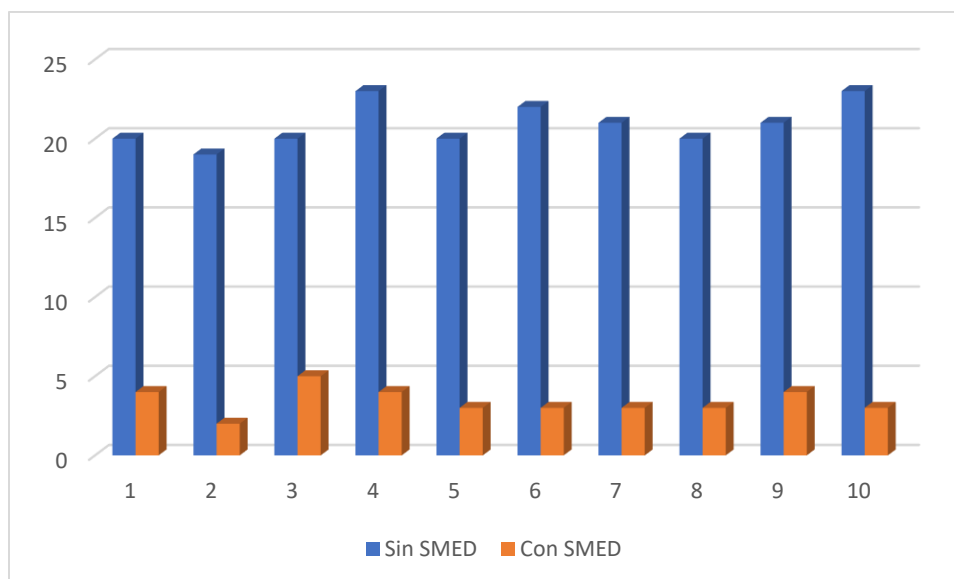


Figura 34: Comparación de resultados de tiempos de espera del operador de curvatura (López, 2023).

Tabla 20: Resultado de los tiempos muertos del área de pintura y curvatura.

Replicación	Promedios de tiempos muertos del operador de curvatura (min)
1	4
2	2
3	5
4	4
5	3
6	3
7	3
8	3
9	4
10	3
11	2
12	3
13	6
Promedio	3.46

De acuerdo con los datos obtenidos del tiempo muerto del operador de curvatura, hubo una disminución considerable de 17.44 minutos en promedio, lo que equivale al 83,44% del tiempo muerto sin la implementación del SMED.

Como último análisis del modelo con la implementación de mejoras al proceso, se comparan los tiempos promedio en que los operadores de corte finalizan sus actividades. En la Tabla 21 se muestran los resultados de estos tiempos en 13 replicaciones que se realizaron.

Tabla 21: Resultado de los tiempos promedio de finalización de operaciones operadores de corte.

Replicación	Tiempo promedio de finalización de actividades operadores corte (min)
1	44
2	45
3	43
4	44
5	46
6	43
7	43
8	44
9	44
10	44
11	45
12	44
13	43
Promedio	44

Al comparar los datos obtenidos de los tiempos promedio en que los operadores de corte terminan de realizar sus actividades sin la implementación del SMED y con las mejoras al proceso se obtuvo una disminución de 8.07 minutos equivalente a 15.5%.

4.4. Análisis de resultados de la optimización del segundo modelo por AG.

Lo que se busca al realizar este análisis es encontrar la mejor ruta por medio de una optimización realizada por Algoritmos Genéticos en el programa @RiskOptimizer de un modelo matemático que representa el segundo modelo con la implementación de SMED. En la Figura 35 se muestra la gráfica del proceso de optimización.

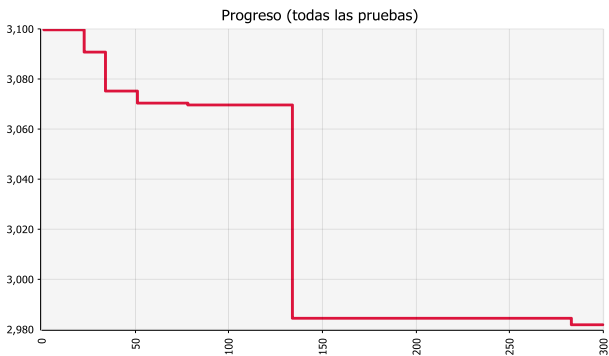


Figura 35: Proceso de la optimización por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).

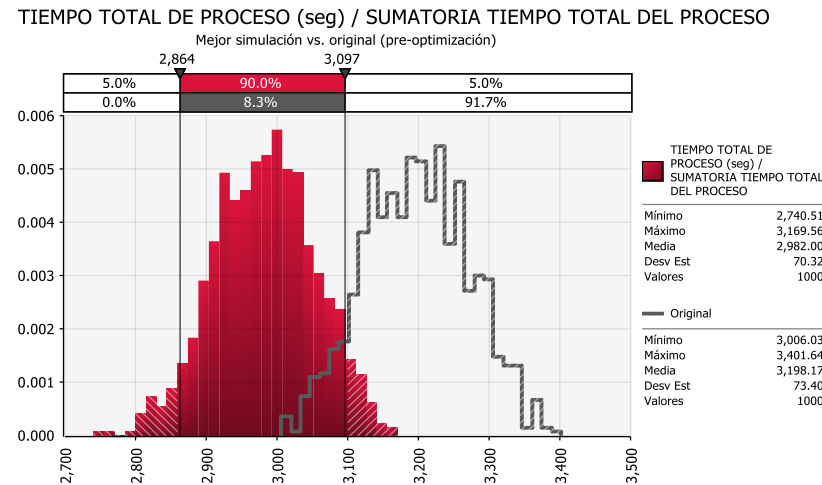


Figura 36: Resultado de optimización por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).

Como se observa en la Figura 36, con la optimización por medio de Algoritmos Genéticos del programa @RiskOptimizer si hubo una disminución del tiempo total del proceso si se

cambia la ruta que se sigue desde el proceso real. De acuerdo con la optimización la media original era de 3198.17 segundos (53.30 minutos) y se minimiza a una media de 2982 segundos (49.7 minutos) obteniendo una disminución de 3.6 minutos si se cambia a la ruta más óptima, que como se muestra en la Figura 37 para los operadores de corte de las líneas 1 y 4, la ruta que deben de seguir es la numero 2; para los operadores de corte de las líneas 2 y 3, la ruta optima es la 16 y por ultimo para los operadores de pintura, deben de seguir la ruta número 4. Estas rutas se muestran en la Figura 26, Figura 27 y Figura 28.

Original	1
Mejor	2
Valores de celdas ajustables	'AG-SMED'!B4
Original	1
Mejor	4
Valores de celdas ajustables	'AG-SMED'!B6
Original	1
Mejor	16

Figura 37: Rutas optimas del proceso de cambio de corrida, @RiskOptimizer (López, 2023).

Por último, para validar y dar soporte que la optimización funciona de manera coherente, se cambiaron las rutas programadas en el segundo modelo de simulación de SIMIO por las rutas que se obtuvieron en la optimización por Algoritmos Genéticos que se muestran en la Figura 37. Se hace una comparación de resultados en el cual se toman las medias del tiempo total del proceso que nos arroja la simulación en SIMIO con el resultado de la optimización. En la Figura 38 se observa el resultado en Excel con el programa @RiskOptimizer donde nos muestra la media del tiempo total del proceso y la media del tiempo total de los operadores de corte y en la Figura 39 se nos muestran los mismos datos, pero en la simulación en el programa SIMIO.

TIEMPO TOTAL DE PROCESO (seg)	2982
TIEMPO PROMEDIO CORTE (seg)	2542
TIEMPO TOTAL DE PROCESO (min)	49.70
TIEMPO PROMEDIO CORTE (min)	42.37
TIEMPOS OPERADORES CORTE	
TOTAL (seg)	2769
TOTAL (min)	46.15
TOTAL (seg)	2315
TOTAL (min)	38.5833333

Figura 38: Tiempo total del proceso optimizado por AG, @RiskOptimizer (López, 2023).

Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
TiempoLlegadaOpera...	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	42.8833
			Maximum (Min...	46.5676
			Minimum (Min...	38.0241
			Observations	8.0000
TiempoLlegadaPieza	UserSpecified	TallyValue	Average (Min...	48.7138
			Maximum (Min...	50.3358
			Minimum (Min...	47.1510
			Observations	4.0000

Figura 39: Resultado de la simulación con cambio a rutas optimas, SIMIO (López, 2023).

Comparando y analizando ambos resultados se puede observar una similitud y coherencia por parte del funcionamiento de la optimización, la media del tiempo total del proceso en la simulación en el programa SIMIO es de 48.71 minutos, mientras que la media en @RiskOptimizer es de 49.70 minutos. Donde se muestra una similitud importante en los resultados es en los resultados de los operadores de corte, dado que solo varían en las decimas de minuto, pero en ambos casos se obtienen los mismos resultados.

Como conclusión al analizar los resultados de la optimización y tomando los valores del sistema real en el cual la media era de 65 minutos se pudo reducir a 49.70 minutos obteniendo así una reducción total del 23.53%.

4.5. Conclusiones.

En este capítulo se analizaron los resultados de todo el desarrollo de la metodología propuesta, comenzando por el primer modelo de simulación que representa al proceso real que sigue la planta en el cambio de corrida, de acuerdo con los resultados obtenidos se demostró que este modelo de simulación es una representación fiel del sistema real. De igual manera se mostraron los resultados de los tiempos de los operadores para poder analizar de mejor manera el impacto de las mejoras hechas al proceso.

Finalmente, los objetivos planteados para este proyecto se cumplieron satisfactoriamente dado que lo que se buscaba es que por medio de la aplicación del SMED, Simulación de Eventos Discretos y la optimización por Algoritmos Genéticos, se minimizara el tiempo total del proceso y de acuerdo con los resultados obtenidos este tiempo tuvo una reducción de 15.3 minutos.

Conclusión

Debido a la globalización existe una alta competitividad entre marcas, lo que causa que las empresas estén en constante mejora continua, dado que si no se actualizan sus procesos o no se cumplen con los periodos de entrega de los productos que ofrecen afectan a toda una cadena de suministro y para el caso de la industria automotriz, es bien sabido que esta cadena siempre está en constante innovación por parte de sus proveedores para cumplir con los contratos de las grandes ensambladoras. Por lo que existe una búsqueda constante para optimizar sus procesos.

Esta investigación se centra en la optimización de un proceso de cambio de corrida, presentando una metodología innovadora al combinar 3 técnicas diferentes que cada una aporta una solución de mejora al sistema que se presenta. Las técnicas que se emplearon en este estudio fue la Simulación de Eventos Discretos, SMED y Algoritmos Genéticos, cada una tiene una metodología marcada que ayuda a conseguir el objetivo propuesto que es minimizar el tiempo total del proceso.

Por otro lado, es importante señalar que este estudio aporta una metodología híbrida que plantea un procedimiento diferente al implementar la metodología SMED con apoyo de la Simulación de Eventos Discretos. A través de SMED, se establecieron nuevas estrategias y metodologías, que consiguieron optimizar las operaciones y procesos que generan una optimización general de los indicadores del proceso de fabricación. En la fase de análisis de las operaciones que son necesarias para realizar el cambio de modelo, se realizaron mejoras con el objetivo de eliminar y/o reducir las operaciones que se realizan en la fase de preparación, bien con maquina parada o las que se realizan previas al cambio. Ahora con esta combinación del SMED con la Simulación de eventos Discretos resulta útil cuando el proceso real no se puede detener para hacer estos cambios y analizar el impacto que pudieran obtener

al implementar estas mejoras, por lo que la simulación es la solución viable para no detener el proceso.

La Inteligencia Artificial en los últimos años ha ido creciendo de manera exponencial, la globalización es parte fundamental de este cambio, por lo que esta investigación brinda un enfoque de optimización con Inteligencia Artificial al utilizar Algoritmos Genéticos que al ser un método adaptativo ideal para resolver problemas de búsqueda y optimización en base a su principio del proceso genético postulado por Darwin, resultó una opción ideal para la resolución de la problemática de este proyecto, la cual era buscar las mejores rutas que podían seguir los operadores de cada área y así estandarizar el proceso. Por lo que se optó por desarrollar un modelo matemático que por medio del programa @Risk se encargó de buscar la mejor ruta tomando los mejores resultados de cada iteración, generando una combinación que diera el mejor resultado. Para este proyecto los AG fueron parte fundamental para lograr una estandarización del proceso, dado que los operadores podían seguir la ruta que ellos creían la mejor o la más cómoda y por medio de este método se llegó a un resultado óptimo, realizando todas las combinaciones posibles que solo una maquina podría realizar en poco tiempo.

Se concluye que con el proyecto desarrollado y con los resultados obtenidos, se hace evidente el potencial que se tiene al implementar esta metodología juntando estas tres técnicas de gran capacidad y ayuda a la toma de decisiones para mejorar un proceso. Los resultados muestran una minimización del tiempo total del proceso y de igual forma se eliminaron los desperdicios de tiempo de cada operador. Con esto, como se menciona en el apartado de resultados se obtuvo una reducción de 15.3 min en promedio por cada cambio de corrida, teniendo en cuenta que en promedio se hacen 3 cambios de corrida al día y haciendo una proyección de al menos 100 procesos de cambio de corrida, la empresa y el proceso se estaría ahorrando 25.5 horas al mes.

Esta investigación aporta un procedimiento, que, de ser posible, pudiera ser aplicado o pudiera servir de guía en investigaciones donde se presente una problemática similar, en la cual se busque la optimización de un sistema de cambio de modelo, minimizando el tiempo total del proceso.

Finalmente, este proyecto de investigación tiene diferentes mejoras para ser aplicados y desarrollados como trabajos futuros, para un estudio más completo se puede desarrollar un análisis económico para observar el impacto que tiene este ahorro del desperdicio del tiempo en la economía de la empresa y del área. De igual manera dar seguimiento al proyecto aplicando las mejoras de manera física debe ser esencial para observar el impacto real que tiene este trabajo de investigación que la metodología puede ser aplicada a cada una de las áreas y los procesos dentro de la empresa.

Referencias Bibliográficas

- Ávila-Rondón, Ricardo Lorenzo, & Márquez-Delgado, José Eduardo, & Herrera-Márquez, Carlos Rafael, & Gómez-Elvira-González, Miguel Ángel (2012). Algoritmo genético aplicado a la programación en talleres de maquinado. *Ingeniería Mecánica*, 15(3), 201-212. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225125175002>
- Arango, J., Montoya, M. & Rosero, S. (2020). Programación de mantenimiento preventivo usando algoritmos genéticos. *Lámpsakos*, (23) ,37-44. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=613964510003>
- Acevedo A. & Linares M. (2012). El enfoque y rol del ingeniero industrial para la gestión y decisión en el mundo de las organizaciones. *Industrial Data*, vol.15, p.9. Baca G.,
- Aguilar, M, Delgado, A, García, B, Acosta, E. (2017). Conocimiento e innovación tecnológica en la ingeniería industrial. *Revista de ingeniería industrial*, 1 (1).
- Baca G., Cruz M., Cristóbal M., Gutiérrez J., Obregón M., Pacheco A., Rivera A., Rivera I. (2014). Generalidades de la ingeniería industrial. En *Introducción de la ingeniería industrial*. México: Grupo Editorial Patria. (p.11).
- Beaver B., Beaver R. & Mendenhall W. (2010). Probabilidad y distribuciones de probabilidad. En *Introducción a la probabilidad y estadística*. México: Cengage Learning Editores. (p.128).
- Camacho, O., Carbajal, L., Aguilar, E. & Estrada, E.. (2018). SMED en el área de presas en la industria automotriz. *Ingeniantes*, 3, 29-32.
- Canales, G. V. (2018). La industria automotriz en México y el desarrollo de proveedores nacionales. *VinculaTégica*, 528-537.
- Cardós, M. &. (2019). *Introducción a la simlación en dirección de operaciones*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Carrizo Moreira, António, & Campos Silva Pais, Gil. (2011). Single Minute Exchange of Die: A Case Study Implementation. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 129-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242011000100011>
- Castillo-Villagra, R., Tordoya-Gálvez, J., Queupumil-Luza, M. & Segovia-Barros, V. (2020). Propuesta de asignación de personal mediante simulación para una empresa de servicios mineros. *Ingeniería Industrial*, 41(3), e4126. Epub 01 de diciembre de 2020., http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362020000300005&lang=es
- Chavaje-Ávila, Liliana, & Pérez-Rodríguez, Ricardo, & Ortiz-Tena, Francisco (2021). Optimización de corte de rollos mediante un algoritmo genético. *Conciencia*

- Coss Bu, R. (2003). *Simulación: Un enfoque práctico*. México: Limusa.
- Cruz, J. &. (2004). SMED: El camino a la flexibilidad total. *InnOvaciOnes de NegOciOs*, 277-283.
- Del Castillo S. & Salazar C. (2017). Importancia del estudio de la estadística. En *Fundamentos Básicos de Estadística*. Quito: Sin Editorial. (p.11).
- Del Valle, M. (2017). Diseño óptimo de empaque y embalaje bajo aspectos funcionales y medioambientales a bajo coste para una empresa hortofrutícola de limón persa. Tesis. Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba.
- Diego-Más, J. (s.f.). Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Gutiérrez E. & Vladimirovna O. (2014). Probabilidad y Estadística, Aplicaciones a la ingeniería y las ciencias. México: Grupo editorial Patria.
- Gutiérrez, N. (s.f.). Algoritmos genéticos aplicados al diseño estructural de armaduras en tres dimensiones. *Tesis*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Hernández, J. &. (2013). *Lean Manufacturing - Conceptos, técnicas e implantación*. Madrid: Escuela de organización industrial.
- Johnson, R. (2012) Probabilidad y estadística para ingenieros. 8va. Edición. Pearson Educación.
- Medina Durán, R., Pradenas Rojas, L. & Parada Daza, V. (2011). Un algoritmo genético para el problema de Job Shop Flexible. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(1), 53-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052011000100006>
- Melquiades, J. L. (2019). Aplicación de metodología SMED a proceso de rectificado interior de buje de carbón mecánico. *Reaxion*.
- Miranda, A. (2007). La industria automotriz en México: Antecedentes, situación actual y perspectivas. *Contaduría y administración*, (221), 209-246. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422007000100010&lng=es&tlng=es.
- Moncho, J, Nolasco, A. (2015). Capítulo 1 - Conceptos básicos de estadística descriptiva y probabilidad. Elsevier, 1(44).
- Peña Ariza, L., & Felizzola Jiménez, H. (2020). Optimización de la capacidad de producción en una empresa de alimentos usando simulación de eventos discretos. *Ingeniare*.

- Rajadell, M. &. (2010). *Lean Manufacturing - La evidencia de una necesidad*. España: Díaz de Santos.
- Rouhiainen, L. (2018). *Inteligencia artificial: 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro*. Barcelona: Planeta.
- Salazar-Hornig, E. & Riquelme-Garrido, M. (2021). Determinación de lotes y programación de múltiples productos en una máquina con tiempos de preparación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(3)Epub 03 de agosto de 2021.<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.018>
- Santana Quintero, L. & Coello, C. (2006). Una introducción a la computación evolutiva y alguna de sus aplicaciones en Economía y Finanzas. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 2() ,3-26. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=233117243001>
- Seoane, T, Martin, J, Martin, E, Lurueña, S, Alonso, F, (2007). Capítulo 7: Estadística descriptiva y estadística inferencial. Elsevier. 33(9).
- Soto, J. & Fernández S. (2011). Algoritmos genéticos aplicados en los sistemas de producción tipo pull. *Scientia Et Technica*, XVI(48),275-280. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84922622049>
- Tornadijo Rodríguez, Tomás F. (2009). Una combinación de un algoritmo voraz con algoritmos genéticos para optimizar la producción de cartón ondulado. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 8() ,71-86. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=233116356005>
- Urquía, A. &. (2016). *Métodos de simulación y modelado*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.