



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“SIMULACIÓN EN SIMIO DEL SISTEMA DE
PRODUCCIÓN DE UNA EMPRESA FABRICANTE DE
VIDRIO AUTOMOTRIZ PARA MEJORAR SU
PRODUCTIVIDAD”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

ING. LUIS ÁNGEL BELLO CASTELLANOS

DIRECTOR DE TESIS:

M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SÁNCHEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

M.I.I. MARCO ANTONIO ROJAS LUNA



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

MARZO 2023

Orizaba, Veracruz, **29/marzo/2023**

Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCIÓN: **I**

C. BELLO CASTELLANOS LUIS ANGEL
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"SIMULACIÓN EN SIMIO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE UNA EMPRESA FABRICANTE
DE VIDRIO AUTOMOTRIZ PARA MEJORAR SU PRODUCTIVIDAD"**

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®



CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



CSR/magh

OG-13-F06



Av. Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272) 1105360 e-mail: depi_orizaba@tecnm.mx, mi@orizaba.tecnm.mx



2023
Francisco
VILLA



Orizaba, Veracruz **Marzo 06, de 2023.**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

BELLO CASTELLANOS LUIS ANGEL

La cual lleva el título de:

SIMULACIÓN EN SIMIO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE UNA EMPRESA FABRICANTE
DE VIDRIO AUTOMOTRIZ PARA MEJORAR SU PRODUCTIVIDAD

y concluyen que se acepta.

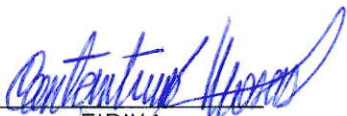
ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: **MII CONSTANTINO G. MORAS SÁNCHEZ**

SECRETARIO: **DR. ALBERTO A. AGUILAR LASSERRE**

VOCAL: **DR. MIGUEL JOSUÉ HEREDIA ROLDÁN**

VOCAL SUP.: **M.I.I. MARCO ANTONIO ROJAS LUNA**


FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-F18



Dedicatoria

Las principales dos personas para quienes dedico todo lo logrado hasta el momento son mi mamá y papá, ambos me han apoyado a su manera desde que nací e incluso siguen apoyándome hasta el momento. De alguna u otra forma han estado presentes en cada cosa que hago, siendo los pilares fundamentales en mi vida y a su vez, mi fuente de motivación. Gracias por todo ese apoyo incondicional, no tengo como pagarles tanto. Los quiero, infinitas gracias para los dos.

A mi hermano, quien ha estado al pendiente de mí durante tantos años, motivándome a seguir adelante, aconsejándome y compartiendo momentos divertidos a su lado, muchas gracias, hermano, una parte de esto te la debo a ti, sabes que te quiero y espero poder seguir compartiendo la vida contigo.

Para mi abuelo Andrés, que a pesar de haber fallecido antes de empezar la maestría, ha sido mi ejemplo a seguir durante todos estos años de mi existir, quien estando en vida fue de gran apoyo para mí y mi familia; de igual manera mi abuelita Anita quien siempre está al pendiente de mí, me ha brindado apoyo y sabios consejos.

También mis tías, tíos y todos mis primos que me han acompañado desde pequeño, estando al pendiente de mí, apoyándome y adoptándome como si fuera un hijo o hermano más, gracias por todos esos viajes y buenos momentos que me han regalado, les tengo mucho cariño.

Por último, pero no menos importantes, a todos y cada uno de mis sobrinos, para quienes tengo un especial cariño, que sepan que en todo momento cuentan con el apoyo de su tío Angel.

Agradecimientos

Primero que nada, a mi apreciado director de tesis el M.I.I. Constantino Gerardo Moras Sánchez a quien agradezco de sobremanera el haberme guiado durante el desarrollo de este proyecto, todos los consejos y enseñanzas que ha compartido conmigo con esa gran paciencia que él tiene, muchas gracias maestro Tino, lo aprecio.

Al M.I.I. Marco Antonio Rojas Luna, gracias a él tuve la oportunidad de encontrar el lugar para desarrollar mi proyecto, fue el medio para acceder a la empresa, dándome todas las facilidades que estaban a su alcance para que se pudiera sacar el proyecto adelante, este proyecto es gracias a ti, Marco.

Agradezco también a mis profesores durante la maestría, Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre, Dr. Carlos Díaz Ramos, Dr. Mario Leoncio Arriola Rodríguez, M.C. Magno Ángel González Huerta y M.C. Jorge Luis Hernández Mortera. En cada una de sus materias obtuve nuevos conocimientos y habilidades. Gracias por su tiempo y pasión en su labor como maestros.

A todos y cada uno de mis compañeros de maestría, a pesar de que gran parte de nuestras clases fueron de manera virtual debido a la pandemia, eso no fue impedimento para formar una amistad. Especialmente con Daniela, Evelyn, Giselle, Majó y William, con quienes compartí tantas horas, algunas de ellas de desvelo, haciendo tareas, estudiando o trabajando en la tesis, así como también les agradezco esos buenos momentos platicando por videollamada o las salidas a comer y divertirnos. Muchas gracias, amigos, me ayudaron a seguir adelante.

Me siento agradecido y orgulloso con el Instituto Tecnológico de Orizaba, que forma parte del TecNM, en el cual estudié la licenciatura y ahora la maestría, es mi alma máter, he recorrido tantas veces sus pasillos, salones e instalaciones que siento como si fuera mi casa.

También al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme permitido estudiar una maestría, gracias al financiamiento otorgado.

A todos ustedes, gracias.

Resumen

En este proyecto se desarrolló un modelo de simulación por medio de la utilización del software Simio, del área de templado de una empresa dedicada a la producción de vidrio automotriz. El principal interés de realizar la simulación se debe a que la empresa desea conocer de mejor manera el sistema productivo que tiene en el área de templado, de manera más específica se desea buscar áreas de mejora que aumenten la productividad del sistema.

Por ello, se utilizó la metodología de simulación que abarca desde la formulación de la problemática hasta la documentación de los resultados. Se tomaron como datos los tiempos de cada uno de los procesos del área para posteriormente realizar pruebas estadísticas que determinaron las distribuciones que seguía cada proceso, encontrando que algunos se adaptaban a distribuciones teóricas conocidas, mientras que algunos procesos requirieron de una distribución empírica. Posteriormente se usó Simio para construir el modelo, haciendo uso de diferentes objetos, sus dinámicas y herramientas para asemejar el modelo de simulación al sistema real, inclusive también se dio un diseño visual en 2D y 3D para ofrecer un mayor parecido con la realidad.

Una vez que se obtuvo el modelo y se corrió algunas veces como prueba, se realizó una prueba para comprobar que los datos de la simulación eran estadísticamente iguales a los del sistema real, obteniendo que el modelo sí se asemeja al área observada, tras lo cual se aplicó otro cálculo para obtener el número óptimo de corridas del modelo y se agregaron etiquetas en Simio para obtener datos de dos medidas de desempeño: tiempo de ciclo y piezas producidas.

Con el modelo terminado, se le realizaron cambios y ajustes para crear tres alternativas, con las cuales se buscó probar si existía alguna mejoría con respecto a las medidas de desempeño, obteniendo un total de cuatro modelos: original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.

Finalmente se compararon los resultados, obteniendo para la alternativa 1 una mejoría del 7.05% de tiempo de ciclo y 7.58% en las piezas producidas; para la alternativa 2 mejoría del 6.87% en el tiempo de ciclo y 7.38% de las piezas producidas; en la alternativa 3 se mejoró el tiempo de ciclo un 6.93% y las piezas producidas en un 7.45%.

Abstract

This project developed a simulation model using Simio software for the tempering area of a company dedicated to the production of automotive glass. The main purpose of the simulation was for the company to gain a better understanding of its production system in the tempering area, specifically to identify areas for improvement that could increase productivity.

The simulation methodology was used, from formulating the problem to documenting the results. The time for each process in the area were used as data to perform statistical tests that determined the distributions followed by each process. Some of the processes followed known theoretical distributions, while others required empirical distributions.

Simio was then used to construct the model, using different objects, dynamics, and tools to simulate the real system, including 2D and 3D visual design to provide a more realistic representation. Once the model was obtained and tested, a verification was conducted to ensure that the simulation data statistically matched the real system, demonstrating that the model accurately represented the observed area.

Then, the optimal number of runs for the model was calculated, and Simio labels were added to obtain data for two performance measures: cycle time and produced pieces. The model was modified and adjusted to create three alternatives, with the aim of testing for potential improvements in performance measures. A total of four models were generated: the original, alternative 1, alternative 2, and alternative 3.

Finally, the results were compared, and the following improvements were observed: for alternative 1, there was a 7.05% improvement in cycle time and a 7.58% improvement in produced pieces; for alternative 2, there was a 6.87% improvement in cycle time and a 7.38% improvement in produced pieces; and for alternative 3, there was a 6.93% improvement in cycle time and a 7.45% improvement in produced pieces.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Generalidades.....	3
1.1 Generalidades de la empresa	3
1.1.1 Descripción de la empresa.....	3
1.1.2 Distribución del área.....	3
1.1.3 Descripción del proceso	4
1.2 Generalidades del proyecto	5
1.2.1 Planteamiento del problema	5
1.2.2 Objetivos.....	6
1.2.2.1 Objetivo general	6
1.2.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.2.3 Justificación.....	7
Capítulo 2. Marco teórico	8
2.1 Industria automotriz mexicana	8
2.2 Industria del vidrio.....	9
2.2.1 Vidrio templado.....	9
2.2.2 Vidrio laminado.....	10
2.3 Parabrisas.....	12
2.4 Productividad.....	13
2.4.1 Definición de productividad	13
2.4.2 Eficiencia y eficacia	13
2.4.3 Takt time.....	13
2.4.4 Tiempo de ciclo	14
2.4.5 OEE	14
2.5 Simulación	15
2.5.1 Definición de simulación.....	15
2.5.2 Objetivo de una simulación	16
2.5.3 Aplicaciones de la simulación	16
2.5.4 Ventajas y desventajas de la simulación	17
2.5.4.1 Ventajas	17
2.5.4.2 Desventajas.....	18
2.5.5 Simulación de eventos discretos.....	18
2.5.6 Software de simulación Simio.....	19
2.6 Optimización en la simulación	21
2.6.1 Metaheurísticas.....	21
2.6.1.1 Recocido simulado	21
2.6.1.2 Algoritmos genéticos.....	21
2.6.1.3 Búsqueda tabú	22
2.6.1.4 Búsqueda dispersa	22
2.6.2 Redes neuronales artificiales	23

	Contenido
2.7 Revisión de la literatura	24
Capítulo 3. Desarrollo de la metodología	28
3.1 Formular el problema	30
3.2 Recolección de los datos.....	31
3.2.1 Obtención de la distribución del proceso de carga	32
3.2.2 Obtención de la distribución del proceso de corte.....	34
3.2.3 Obtención de distribuciones empíricas.....	35
3.2.4 Resumen de las distribuciones de los procesos	36
3.3 Validación del modelo conceptual	37
3.4 Construir el modelo de simulación	39
3.4.1 Asignar las distribuciones.....	40
3.4.2 Agregar reaprovisionamiento	41
3.4.3 Movimiento del brazo robótico	42
3.4.4 Cambio del tamaño de la entidad	44
3.4.5 Resumen de objetos de Simio usados para el modelo de simulación.....	45
3.4.6 Ambientar el modelo	46
3.5 Corridas piloto	49
3.6 Prueba t-pareada	51
3.7 Número óptimo de corridas	52
3.8 Correr el modelo de simulación.....	54
3.9 Diagnóstico de la situación actual	55
Capítulo 4. Resultados.....	60
4.1 Alternativas de mejora.....	60
4.1.1 Alternativa 1: Cambios en el tiempo del sistema de visión.....	60
4.1.1.1 Desarrollo de la alternativa 1	61
4.1.1.2 Modelo original vs alternativa 1	66
4.1.2 Alternativa 2: Agregar un sistema de visión extra	69
4.1.2.1 Desarrollo de la alternativa 2.....	69
4.1.2.2 Modelo original vs alternativa 2	70
4.1.3 Alternativa 3: Sistema de visión extra con el mejor tiempo.....	74
4.1.3.1 Desarrollo de la alternativa 3.....	74
4.1.3.2 Modelo original vs alternativa 3.....	75
4.2 Comparación del modelo original contra alternativas propuestas.....	79
4.2.1 Tiempo de ciclo	80
4.2.2 Piezas producidas	81
4.2.3 Tiempo de ciclo y piezas producidas.....	82
4.3 Conclusiones de los análisis y resultados	84
Conclusiones.....	86
Recomendaciones.....	89

Referencias bibliográficas.....	90
--	-----------

Índice de figuras

Figura 1.1 Distribución del área A.	4
Figura 2.1 Vidrio laminado.	11
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de simulación.....	30
Figura 3.2 Tratamiento de los datos del área de carga.	32
Figura 3.3 Resultados de la prueba para el área de carga.	32
Figura 3.4 Gráfica de la distribución para el área de carga.	33
Figura 3.5 Uso de Real Statistics para el área de carga.	34
Figura 3.6 Prueba de bondad de ajuste para el proceso de corte.	34
Figura 3.7 Gráfica de la distribución para el proceso de corte.	35
Figura 3.8 Distribución empírica en Simio.	36
Figura 3.9 Vista 2D del esbozo del modelo.....	38
Figura 3.10 Vista 3D del esbozo del modelo.	38
Figura 3.11 Vista 2D del modelo.	39
Figura 3.12 Vista 3D del modelo, parte inicial del área.	39
Figura 3.13 Vista 3D del modelo parte final del área.....	40
Figura 3.14 Distribución Normal en Simio.	40
Figura 3.15 Distribución Log normal en Simio.....	40
Figura 3.16 Configuración del <i>source</i>	41
Figura 3.17 Proceso para reabastecer material.	42
Figura 3.18 Área del montacarga, tarima y carga.....	42
Figura 3.19 Configuración para hacer esperar al robot.	43
Figura 3.20 Área de barrenado y bandas transportadoras.	44
Figura 3.21 Modificación del tamaño de la entidad.	44
Figura 3.22 Cambio de tamaño de la entidad.	45
Figura 3.23 Vista general en 2D del modelo con diseño.....	47
Figura 3.24 Vista general en 3D del modelo con diseño.....	48
Figura 3.25 Vista interna en 3D del modelo con diseño.	48
Figura 3.26 Vista de algunas áreas en 3D del modelo con diseño.	48
Figura 3.27 Muestra de una corrida piloto.	50
Figura 3.28 Datos para prueba t-pareada del tiempo de ciclo en segundos.....	51
Figura 3.29 Intervalo de confianza de la prueba t-pareada para el tiempo de ciclo.	52
Figura 3.30 Intervalo de confianza de la prueba t-pareada para las piezas producidas.....	52
Figura 3.31 Obtención del número óptimo de corridas.....	53
Figura 3.32 Simulación del número óptimo de corridas del modelo original.	54
Figura 3.33 Identificación del cuello de botella por medio de acumuladores.....	57
Figura 3.34 Resultados de los objetos del modelo original.....	58
Figura 4.1 Configuración del sistema de visión para la alternativa 1.	61
Figura 4.2 Configuración de la variable de control Tiempo_Svision en el <i>OptQuest</i>	62
Figura 4.3 Configuración de las variables de respuesta Tiempo_de_ciclo y Piezas_producidas.	62
Figura 4.4 Configuración del algoritmo <i>OptQuest</i> para la alternativa 1.	63
Figura 4.5 Resultados preliminares del experimento de la alternativa 1.....	64

Figura 4.6 Resultados filtrados y ordenados del experimento de la alternativa 1.	65
Figura 4.7 Estado final de los acumuladores en alternativa 1.	67
Figura 4.8 Resultados de los objetos de la alternativa 1.	68
Figura 4.9 Vista 2D del sistema de visión de la alternativa 2.	69
Figura 4.10 Vista 2D del sistema de visión del modelo original.	70
Figura 4.11 Simulación del número óptimo de corridas de la alternativa 2.	71
Figura 4.12 Estado final de los acumuladores en alternativa 2.	72
Figura 4.13 Resultados de los objetos de la alternativa 2.	73
Figura 4.14 Configuración del sistema de visión 1 y sistema de visión 2 para la alternativa 3.	74
Figura 4.15 Configuración del experimento para la alternativa 3.	75
Figura 4.16 Simulación del número óptimo de corridas de la alternativa 3.	75
Figura 4.17 Estado final de los acumuladores en alternativa 3.	77
Figura 4.18 Resultados de los objetos de la alternativa 3.	78
Figura 4.19 Comparación del tiempo de ciclo del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.	80
Figura 4.20 Comparación de las piezas producidas del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.	82
Figura 4.21 Comparación porcentual de mejora entre las alternativas de mejora para cada medida de desempeño.	83

Índice de tablas

Tabla 2.1 Diferencias entre parabrisas.	12
Tabla 2.2 Descripción de los objetos de la biblioteca estándar de Simio.	20
Tabla 3.1 Datos del proceso de carga.	31
Tabla 3.2 Tabla de frecuencias para los tiempos de barrenado en segundos.	36
Tabla 3.3 Distribuciones de probabilidad de los tiempos de los procesos del sistema a simular (segundos).	37
Tabla 3.4 Resumen de objetos de Simio usados para el modelo de simulación del área de templado.	46
Tabla 3.5 Datos de las corridas piloto.	50
Tabla 4.1 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 1 (A1).	66
Tabla 4.2 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 2.	71
Tabla 4.3 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 3.	76
Tabla 4.4 Resultados del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.	79
Tabla 4.5 Productividad del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.	79
Tabla 4.6 Porcentajes de mejora de cada medida de desempeño.	83

Índice de ecuaciones

Ec. 2.1	13
Ec. 2.2	14
Ec. 2.3	14
Ec. 2.4	15
Ec. 2.5	15
Ec. 2.6	15
Ec. 2.7	15
Ec. 3.1	52
Ec. 3.2	53
Ec. 3.3	55
Ec. 4.1	67
Ec. 4.2	72
Ec. 4.3	76

Introducción

La industria del vidrio es una actividad económica de suma importancia porque provee una amplia gama de productos que satisfacen necesidades para la industria y para la vida cotidiana (Corrales C., 2010). En este sentido, la industria del vidrio representa una parte fundamental para distintas industrias que dependen precisamente de los distintos tratamientos que se le pueden dar al vidrio, dentro de estas industrias a las que se les puede proveer se encuentra la de la construcción, la automotriz, el envasado de bebidas y alimentos, e incluso en el área química.

Así mismo, la industria del vidrio es proveedora de parabrisas y ventanas necesarias para la industria automotriz, que requiere cumplir con altos estándares de seguridad para reducir al máximo los posibles daños que, en este caso, el vidrio pueda causar a los usuarios de los automóviles. Por esta razón la industria del vidrio requiere que sus procesos sean los adecuados para cumplir con los requisitos de su cliente (la industria automotriz) y no sólo eso, sino que también se tenga una adecuada administración de los procesos, materiales, equipo y personal para cumplir con la calidad esperada, en el tiempo adecuado y con el menor esfuerzo posible.

El presente proyecto se desarrolla en una empresa dedicada a la producción de vidrio templado y laminado para la industria automotriz, con la intención de realizar un análisis de una de las áreas de la empresa y con la finalidad de mejorar la productividad dentro de la misma. La manera en la cual es desarrollado el análisis es por medio de una simulación del área mediante el software llamado Simio, mediante el cual se crea un modelo de simulación de eventos discretos que represente al sistema actual (real), para posteriormente realizar escenarios alternativos del modelo original, modificando algunas de sus características en busca de la mejora de su desempeño.

Para poder desarrollar la simulación del área de la empresa es necesario comprender previamente al sistema real y establecer como se desarrolla el presente proyecto, por lo cual se presenta la metodología de simulación a seguir que consta de 10 pasos. Cada paso de la metodología a utilizar tiene un fundamento que, de manera general, se puede definir como el de comprobar que realmente el modelo de simulación represente al sistema real. Por ello se realizan pruebas estadísticas, como las pruebas de bondad de ajuste para determinar la distribución que

siguen los datos que serán obtenidos, la prueba t-pareada para comprobar que los datos del modelo son estadísticamente iguales al sistema real y determinar el número óptimo de corridas del modelo para obtener la cantidad adecuada de replicaciones para el modelo final.

Una vez realizado todo lo anterior y habiendo pasado cada una de las pruebas, es posible analizar al sistema real por medio del modelo de simulación, para lo cual se propone realizar tres escenarios diferentes al modelo original en los cuales se modifique el modelo basándose en dos medidas de desempeño claves para el área simulada. La intención es buscar aquellos escenarios que demuestren mejoras en dichas medidas de desempeño, y que por consiguiente sean propuestas de mejora para que la empresa incremente su productividad.

Finalmente plantea realizar un análisis y comparación de los resultados obtenidos para las medidas de desempeño en el modelo de simulación original y los modelos de las tres alternativas propuestas, esto con la intención de demostrar si realmente se obtuvo una mejoraría con los cambios realizados y en caso obtenerse la mejoría, saber cuál es la mejor alternativa. Después de dichos análisis se realiza la documentación de lo realizado incluyendo las recomendaciones y conclusiones de todo el proyecto.

Capítulo 1. Generalidades

El presente capítulo está enfocado en dar una idea general de lo que trata el proyecto, definiendo algunos aspectos fundamentales tanto de la empresa como del proyecto, esto con la finalidad de poner en contexto sobre lo que se está desarrollando. Para ello se tendrán dos secciones: la primera donde se detallarán los aspectos importantes referentes a la empresa, y la segunda donde se fundamentará el proyecto y se establecerán los objetivos de éste.

1.1 Generalidades de la empresa

En este primer punto se dará a conocer a la empresa, de la cual, por cuestiones de confidencialidad, únicamente se describirá de manera general. Posteriormente será descrita el área donde se desarrolla el proyecto.

1.1.1 Descripción de la empresa

La empresa donde se desarrolla el presente proyecto se encuentra ubicada dentro de la República Mexicana, ésta se dedica a la producción de productos relacionados al vidrio, de manera más específica, de vidrio para la industria automotriz. Estos vidrios abarcan tanto parabrisas como los que se usan para las puertas de los automóviles.

Dentro de las distintas áreas de la empresa que se dedican a realizar un proceso en específico para el transformado del vidrio hasta su producto final, se tiene el área llamada templado, en la cual se lleva a cabo un tratamiento térmico a cada una de las piezas.

1.1.2 Distribución del área

El área en específico donde se realiza el presente proyecto la llamaremos el área A, donde se realiza el proceso de templado del vidrio. El layout del área se muestra en la Figura 1.1.

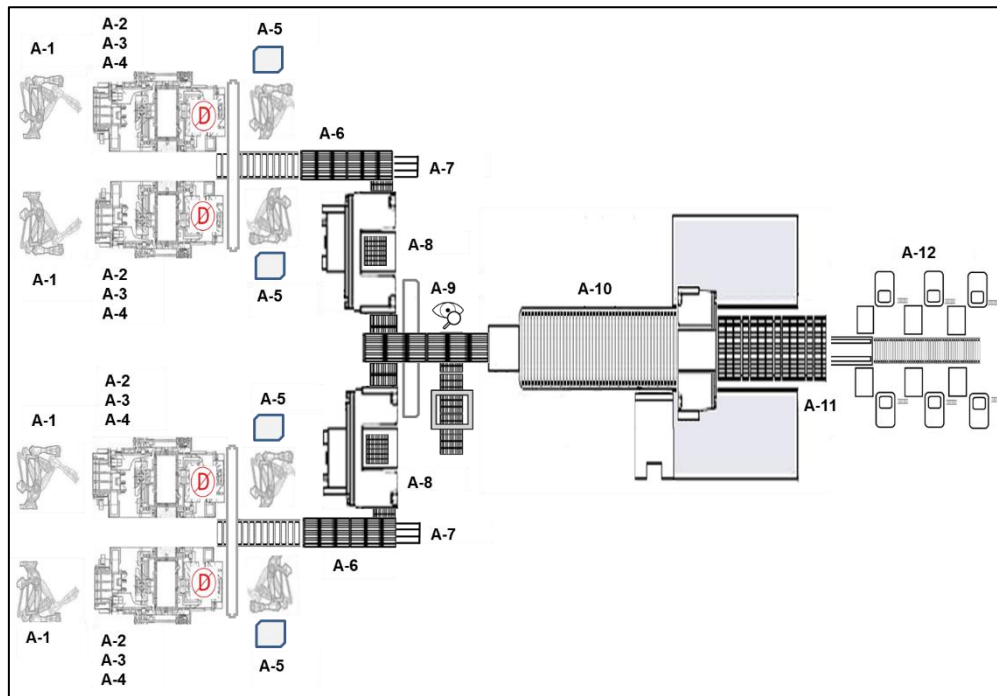


Figura 1.1 Distribución del área A.

1.1.3 Descripción del proceso

El área de templado contempla 12 procesos que comienzan una vez que la materia prima ha sido cargada en la máquina. Dichos procesos se mencionan a continuación:

- A-1: Carga
- A-2: Corte
- A-3: Desprendimiento
- A-4: Pulido al canto
- A-5: Barrenado
- A-6: Lavado y secado
- A-7: Volteado
- A-8: Impresión del sello
- A-9: Sistema de visión
- A-10: Templado
- A-11: Inspección
- A-12: Empaquetado

1.2 Generalidades del proyecto

En este apartado serán presentados los aspectos referentes al proyecto en sí, como lo es el planteamiento del problema, el objetivo por el cual se realiza el presente proyecto, así como también la justificación por la cual se realiza el presente.

1.2.1 Planteamiento del problema

En una empresa dedicada a la producción de vidrio laminado y templado para la industria automotriz, se han detectado algunos problemas en el área de templado, los cuales afectan directamente al tiempo productivo. Dentro de los principales problemas detectados en esta área son los paros no planeados, producción de material defectuoso debido a la descalibración de la maquinaria y presencia de cuellos de botella. El conjunto de estas problemáticas tiene como resultado que la empresa no alcance los niveles de producción que desearía, así como también el enfocar sus recursos en actividades que no generan valor extra a sus productos.

Toda empresa es consciente de sus áreas de mejora, o por lo menos debe darle importancia adecuada a la identificación de sus problemáticas, sin embargo, esto no es suficiente debido a que identificar estas áreas de mejora son tan sólo el primer paso a dar para intentar mejorar. Lo siguiente es buscar reducir los efectos negativos con la intención de mejorar lo más posible, pero en este aspecto pueden existir dos limitantes: el tiempo y los recursos. En este aspecto una empresa podría tener el deseo de mejorar, pero no el tiempo disponible para implementar las mejoras; por otra parte, podría tener el tiempo, pero no los recursos (monetarios, tecnológicos, mano de obra, etc.) para llevar a cabo las modificaciones. Incluso teniendo la disposición de ambos recursos y el deseo de mejorar, la empresa se encuentra ante la incertidumbre de si realmente serán beneficiosos los cambios que se planean aplicar. Precisamente la simulación es una buena herramienta para enfrentar la escasez de tiempo o recursos, pero sobre todo para saber si un cambio realmente será positivo para la empresa o si este cambio sería contraproducente.

La simulación busca representar al sistema real con la intención de comprenderlo de mejor manera, esto debido a que cuando se corre la simulación se obtienen datos que podrían ser difíciles de obtener directamente del sistema, ya sea por la dificultad para acceder a ellos o por los tiempos en que éstos son generados; así mismo la simulación permite modificar los parámetros del sistema, ajustando las distribuciones, añadiendo o eliminando elementos. Con lo

cual la simulación permite realizar análisis adecuados del sistema y sus propuestas de mejora, gestionando de mejorar manera y permitiendo tomar decisiones fundamentadas por parte de la empresa.

Por todo lo anteriormente descrito, se considera que es necesario realizar un análisis del área de templado, mediante el uso de la simulación a través del software llamado Simio, para poder comprender adecuadamente el sistema, así como obtener información relevante de cada una de las partes que lo conforman sin la necesidad de interferir en el mismo. Posteriormente, también se considera necesario manipular el sistema de manera virtual en busca de mejorar su productividad mediante la generación de escenarios alternativos, en los cuales se modifiquen algunos parámetros para evaluar los resultados que se podrían obtener.

1.2.2 Objetivos

Los objetivos para este proyecto han sido divididos en un objetivo general que será la principal meta por cumplir, y algunos objetivos específicos con los cuales su cumplimiento ayuden a alcanzar el objetivo general.

1.2.2.1 Objetivo general

Simular en Simio el sistema actual de producción de una empresa dedicada a la producción de vidrio laminado y templado para la industria automotriz, buscando alternativas enfocadas al aumento del tiempo productivo y de la eficiencia en el área de templado para mejorar la productividad del sistema.

1.2.2.2 Objetivos específicos

Para poder alcanzar el objetivo general propuesto, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el diagnóstico de la situación actual del área de templado.
- Recolectar y analizar los datos reales del área de templado.
- Construir el modelo de simulación del estado actual mediante Simio.
- Realizar propuestas de mejora en Simio tomando como referencia la simulación del estado actual.
- Analizar y evaluar las propuestas de mejora generadas en Simio.

1.2.3 Justificación

Para todo tipo de empresa es necesaria la búsqueda de la mejora continua, en específico para las empresas del tipo nacional e internacional, debido a que al ser empresas con un mayor mercado y por lo tanto un mayor capital, es de suma importancia invertir en la mejora de todos sus procesos. Muchas de este tipo de empresas, incluyendo la presente empresa dedicada a la producción de vidrio laminado y templado, han invertido para encontrar estas áreas de oportunidad, lo cual las ha llevado hasta el lugar que se encuentran hoy en día.

Sin embargo, el haber invertido tiempo en mejorar sus procesos no asegura que estas mejoras permanezcan vigentes durante un tiempo indefinido, debido a que los procesos cambian o inclusive las metodologías y técnicas aplicadas tienen sus propios límites. En este aspecto, se han logrado grandes avances con la llegada de la industria 4.0, trayendo consigo técnicas que ya no solamente se enfocan en mejorar un proceso, sino que van más allá involucrando los avances tecnológicos para realizar diagnósticos, dar seguimiento y respaldar la toma de decisiones. Algunas de estas tecnologías, por mencionar algunas, son la inteligencia artificial, el internet de las cosas, big data y la simulación; siendo ésta última la usada en el presente proyecto.

La elección de la simulación para analizar la situación actual del área de templado se debe a la presencia de las problemáticas descritas en el planteamiento del problema, las cuales, a pesar de haber aplicado técnicas convencionales para la mejora del área, se ha detectado que aún existen estos inconvenientes que impiden cumplir con las metas propuestas en la presente área.

Por lo cual, se busca realizar la simulación del estado actual del proceso de templado, replicando de manera virtual, mediante el uso del software Simio, cada uno de los aspectos relevantes, usando datos extraídos directamente del proceso. De esta manera se logra obtener una representación del sistema real, para poder obtener datos más específicos de su comportamiento, analizar su comportamiento bajo ciertas circunstancias y lo más importante, realizar ajustes sobre algunos parámetros de la simulación en búsqueda de mejorar los tiempos productivos del área de templado; los cuales podrían ser considerados para su aplicación al sistema real.

Capítulo 2. Marco teórico

En este apartado se describirán los fundamentos teóricos necesarios para el entendimiento del proyecto a desarrollar, los cuales irán desde la industria manufacturera y la industria del vidrio, hasta la definición de la técnica a utilizar, que en este caso es la simulación de eventos discretos y finalizando con el tema de productividad. De igual manera se incluye una revisión de la literatura donde se presentarán algunos artículos relacionados al presente proyecto.

2.1 Industria automotriz mexicana

En México, la industria manufacturera constituye una de las actividades productivas más dinámicas. Sus aportes a la economía del país son: 17% del PIB, 5472497 puestos de trabajo y 55.7% del total de inversión extranjera directa (IED). Dentro de las manufacturas, el desempeño de la industria automotriz es de suma importancia, pues en el mismo año aportó 14.7% del PIB manufacturero, razón por la cual esta industria, tanto de ensamblaje como de producción de autopartes, se ha posicionado como un sector clave para la economía. Todo esto según lo mencionado por García Remigio et al. en (2020).

En (Ochoa Valladolid, 2005) se hace mención acerca del lugar que ocupa la industria automotriz de manera interna en México y a nivel internacional, así como los constantes cambios que ésta presenta, que han forzado a que México tenga que realizar rápidos cambios y adaptaciones para poder mantenerse competitivo en este rubro. Ochoa encuentra que la industria en este país está formada de la siguiente manera “por los sectores terminales de producción de vehículos y de autopartes. Las actividades del sector terminal se enfocan principalmente al ensamble de vehículos y el sector de autopartes se encarga de la fabricación de partes y componentes automotrices”.

En conjunto a lo anterior, cabe mencionar la importancia que tiene la seguridad en esta industria, debido a que los productos que ésta elabora son para el transporte de las personas, por lo que requiere de rigurosos estándares de calidad que permitan reducir al máximo cualquier tipo de fallos en los componentes del automóvil, así como que sus partes tengan la resistencia y propiedades necesarias para salvaguardar la vida humana en caso de sufrir un accidente.

2.2 Industria del vidrio

Se puede encontrar que Corrales (2010) menciona que la industria del vidrio es una actividad de gran importancia tanto para algunas industrias como en la vida cotidiana, mencionando también que una de las principales industrias que se beneficia de la producción de vidrio, es la industria automotriz. En este mismo artículo se define al vidrio de la siguiente manera: “El vidrio puede ser transparente, oscuro o de colores, según lo indiquen las necesidades del consumo; su naturaleza química depende de la mezcla de silicio, cuarzo, boratos y fosfatos en el proceso de producción. Hay vidrio plano y curvo, blindado y normal”.

Se puede encontrar una definición del vidrio en Pearson et al. (2009) la cual es “El producto que llamamos vidrio es una sustancia dura, normalmente brillante y transparente, compuesta principalmente de silicatos y álcalis fusionados a alta temperatura”. Así mismo continuando con la definición el autor menciona que el vidrio tiene un estado de la materia propio, llamado estado vítreo. También menciona algunos componentes para el vidrio como la sílice y el carbonato de sodio. De igual manera se menciona que existen materiales secundarios que son usados para conferirle propiedades especiales o para facilitar el proceso de fabricación.

2.2.1 Vidrio templado

En (Avilés Medina, 2014) se describe al vidrio templado como “El vidrio templado es aquel que ha sido tratado con calor y el aumento de su resistencia mecánica y térmica. Este tratamiento tiene el efecto de generar en el interior del vidrio, un sistema de restricción que mejora significativamente la resistencia del producto acabado”, afirmando incluso que el vidrio templado cuenta con una mayor resistencia de hasta el quíntuple de un vidrio común . De igual manera menciona una característica importante del vidrio templado respecto a la seguridad de éste al romperse, puesto que debido a su tratamiento hace que en caso de romperse queda roto en pedazos pequeños, logrando una reducción de un posible accidente por corte.

Uno de los principales objetivos relacionados al estudio del vidrio, es el de mejorar su resistencia mecánica, mediante todo tipo de tratamientos, ya sean mecánicos, térmicos o químicos. Respecto a las fisuras que se crean en el vidrio, en Villegas Broncano et al. (2017) se menciona “eliminación de las microfisuras sólo consiguen su desaparición temporal, un procedimiento alternativo ha sido procurar bloquearlas, manteniéndolas inoperantes mediante la creación

controlada de tensiones de compresión en la superficie del vidrio, que actúen como una delgada capa o coraza protectora que impidan el avance de su propagación”. Precisamente en este aspecto el templado del vidrio permite crear estas capas mencionadas, para este procedimiento los mismos autores mencionan que el temple térmico conlleva un proceso térmico en el cual se calienta el vidrio de manera uniforme hasta lo que definen los autores como la temperatura de transición y una vez se logra mantener esa temperatura, el vidrio es enfriado de manera súbita pero controlada hasta alcanzar la temperatura del entorno.

Otra manera de reforzar al vidrio, respecto al aspecto mecánico, se puede lograr mediante un templado químico, nuevamente en Villegas Broncano et al. (2017) se menciona lo siguiente “Consiste en sumergir el vidrio en un baño de nitrato potásico fundido, y mantenerlo en él durante algunas horas a una temperatura ligeramente superior a la de transición T_g . A lo largo de este tiempo se produce un progresivo intercambio de los iones sodio del vidrio por los iones potásicos del baño de nitrato potásico fundido”, con lo cual se logra aumentar la resistencia del vidrio a la fractura.

Por otra parte, (López & Martínez, 2012) menciona que una manera de poder producir un vidrio de extrema dureza y resistencia es mediante la técnica del templado, definiendo este proceso como “Templar un vidrio es someterlo a un calentamiento controlado y después enfriarlo rápidamente”, complementando con que tras este proceso el vidrio queda en un estado de compresión, logrando que las fuerzas aplicadas contra el vidrio no puedan romperlo con la misma facilidad.

2.2.2 Vidrio laminado

En (2004) Aguilar et al. dan la definición del vidrio laminado como “Un vidrio laminado (simple) consiste en dos vidrios claros unidos por una hoja polimérica de PVB mediante calor y presión y son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones”, donde también se mencionan algunos de los usos del vidrio laminado que puede ser de utilidad para ventanas residenciales de protección contra huracanes, para minimizar el daño contra proyectiles de armas de fuego, así como también en parabrisas de automóviles. Según estos mismos autores cuando se desea realizar un vidrio laminado se suele utilizar un polímero PVB, que es bueno absorbiendo energía

de impacto, así como evita que se desprendan fragmentos de vidrio, ayudando a reducir los daños o riesgos de accidentes.

De igual manera (Aguilar et al., 2004) explican como no solamente es importante tener el vidrio y el polímero, sino que también es de suma importancia mantenerlos con buena adhesión puesto que de ésta depende la separación entre el vidrio y el polímero, y a su vez esto repercute en como se absorbe la energía de impacto, definiendo una relación inversa al hecho de que a mayor adhesión menor separación habrá. Se encuentra que para medir esta adhesión en la industria se cuenta con una escala llamada pummel, que se basa en golpear varias veces un vidrio laminado en ciertas condiciones específicas y en puntos clave. Estos golpes se realizan para medir que tanto vidrio se desprende como resultado de la prueba, la cual puede tomar valores desde 0 hasta 10 pummel, los autores mencionan que un vidrio automotriz se encuentra en un rango de 3 hasta 6 pummel.

Pearson et al. en (2009) mencionan que “Los vidrios laminados son vidrios formados por dos o más hojas de float (incoloro o color, crudo o templado), unidas entre sí por la interposición de una o varias láminas de Polivinil de Butiral (PVB) aplicadas a presión y calor en una autoclave”. Véase Figura 2.1.

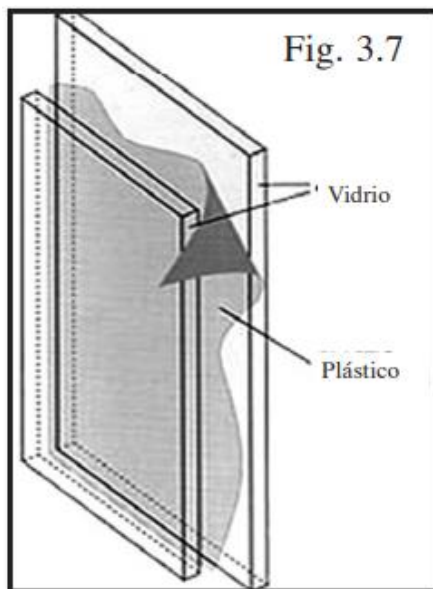


Figura 2.1 Vidrio laminado.
Fuente: Pearson et al., 2009.

Así mismo, en Pearson et al. (2009) se encuentra que, en referencia al vidrio laminado “Esta configuración combina las propiedades del vidrio (transparencia, dureza, etc.) con las propiedades del PVB: Adherencia al vidrio, Elasticidad y Resistencia al impacto”. Explicando que un impacto sobre el vidrio laminado, se absorbe la energía de choque al mismo tiempo que se mantiene la adherencia del vidrio, logrando que los trozos de vidrio no sean desprendidos y se mantenga todo dentro del marco.

2.3 Parabrisas

Para esta definición se toma lo que (Duran Cabrera, 2014) define en su trabajo, quien menciona que los parabrisas (ya sean laminados o templados) tienen como finalidad brindar protección, destacando en esta función los parabrisas hechos con vidrio laminado, que suelen usarse en la parte frontal, pues es una zona con alto riesgo ante un impacto. Así mismo menciona que incluso en algunos es por ley una obligación que todos los vehículos cumplan con la especificación de tener un vidrio laminado en su parte frontal. Dentro de estas ventajas de seguridad se añade que al mismo tiempo el vidrio laminado debe contar con el tratamiento adecuado para que permita al usuario del automóvil ver de manera nítida a través de este vidrio.

Con la finalidad de entender de mejor manera el comportamiento de los vidrios usados para los parabrisas se presenta la Tabla 2.1, que muestra las diferencias entre estos tipos de parabrisas.

Tabla 2.1 Diferencias entre parabrisas.

Vidrios laminados	Vidrios templados
• Cuenta con dos hojas de vidrio y una lámina en medio. • Brinda mayor proyección en caso de accidente por la lámina que tiene. • Su principal uso se da como parabrisas delantero de los autos. • Tiene un costo relativamente alto, con relación a los cristales templados.	• Cuenta con una o dos hojas de vidrios colados dependiendo el tipo de vehículo. • Es considerado un vidrio de seguridad, ya que al romperse lo hace en pedazos diminutos. • Su principal uso se da en todos lados del vehículo. • Tiene un costo más bajo.

Fuente: Duran Cabrera, 2014.

2.4 Productividad

En este punto se dará una revisión a los temas relacionados con la productividad, buscando enfocar los temas a la productividad en las empresas y los procesos de manufactura, así como algunas maneras de medir su desempeño.

2.4.1 Definición de productividad

En (Heizer & Render, 2009) se define la productividad como “la relación que existe entre las salidas (bienes y servicios) y una o más entradas (recursos como mano de obra y capital”. Ellos mencionan que la productividad es un tema relacionado a la administración de los recursos y que a su vez es un buen indicador para evaluar sistemas productivos, ya que ésta refleja que tan bien o mal se está realizando la gestión de dichos recursos. Como complemento a lo anterior los autores mencionan que “la creación de bienes y servicios requiere transformar los recursos en bienes y servicios. Cuanto más eficiente hagamos esta transformación, más productivos seremos y mayor será el valor agregado a los bienes y servicios que proporcionemos”. De igual manera definen la Ec. 2.1 para medir la productividad.

$$Productividad = \frac{Unidades\ producidas}{Insumo\ empleado} \quad Ec. 2.1$$

2.4.2 Eficiencia y eficacia

Se puede encontrar que Heizer & Render (2009) dan una breve y clara descripción de la eficiencia y eficacia diciendo que “eficiencia significa hacer bien el trabajo con un mínimo de recursos y de desperdicio. Observe la distinción entre ser eficiente, que implica hacer bien el trabajo”. Con esta definición se puede interpretar que la eficacia hace referencia a cumplir con las actividades y objetivos sin importar la cantidad de recursos, mientras que la eficiencia busca de igual manera cumplir con las actividades y objetivos, pero buscando el menor gasto de recursos.

2.4.3 Takt time

En el 2013 (Hernández Matías & Vizán Idoipe, 2013) mencionan que “el takt, compás en idioma alemán, se emplea para sincronizar el tiempo de producción con el de ventas, convirtiéndose en un número de referencia que da una sensación del ritmo al que hay que producir”.

Con respecto a la planeación de los recursos para la producción y al takt time (Fogg, 2020) explica lo siguiente “el tiempo takt no tiene nada que ver con la rapidez en que opera un equipo ni la rapidez de los trabajadores. Simplemente es lo rápida que debe ser la producción para cumplir con los plazos de la demanda”. Inclusive, muestra la Ec. 2.2 con la cual se puede calcular el takt time, mencionando que el tiempo disponible de producción es un tiempo en general que no incluye paros programados, fallas, cambios de diseño ni algún otro factor.

$$Takt\ time = \frac{Tiempo\ disponible\ de\ producción}{Unidades\ requeridas(demanda\ del\ cliente)} \quad Ec. 2.2$$

2.4.4 Tiempo de ciclo

Fogg (2020) hace mención sobre que el tiempo de ciclo puede ser un concepto confuso dado su parecido con el takt time, por ello lo describe como “el tiempo de ciclo normalmente se refiere al tiempo que lleva trabajar en una unidad de principio a fin”. Así mismo presenta la Ec. 2.3 para el cálculo del tiempo de ciclo y haciendo notar la diferencia de que en este caso el tiempo de producción sí incluye paros, demoras y cualquier actividad que reste tiempo productivo.

$$Tiempo\ de\ ciclo = \frac{Tiempo\ neto\ de\ producción}{Número\ de\ unidades\ producidas} \quad Ec. 2.3$$

2.4.5 OEE

La efectividad global del equipo (OEE por sus siglas en inglés) es un tema de interés al estar hablando sobre la productividad en una industria, dado que éste es un indicador muy completo. En 2006 (Belohlavek) escribió “el OEE es un método de medición de performance productiva que integra datos de la disponibilidad del equipo, de la eficiencia de la performance y de la tasa de calidad que se logra”. Mencionando que OEE permite medir la producción industrial utilizando los tres aspectos mencionados (disponibilidad, rendimiento y calidad). Este mismo autor da una breve descripción de los tres conceptos, explicando que la disponibilidad está relacionada con el tiempo de producción y los paros o retrasos; el rendimiento tiene que ver con la capacidad productiva de los equipos contra la que se obtiene realmente; y la calidad involucra la cantidad de bienes producidos con calidad del total de bienes producidos totales.

De manera general, se le atribuye la creación del concepto de OEE a Seiichi Nakajima, por lo que las fórmulas pueden variar dependiendo de algunos autores, pero las fórmulas más conocidas para calcular este indicador son:

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ de\ producción\ real}{Tiempo\ de\ producción\ total} \quad Ec. 2.4$$

$$Rendimiento = \frac{Producción\ real}{Producción\ esperada} \quad Ec. 2.5$$

$$Calidad = \frac{Producción\ de\ calidad}{Producción\ total} \quad Ec. 2.6$$

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad Ec. 2.7$$

2.5 Simulación

La simulación es una herramienta de bastante utilidad en distintas áreas de estudio, como lo es la industria automotriz, permitiendo evaluar sistemas complejos mediante modelos virtuales sin la necesidad de modificarlos. En esta sección serán descritos los fundamentos básicos y necesarios para comprender de mejor manera lo que es una simulación orientada a un proceso.

2.5.1 Definición de simulación

Una adecuada definición de lo que es una simulación, la da (Law, 2015) quien dice “en simulación usamos una computadora para evaluar un modelo numérico, y los datos son tomados para estimar las verdaderas características del modelo”. Lo cual es una breve descripción, pero resume adecuadamente la idea de una simulación, que es representar un sistema real y obtener características en específico.

Otra definición se encuentra en (Coss Bu, 1999) que definen a la simulación como un proceso para diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Según (Allen Joines & Dean Roberts, 2015) “la simulación es una herramienta de mejora del rendimiento. La simulación actúa como un laboratorio experimental, excepto que nuestro el laboratorio no es físico, sino un modelo informático”.

2.5.2 Objetivo de una simulación

(Riverola & Cuadrado, 2003) mencionan que “el propósito de la simulación es que el decisor entienda mejor el modelo, no se crea los números que produce el modelo” haciendo referencia a que de nada sirve llevar a cabo una simulación si únicamente se busca obtener resultados numéricos, puesto que estos datos pueden variar entre simulaciones debido a las probabilidades o la incertidumbre. “¡Olvídese de los números! Lo importante es entender las relaciones cualitativas (y a veces hasta cuantitativas) entre los diferentes elementos del modelo”, dejando en claro que el principal objetivo de la simulación es la representación del sistema real mediante un modelo computarizado para comprender el comportamiento de éste.

Es evidente la importancia de los datos generados, sin embargo, esos datos deben ser tratados con especial cuidado para poder hacer las interpretaciones correctas acerca del sistema, el cual una vez es comprendido correctamente, la interpretación de la información generada por la simulación será adecuada.

Así mismo en (Allen Joines & Dean Roberts, 2015) mencionan que con la simulación se busca imitar el actuar de distintos tipos de sistemas como lo son empresas dedicadas a la manufactura, hospitales, almacenes, parques y demás sistemas, recalcando que sea cual sea el sistema, ya sea que brinde un servicio o se dedique a la producción de bienes, es posible analizar distintos aspectos previo a la toma de decisiones.

2.5.3 Aplicaciones de la simulación

Al entender a la simulación como una manera de representar a una situación real mediante un modelo, es importante saber de qué maneras se puede aplicar la simulación. En Jiménez Avelló et al. (2015) se describen algunas posibles aplicaciones basadas en el objetivo que se busca conseguir, dichas aplicaciones son las siguientes:

1. Analizar sistemas: Estudiar el comportamiento del sistema y conocerlo de mejor manera.
 2. Diseño de sistemas: Probar cambios del sistema para probar como se comporta bajo diferentes condiciones.
 3. Postulación de sistemas: Intentar generar modelos que representen sistemas reales, en este se busca crear modelos cuando el sistema ya se conoce y en base a esa información elaborar el modelo que logre asimilar esa realidad.
-

2.5.4 Ventajas y desventajas de la simulación

Con la finalidad de comprender mejor la simulación, se presentan las ventajas y las desventajas presentes al utilizar una simulación.

2.5.4.1 Ventajas

En (Marín Amador, 2019) se definen algunas ventajas, de las cuales se destaca lo siguiente:

- La simulación permite probar cambios sobre el modelo o propuestas de mejora sin afectar al sistema real.
- Flexibilidad para manejar el tiempo de la simulación, pudiendo ir más rápido, lento o incluso detener el modelo para estudiarlo.
- Ayuda a entender eventos complejos dado la información que se ofrece.
- Capacidad para modificar como funciona el modelo, dando la característica de manipular la realidad por medio de un modelo que simule el sistema real, ahorrando valiosos recursos y evitando accidentes.
- Diagnosticar problemas. Las fábricas modernas son muy complejas, es por ello por lo que es imposible considerar todas las interacciones que toman lugar en un momento dado. La simulación permite entender mejor la interacción entre ellas incrementando el entendimiento de sus principales efectos sobre el sistema completo.
- Por medio de la simulación es posible identificar cuellos de botella, así como cuales son las causas de estas problemáticas.
- Ayuda a entender de mejor manera al sistema que se está simulando.
- Dependiendo del software usado, éste puede ser capaz de mostrar las operaciones desde varios ángulos y niveles de magnificación, y aun en tercera dimensión.
- Usando simulación para presentar cambios en el modelo crea una opinión objetiva, ya que evita tomar inferencias cuando se aprueba y desaprueba, debido a que simplemente se seleccionan los diseños y modificaciones que brindan los resultados más deseables.
- La simulación permite aclarar las dudas existentes acerca del sistema, puesto que se pueden manipular una gran cantidad de aspectos que permitan al usuario probar los resultados y repercusiones que podrían tener los escenarios que tenga en mente.
- Resulta significativamente más barato invertir en un proyecto de simulación que la implementación de cambios en el sistema real, ya que con la simulación se puede incluso

revertir los cambios si no fueron beneficios, a diferencia de cuando son aplicados en la realidad.

- La simulación es en un momento dado usada para especificar requerimientos para un diseño de sistema. Por ejemplo, mediante la simulación de diferentes capacidades de una máquina, los requerimientos pueden ser establecidos.

2.5.4.2 Desventajas

De igual manera (Marín Amador, 2019) presenta algunas desventajas de la simulación, en donde se destaca:

- No cualquier persona puede realizar una simulación, se requiere de personal capacitado para aplicar esta herramienta, que conlleva un tiempo de preparación.
- La simulación se basa en mostrar sus resultados con apoyo de la aleatoriedad, lo que de manera general produce buenos resultados, sin embargo, podrían encontrarse casos que ante las variables aleatorias se podrían encontrar casos que se esté estudiando un fenómeno no conocido como algo posible dentro del sistema real, cuando éste fue producido por la coincidencia de múltiples números aleatorios.
- Puede tomar más tiempo del disponible o el esperado, esto debido a que tiene un alto nivel de detalle y requiere alto dominio del tema y conocimiento del software, así como las licencias de algunos softwares de simulación tienen costos elevados.
- Simulación puede ser usada cuando no es requerida, en algunos casos cuando una solución analítica es posible y preferible.

2.5.5 Simulación de eventos discretos

En (Law, 2015) se define a la simulación de eventos discretos como “La simulación de eventos discretos se refiere a la modelación de un sistema y su comportamiento a lo largo del tiempo, siendo una representación en la que las variables cambian instantáneamente en diferentes puntos del tiempo (matemáticamente se dice que el sistema puede cambiar en solo un número contable de puntos en el tiempo)”. Aclarando que los puntos que mencionan son momentos donde sucede algún evento, es decir, un cambio dentro del sistema que altera su estado.

De igual manera, respecto a la complejidad para desarrollar una simulación mediante cálculos manuales (Law, 2015) explica que, dada la cantidad de datos a manipular y almacenar para la

mayoría de los sistemas del mundo real, estas simulaciones deben ser realizadas mediante computadora.

Otra definición dada por (Urquía Moraleda & Martín Villalba, 2013) respecto a un evento discreto es “las variables del modelo cambian únicamente en determinados instantes de tiempo, manteniéndose constante el resto del tiempo”, teniendo que el tiempo que transcurre entre estos eventos puede ser cualquiera.

2.5.6 Software de simulación Simio

En (2011) Kelton et al. comentan lo siguiente: “Simio está orientado a objetos conjunto de productos de simulación y programación comercializados por Simio LLC. Simio es un marco de simulación modelada basado en sistemas inteligentes, objetos que permiten construir modelos utilizando la biblioteca estándar predeterminada (para simulación de eventos discretos) o creando gráficamente objetos completamente nuevos (un objeto en Simio tiene propiedades, estados y lógica.)”. Los autores mencionan algunas características de la biblioteca estándar de Simio, como que cuenta con 14 objetos, los cuales pueden ser modificados por medio de procesos, y a su vez nuevos objetos pueden guardarse en una biblioteca especial en caso de que se desee usarlos en otros proyectos. Continuando con las características del software dicen que un objeto puede representar distintas cosas dentro de Simio, como ser un cliente o una máquina, entre otras cosas más, que pueden ser modelados por medio de las lógicas del software, así como agregar una parte visual para dar una mejor apariencia, pudiendo tener una vista bidimensional e incluso una vista tridimensional.

Los objetos presentes en la biblioteca estándar en Simio representan a un objeto físico, un dispositivo o un elemento, los cuales se agregan fácilmente arrastrando desde la biblioteca hasta la ventana de trabajo. En la Tabla 2.2 se presentan los objetos de la biblioteca estándar de Simio con una breve descripción.

Tabla 2.2 Descripción de los objetos de la biblioteca estándar de Simio.

Objeto	Descripción
Source	Genera entidades de un tipo específico y un patrón de llegada.
Sink	Destruye entidades que han completado su proceso en el modelo.
Server	Representa a un proceso como una máquina o una operación.
Combiner	Combina múltiples entidades junto con una entidad padre.
Separator	Separa un conjunto de entidades o crea copias de una sola entidad.
Resource	Un objeto genérico que puede ser tomado y lanzado por otros objetos.
Vehicle	Un transporte que puede seguir una ruta específica o recoger/dejar bajo demanda.
Worker	Modela actividades relacionadas con las personas. Puede usarse como un objeto en movimiento o transporte, y puede seguir un horario.
BasicNode	Modela una simple intersección entre múltiples conexiones
TransferNode	Modela intersecciones complejas para cambiar el destino y el método de transporte.
Connector	Es una conexión de tiempo cero entre dos nodos.
Path	Es una conexión por la cual las entidades pueden moverse a su propia velocidad.
TimePath	Una conexión que tiene un tiempo específico de viaje para todas las entidades.
Conveyor	Una conexión que modela transportadores de objetos tanto acumulados y no acumulados.

Fuente: Smith & Sturrock, 2021.

2.6 Optimización en la simulación

Cuando se desarrolla un proyecto de simulación se suelen hacer cambios al modelo creado en busca de mejorar alguna variable de respuesta, para ello pueden aplicarse diferentes métodos para buscar optimizar la simulación. En este punto se describirán algunas técnicas enfocadas en metaheurísticas que permiten encontrar los mejores puntos de respuesta, así como información general acerca de redes neuronales artificiales, ya que estas técnicas son usadas por algunos softwares de simulación.

2.6.1 Metaheurísticas

En (2005) Fu et al. definieron el concepto como “las metaheurísticas son métodos que guían a otros procedimientos (heurísticos o métodos de truncamiento) para permitirles salir de óptimos locales en problemas complejos de optimización”. Ellos mencionan las principales metaheurísticas para la optimización de la simulación: recocido simulado, algoritmos genéticos, búsqueda tabú y búsqueda dispersa.

2.6.1.1 Recocido simulado

Para este primer algoritmo se encuentra que Hoyos G. et al. (2007) lo definen como “una metodología de optimización basado en procesos termodinámicos (recocido), la idea es que a partir de puntos existentes se crean vecinos (versiones perturbadas de los puntos), a los cuales se les prueba su función de costo y si ésta es de mejor calidad que la del punto existente, el vecino entra a reemplazar al punto existente”. Estos autores mencionan como las respuestas de mala calidad van perdiendo la probabilidad de aparición conforme se avanza en el proceso del algoritmo y destacan que éste únicamente se aplica durante un tiempo determinado.

2.6.1.2 Algoritmos genéticos

Respecto a los algoritmos genéticos Capdevila et al. (2010) los explica como un conjunto inicial de datos, que se interpretan como vectores de datos los cuales al ser de entrada son asocian con datos de salida, para posteriormente realizar transformaciones de los datos mediante entrelazamientos, cuyas transformaciones buscan asimilar las que se dan en la naturaleza, donde se trasmite información genética entre las partes involucradas. Los autores comentan que con esta técnica se busca aproximarse al resultado óptimo de la función establecida en un inicio, esto se logra por medio de los entrelazamientos mencionados, produciendo distintas nuevas

generaciones de nuevos datos que ahora son resultados y de los cuales se almacenan los mejores para posteriormente realizar un proceso iterativo con esos datos. Todo ese proceso iterativo se termina cuando no se encuentran diferencias significativas entre las sucesivas generaciones de datos.

2.6.1.3 Búsqueda tabú

En (Melián Batista & Glover, 2006) mencionan que la búsqueda tabú es una metaheurística enfocada en la búsqueda de la optimización local o por vecindades para moverse de manera iterativa hacia la mejor solución, contando con una memoria adaptativa a diferencia de otros métodos que no cuentan con memoria o se basan únicamente en resultados previos. La búsqueda tabú se apoya de esa capacidad de memoria para almacenar aquellas mejores soluciones y guardarlas en una lista llamada tabú junto con algunos atributos de esas soluciones, esto ayuda a que soluciones previamente visitadas no vuelvan a evaluarse, es decir que son soluciones prohibidas de ahí el nombre tabú. De igual manera los autores mencionan los conceptos de intensificación y diversificación como elementos de suma importancia en el proceso de búsqueda, para la intensificación mencionan que “se basa en la modificación de reglas de selección para favorecer la elección de buenas combinaciones de movimientos y características de soluciones encontradas. Esto implica que es necesario identificar un conjunto de soluciones élite cuyos buenos atributos puedan ser incorporados a nuevas soluciones creadas”; y para las estrategias de diversificación destacan que “tratan de conducir la búsqueda a zonas del espacio de soluciones no visitadas anteriormente y generar nuevas soluciones que difieran significativamente de las ya evaluadas”.

Con esta definición es posible definir a la búsqueda tabú como una metaheurística que no sólo busca la mejor solución desde un punto inicial, sino que también busca recorrer soluciones no visitadas, que contengan características similares a las mejores soluciones encontradas basándose en lo que el propio algoritmo a memorizado hasta recorrer todos los posibles caminos.

2.6.1.4 Búsqueda dispersa

Es una metaheurística propuesta por F. Glover en 1977, que años después en su trabajo (Glover, 1997) se menciona que la búsqueda dispersa tiene sus fundamentos en estrategias que combinan reglas de decisiones y restricciones, esto se busca por medio de dos principios que el mismo

autor menciona. La primera hace referencia a la captura de información que no se contenía en un inicio y la segunda es aprovechar las ventajas de los métodos heurísticos en los que se basa para evaluar las soluciones en busca de nuevas respuestas. Con esto Glover indica que es posible obtener información relevante de las mejores soluciones cuando éstas son combinadas con otras buenas soluciones. En su mismo trabajo (Glover, 1997) establece los siguientes principios:

- Información útil acerca de la forma o posición de las mejores soluciones está típicamente contenida en una colección diversa de buenas soluciones.
- Cuando se combinan soluciones como estrategia para explotar esta información, es importante proporcionar combinaciones que se puedan extrapolar fuera de la región contenida entre las soluciones a combinar.
- Tomar en cuenta múltiples soluciones de manera simultánea como la base para crear combinaciones, mejora la oportunidad de explotar la información almacenada de las mejores soluciones.

Un complemento a la definición de la búsqueda dispersa se encuentra en (Faundes Berkhoff, 2014) que la define como un algoritmo que evoluciona tomando como base un conjunto de datos de referencia, el cual tras cada evolución (iteración) sustituye las mejores soluciones pasadas. El autor menciona que esta búsqueda se enfoca en cumplir la función objetivo, pero también se busca diversidad entre las soluciones, es decir que tanta diferencia hay entre cada una de esas soluciones. El principal enfoque de esta búsqueda es la diversidad, teniendo como objetivo que el algoritmo no se quede concentrado buscando en una sola región, logrando probar soluciones fuera de los óptimos locales y buscando en más zonas del espacio factible.

2.6.2 Redes neuronales artificiales

Según lo comentado en (Flórez López & Fernández Fernández, 2008) las redes neuronales artificiales (RNAs) tratan de asimilar el comportamiento del cerebro humano que aprende mediante la experiencia y la extracción de conocimiento genérico por medio del conjunto de datos. Por otra parte (Castellano Méndez, 2009) menciona que una red neuronal tiene su parecido con el cerebro ya que la red adquiere conocimientos a través del proceso de aprendizaje y porque se cuentan con conexiones interneuronales que almacenan conocimiento (información).

Respecto al funcionamiento de una red neuronal (Castellano Méndez, 2009) lo describe como que “se dispone de una serie de datos y asociados a ellos la respuesta deseable de la red (training set). La red de algún modo observa estos hechos y aprende de ellos (entrenamiento), de modo que cuando se encuentre en una nueva situación actúe de modo coherente con lo aprendido. Para evaluar el comportamiento de la red ante nuevas situaciones se considerará un nuevo subconjunto de datos (validation set), independiente del conjunto de entrenamiento”.

2.7 Revisión de la literatura

Con el avance computacional que se ha tenido durante los últimos años, en donde se ha vuelto común tener una computadora en casa, la oficina y en las empresas, se han facilitado ciertas actividades dado al poder del cálculo de estos ordenadores. Distintas áreas de estudio se han visto beneficiadas por el desarrollo de softwares, tal es el caso de la simulación, que previo al avance computacional mencionado era complicado aplicarla debido al tiempo de procesamiento computacional, o en su caso a las limitaciones del cálculo humano. Al mencionar la simulación se puede abarcar desde un modelo puramente matemático que represente al sistema hasta una recreación completamente visual que replique al sistema real.

En este apartado se presenta la revisión de proyectos realizados por otros autores mediante la simulación, se busca que estos proyectos apliquen la simulación de eventos discretos, preferentemente mediante el software de simulación llamado Simio. Sin embargo, a manera de enriquecer esta revisión, también se presentan aquellos desarrollados bajo cualquier tipo de software y/o simulación. Por otra parte, el enfoque que se busca para estas simulaciones es el análisis y mejora de indicadores en el área de vidrio templado y lamido del sector automotriz, nuevamente con la finalidad de no sesgar la búsqueda, se dará revisión a aquellos que simulen algún tipo de mejora en cualquier área o ámbito. Cada una de las publicaciones seleccionadas serán descritas brevemente en los siguientes párrafos.

Para demostrar la utilidad de la simulación en una empresa automotriz, se presenta el trabajo de Buselato Maurício et al. (2015) donde se detectó un alto porcentaje (38%) de desperdicios en una familia de productos en específico. Con la simulación lograron encontrar que esto se debía a una mala distribución de la maquinaria, un bajo porcentaje de utilización en ciertas

operaciones mientras que en otras este porcentaje era excesivo. Con lo cual se logró proponer una nueva distribución que demostraba la reducción de las distancias, aumento en la productividad y reducción del lead time, siendo esta alternativa implementada por la empresa reduciendo su número de máquinas.

Continuando con la simulación en el entorno automotriz, se encuentra que Vieira et al. (2018) realizan un modelo para la cadena de suministro mediante la simulación de eventos discretos en Simio. Enfocándose en algunos indicadores como el nivel de inventario, el porcentaje de entregas en tiempo entre otros dos, para lo cual desarrollaron y probaron 4 escenarios modificando los valores de las distribuciones de probabilidad. Más allá de los resultados obtenidos en este artículo, se destaca la utilidad de la simulación para evaluar el desempeño de un sistema, como lo es el automotriz, incluso desde varios enfoques como lo es el presente que se enfoca hacia la cadena de suministro.

A manera de evidenciar la utilidad del uso de simulación para el apoyo a la mejora de la utilización en un sistema, se presenta lo desarrollado por Fuentes Rosas et al. en (2021) que modelaron un sitio de taxis para obtener las principales medidas de desempeño de este sistema y realizar un análisis de sensibilidad en cuanto a las unidades necesarias en este sitio de taxis. Tras el desarrollo de la metodología y realización de 118 corridas encontraron el número de unidades (taxis) que lograba aumentar un 14% la utilización, así como algunos datos relevantes como el tiempo promedio de un viaje, en qué porcentaje se distribuye la cantidad de clientes por servicio, entre otros datos. Así demostraron la utilidad de la simulación para obtener información relevante sin importar el área de aplicación.

Por su parte (Tinoco Chamaidan, 2017) desarrolla la simulación del proceso de fabricación de circuitos electrónicos mediante una simulación de eventos discretos utilizando el software Simio, cabe mencionar que contempló otros 5 simuladores, definiendo sus características generales y seleccionó Simio por ser el que mejor se adaptaba al proyecto. Este modelo de simulación se desarrolla con el objetivo de evaluar al sistema actual, generando datos importantes para comprender el desempeño de éste; como complemento se realizan 2 escenarios alternativos para evaluar los cambios que se generan en dicho escenario. Al realizar la

comparación de los escenarios y el modelo actual, encontró que las alternativas propuestas son capaces de mejorar los tiempos de producción y reducir los elementos en cola de espera.

En Ojstersek et al. (2019) se realiza una simulación de un modelo de eventos discretos para el apoyo a la decisión, mediante la creación de 4 escenarios de diferentes situaciones del sistema de producción, como lo es el sistema con y sin fallas, así como modificando los valores de las distribuciones que representan los tiempos de procesamiento. Como parte de la evaluación de los escenarios, se utilizó la realidad virtual para visualizar el modelo mediante el hardware y software Oculus Company, logrando así no solamente evaluar al sistema numéricamente, sino que también gráficamente en el tiempo real de la simulación.

Mientras que en (2014) Herrera García et al. identifican una problemática relacionada con la saturación de la capacidad en el transporte aéreo, es decir que su demanda es mayor a su capacidad, causando demoras en los viajes, cancelaciones y pérdida de conexiones. Por ello se presentan un modelo de simulación capaz de simular los despegues y aterrizajes de las aeronaves, con la intención de reducir los costos de operación y demoras de los pasajeros. Mediante la simulación de una estrategia propuesta, lograron encontrar una reducción considerable de los costos anuales y una reducción en las demoras de los pasajeros.

Siguiendo con la aplicación de una simulación en (Pérez & Riaño, 2007) realizan una simulación de eventos discretos para una cafetería, específicamente para analizar la llegada de los clientes y como esto afecta a la capacidad de atención de estos por parte del sistema, es decir que realizan un análisis de colas mediante simulación. Tras la construcción del modelo mediante el software Arena, realizaron escenarios modificando el número de servidores, la distribución de las filas, entre otros; con los cuales encontraron la manera de reducir en un 50% el tiempo máximo en cola y consecutivamente una reducción del número de clientes en la cola. Con lo cual se pone en evidencia el potencial que tiene la simulación para generar datos importantes, los cuales pueden ser modificados y evaluados mediante los distintos escenarios partiendo de un mismo modelo.

De manera paralela a la simulación de eventos discretos, se pueden presentar simulaciones con una programación robótica como (Rodríguez Quintero, 2016) que aplica la simulación para visualizar las trayectorias que describe un robot dentro del proceso analizado, dicha simulación la realizan mediante un lenguaje de programación llamado Melfa Basic IV. El área en donde se desarrolla esta simulación es dentro del proceso de parabrisas, en el cual mediante el análisis realizado con este tipo de simulación demuestra una reducción en los tiempos de preparación de parabrisas, así como un aumento en el aprovechamiento del robot analizado.

Tomando en consideración el enfoque de la toma de decisiones, la simulación es de gran ayuda para realizar análisis que den soporte a las decisiones, un tipo de simulación que puede ser de ayuda es la simulación Monte Carlo, Vanalle et al. (2012) implementan este tipo de simulación para una línea de montaje de termostatos de plancha, donde se detectaron problemáticas relacionadas a la producción, lo cual era preocupante debido a que dicha línea de montaje había sido diseñada específicamente para cumplir con la producción requerida. Con la simulación Monte Carlo se detectó que los tiempos de proceso reales se encontraban en un 11% por debajo de lo diseñado, así como se identificaron los tiempos de ocio en los operadores; tras lo cual se realizaron propuestas de mejora que fueron probadas nuevamente con la Simulación Monte Carlo.

Otro tipo de simulación diferente a lo visto, pero enfocada al tratamiento de un parabrisas, se puede encontrar en (Celestino Guajardo, 2017) que estudia las propiedades físicas del vidrio para poder comprender el comportamiento de éste bajo ciertas condiciones, para posteriormente aplicar experimentos mediante simulación y analizar las diferencias de temperatura en las diferentes zonas de un mismo vidrio. Este análisis lo realiza mediante corridas de algunos casos, generando gráficos de éstas para evaluar el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo y comparando las corridas entre sí. De igual manera generó simulaciones en 2D para ver la distribución de las temperaturas en el parabrisas con un rango de colores que diferenciaban entre temperaturas bajas y altas. Generando de esta manera una forma de visualizar el comportamiento de las propiedades del vidrio a lo largo del proceso que de otra manera son difíciles de apreciar; demostrando así que la simulación puede ser aplicada de distintas maneras.

Capítulo 3. Desarrollo de la metodología

La metodología propuesta para el presente proyecto será basada en los 10 pasos de simulación propuestos en (2015) por Law, los cuales serán definidos e interpretados a continuación de acuerdo con el presente proyecto:

1. Formular el problema: Se deben definir los objetivos por los cuales se desarrolla el proyecto, definiendo también la manera en que se evaluará los mismos, es decir algunos indicadores. Otros aspectos importantes por definir en este primer punto son la duración del proyecto y el software a utilizar para la simulación.
2. Recolectar datos y definir el modelo: Se lleva a cabo la recolección de los datos realmente necesarios para representar adecuadamente al sistema, delimitando que grado de detalle se requiere para el modelo para no recolectar datos que podrían ser irrelevantes. De igual manera es necesario aplicar las pruebas necesarias (pruebas de bondad de ajuste) para conocer el tipo de distribución que siguen los datos recolectados. Con esta información, en este punto se requiere realizar un esbozo del modelo que de manera muy general represente al sistema, o en su caso realizar un diagrama de flujo.
3. Validar el modelo conceptual: En este punto se debe dar respuesta a la pregunta ¿es válido el modelo conceptual?, es decir, corroborar que el modelo realizado represente correctamente al sistema real y que las suposiciones realizadas sean las correctas.
4. Construir el modelo de simulación: Para la construcción del modelo de simulación se puede realizar mediante programación o mediante un software de simulación, en este caso se utiliza un software de simulación llamado Simio. La idea principal es representar al sistema real por medio de la simulación, enfocándose en que los elementos clave y datos obtenidos estén presentes, sin entrar en una representación detallada.
5. Realizar corridas piloto: Se realizan corridas de prueba del modelo dentro del software de simulación para obtener los primeros datos generados por el modelo planteado.
6. Validar los datos obtenidos en las pruebas piloto: Basándose en los datos generados en el paso 5, se realiza una prueba t-pareada con la intención de probar si el modelo genera datos estadísticamente iguales a los del sistema real.
7. Aplicar un diseño de experimentos: Con la intención de no realizar corridas del modelo innecesarias o que estas sean menores a las necesarias, se debe calcular el número óptimo de corridas para el modelo.

8. Correr el modelo de simulación: Realizar el número óptimo de corridas obtenido en el paso 7, y registrar los datos obtenidos en cada una de estas corridas, específicamente de aquellos parámetros que fueron considerados como los más representativos en el paso 2. De igual manera en este paso es donde se pueden realizar algunos cambios al modelo del sistema actual en busca de generar datos para analizar al sistema bajo esas modificaciones.
9. Analizar los resultados del modelo actual y de sus alternativas: Se analizan los datos generados por las corridas de simulación, con la intención de entender de mejor manera al sistema real, así como buscar posibles áreas de mejora. De igual manera se analizan aquellos datos obtenidos de los modelos alternativos, esto con la finalidad de comprobar si los cambios pueden beneficiar al sistema real.
10. Documentar y presentar conclusiones: Realizar un reporte de todo lo realizado durante el desarrollo del proyecto. De igual manera, se deben presentar los resultados obtenidos de los modelos generados, mediante gráficas y videos de la simulación, esto con el enfoque de mejora para el sistema y los impactos encontrados en las alternativas propuestas.

Con la intención de entender de mejor manera la metodología presentada, se muestra un diagrama de flujo con todos los pasos y puntos de decisión que se deben tomar en cuenta dentro de esta metodología. En la Figura 3.1 se puede consultar este diagrama.

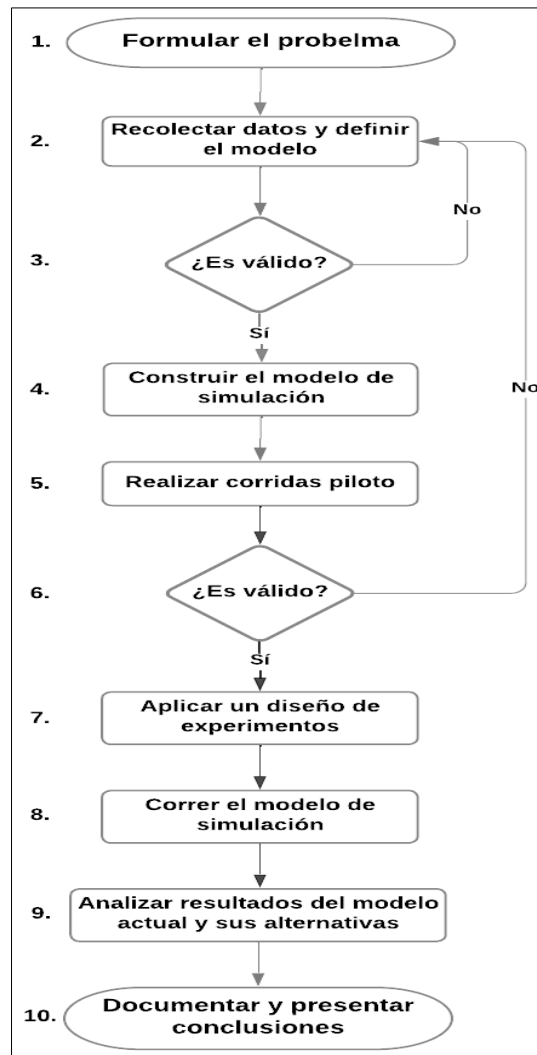


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología de simulación.

3.1 Formular el problema

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un modelo de simulación que logre representar adecuadamente el área de templado de la empresa. Esto con la intención de tener un sistema virtual que permita conocer a profundidad el desempeño del área e incluso usarlo como un entorno de pruebas para conocer que pasaría al realizar modificaciones, con el objetivo de incrementar su productividad. Para ello será utilizado el software Simio.

3.2 Recolección de los datos

En este paso se realiza la recolección de los datos, los cuales, dadas las especificaciones del proyecto, son los tiempos de procesamiento en cada uno de los procesos que conforman al área. Para ello, se realizó una visita a la empresa y se llevó a cabo una toma de tiempos sobre un mismo modelo de vidrio; en cada proceso, a excepción del horno, fueron tomadas 15 observaciones. Estos datos fueron obtenidos con una aplicación de cronómetro del teléfono celular, guardados como archivo .csv y posteriormente exportados a Excel. Un ejemplo de ello es la Tabla 3.1 que contiene los datos del proceso de carga.

Tabla 3.1 Datos del proceso de carga.

Observación	Tiempo acumulado	Diferencia en segundos
1	00:45.3	—
2	01:55.4	70.11
3	02:28.5	33.18
4	03:01.2	32.6
5	03:34.9	33.73
6	04:10.3	35.4
7	04:49.5	39.15
8	05:29.0	39.52
9	06:10.1	41.07
10	06:58.5	48.45
11	07:48.1	49.59
12	08:28.2	40.09
13	09:06.5	38.28
14	09:45.9	39.37
15	10:24.9	39.03

Una vez obtenidos los datos necesarios, se procede al análisis de éstos, con la intención de determinar la distribución de probabilidad que sigue cada uno de los conjuntos de datos recabados. Para ello se hace uso de dos herramientas: Stat::Fit y Real Statistics, con las cuales se aplica una prueba de bondad de ajuste que permita conocer la distribución de los conjuntos mencionados. La prueba seleccionada es llamada Anderson-Darling.

Dado que se tienen varios procesos por analizar, se mostrarán los pasos realizados para los primeros dos procesos productivos, para posteriormente mostrar la tabla resumen con todas las distribuciones obtenidas.

3.2.1 Obtención de la distribución del proceso de carga

Para iniciar la obtención de la distribución, se toman los datos correspondientes al proceso de carga y son ingresados al software Stat::Fit, para posteriormente elegir la opción de Fit>Autofit, tal y como se muestra en la Figura 3.2.

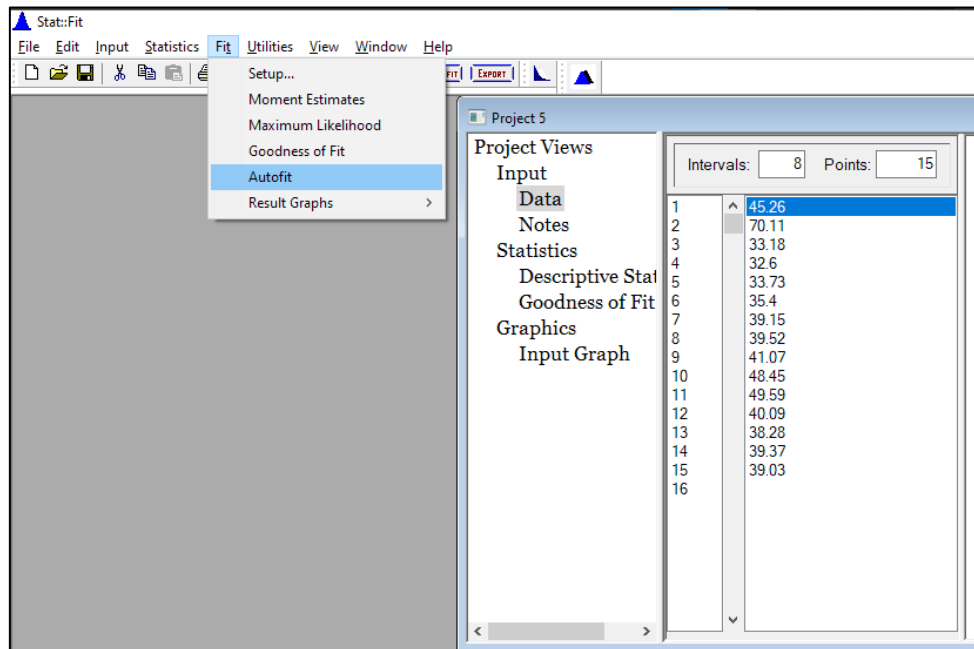


Figura 3.2 Tratamiento de los datos del área de carga.

Tras ello se despliega una ventana de configuración, donde se marca la casilla para la distribución continua, con el límite asignado automáticamente por el software y se obtienen los resultados de la prueba que se muestran en la Figura 3.3.

The screenshot shows the 'Autofit of Distributions' results table in the Stat::Fit software. The table displays the results of the fit for three distributions: Exponential, Lognormal, and Uniform. The results are as follows:

distribution	rank	acceptance	aicc prob
Exponential(32, 9.66)	100	do not reject	1
Lognormal(32, 1.83, 1.05)	58.1	do not reject	0.309
Uniform(32, 70.1)	0	reject	0.00105

Figura 3.3 Resultados de la prueba para el área de carga.

Con esto se obtiene que las dos posibles distribuciones son la Exponencial y la Lognormal. Con la intención de complementar este resultado, se genera una gráfica que ayude a entender de mejor manera el comportamiento de los datos y que tanto se adaptan a las distribuciones sugeridas por el software. Esta gráfica se muestra en la Figura 3.4.

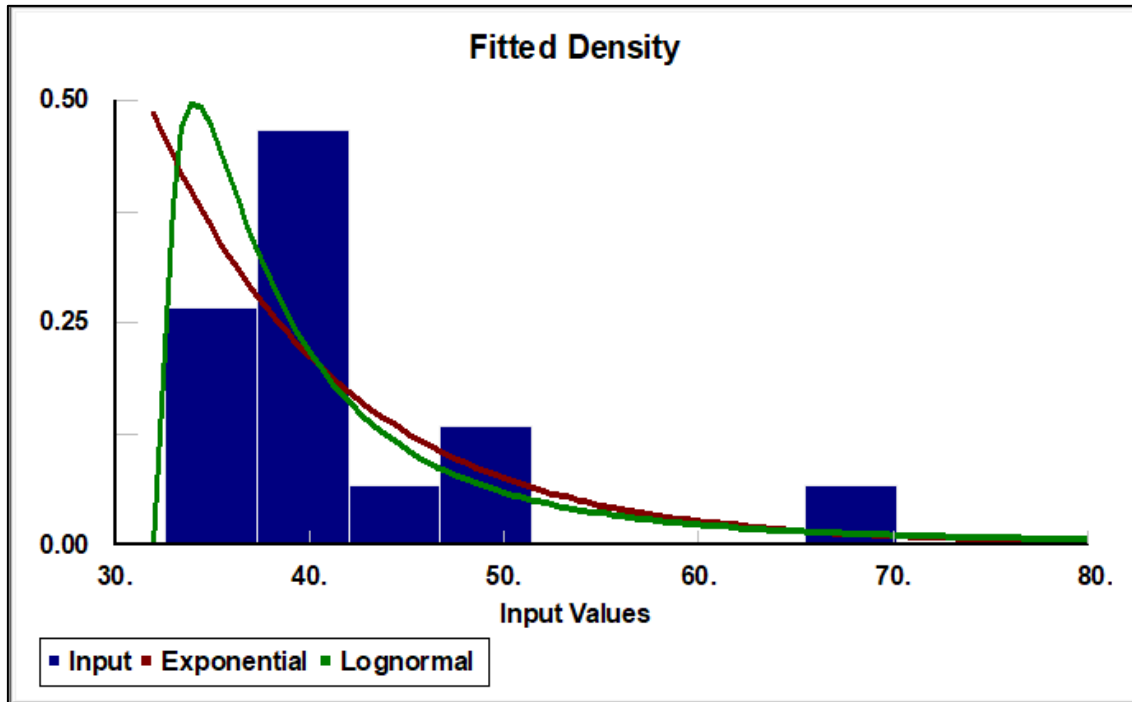


Figura 3.4 Gráfica de la distribución para el área de carga.

Al analizar la Figura 3.4, se observa que la distribución Lognormal se ajusta adecuadamente a los datos, por lo cual se realiza un siguiente análisis con el software Real Statistics, el cual es una extensión de Excel. Para ello se ejecuta el complemento de Real Statistics, se elige una prueba de bondad de ajuste y se seleccionan los datos, en este caso se realizan las pruebas de manera individual para la distribución Exponencial y Lognormal.

La Figura 3.5 contiene los resultados obtenidos, en donde se observa que, basándose en el estadístico de Anderson Darling, los datos se ajustan de mejor manera a la distribución Lognormal, por lo cual ésta será la distribución por utilizar para el proceso de carga.

Anderson-Darling Test	
Alpha	0.05
Distrib	Expon
Method	MLE
AD stat	
p-value	5.52080638
crit value	< 0.0025
Anderson-Darling Test	
Alpha	0.05
Distrib	Lognorm
Method	MLE
AD stat	
p-value	0.76218995
crit value	0.04750895
Anderson-Darling Test	
Alpha	0.05
Distrib	Lognorm
Method	MLE
AD stat	
p-value	0.76218995
crit value	0.04750895

Figura 3.5 Uso de Real Statistics para el área de carga.

3.2.2 Obtención de la distribución del proceso de corte

Se realiza el mismo procedimiento explicado en el anterior punto para obtener la distribución de los datos del proceso de corte. Cabe mencionar que tanto del proceso de corte, desprendimiento y pulido presentan tiempos iguales debido a que éstos se realizan de manera simultánea. En la Figura 3.6 se muestra un resumen de la prueba de bondad de ajuste.

goodness of fit		
data points	15	
estimates	maximum likelihood estimates	
accuracy of fit	-5.52e+190	
level of significance	0.05	
summary		
distribution	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling
Exponential	0.4	3.07
Lognormal	0.287	1
Normal	0.204	0.517
Uniform	0.386	1.84

Figura 3.6 Prueba de bondad de ajuste para el proceso de corte.

Basándose en el estadístico de Anderson Darling, la distribución normal es la que presenta el mejor resultado, para complementar esta decisión se muestra la gráfica generada por el software Stat:Fit, el cual se presenta en la Figura 3.7.

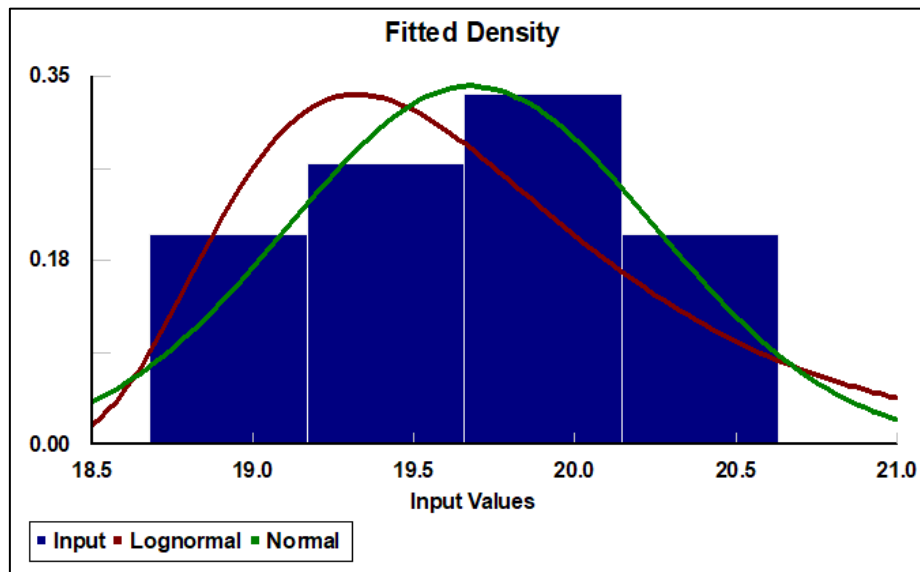


Figura 3.7 Gráfica de la distribución para el proceso de corte.

Con lo cual se logra concluir que el área de corte sigue una distribución Normal dado que tanto estadísticamente como gráficamente es la distribución que mejor explica los datos.

3.2.3 Obtención de distribuciones empíricas

Tras el análisis de los datos obtenidos de los procesos, se encontró que algunos procesos no parecían seguir alguna distribución conocida, o al menos no de manera aceptable, por lo cual es necesario recurrir a una distribución empírica o también llamada distribución libre. Para realizar esto, es necesario realizar una tabla de frecuencias en donde se obtengan los límites de clase y la probabilidad para cada uno de los límites. En la Tabla 3.2 se muestra una de estas tablas de frecuencias para los tiempos de barrenado en segundos.

Tabla 3.2 Tabla de frecuencias para los tiempos de barrenado en segundos.

Clase	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Frecuencia	Frec. Acum.	Prob.	Prob. Acum
1	10.63	12.89	9	9	0.6	0.6
2	12.90	15.16	4	13	0.26667	0.86667
3	15.17	17.43	1	14	0.66667	0.93334
4	17.44	19.70	1	15	0.66667	1

De esta manera se obtienen los datos necesarios para la distribución empírica, sin embargo, aún es necesario ingresarla en el software Simio, el cual cuenta con una opción para ingresar este tipo de distribución mediante la opción *Random.Continuous()* en donde se ingresan los siguientes datos: (10.63,0,12.89,0.6,15.16,0.866,17.43,0.933,19.7,1).

Este mismo proceso se repite para los demás procesos que requieren de la distribución empírica. En la Figura 3.8 se muestra como fue ingresada esta distribución en Simio.

► Transfer-In Time	0.0
Process Type	Specific Time
▲ Processing Time	Random.Continuous(10.63,0,12.89,0.6,15.16,0.866...
Units	Seconds
Off Shift Rule	Suspend Processing
► Other Processing Options	

Figura 3.8 Distribución empírica en Simio.

3.2.4 Resumen de las distribuciones de los procesos

Se realizó el análisis de los datos para cada uno de los procesos con la finalidad de conocer su distribución, en el caso del proceso de templado se utiliza una distribución triangular debido a las características de este proceso, obteniendo el valor mínimo, máximo y moda de la experiencia del personal. En la Tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos respecto a las distribuciones y los parámetros correspondientes a todos los procesos del sistema completo. Cabe mencionar que los datos representan segundos.

Tabla 3.3 Distribuciones de probabilidad de los tiempos de los procesos del sistema a simular (segundos).

Proceso	Distribución	Parámetros
Carga	Lognormal	(3.71007, 0.1948)
Corte	Normal	(19.67867, 0.59106)
Desprendimiento	Normal	(19.67867, 0.59106)
Pulido	Normal	(19.67867, 0.59106)
Barrenado	Empírica	(10.63, 0, 12.89, 0.6, 15.16, 0.866, 17.43, 0.933, 19.7, 1)
Lavado	Normal	(18.46933, 0.65996)
Volteado	Normal	(4.84667, 0.24746)
Impresión	Empírica	(1.03, 0, 1.97, 0.066, 2.92, 0.066, 3.87, 0.4, 4.82, 1)
Sistema de visión	Lognormal	(2.89374, 0.01514)
Templado	Triangular	(120, 150, 180)
Inspección	Normal	(17.89733, 3.31853)
Empaque	Lognormal	(2.54, 0.15442)

3.3 Validación del modelo conceptual

Como parte de la validación del modelo, se realizó un esbozo del modelo (sin detalles) del área de la empresa, con el cual se busca identificar los procesos que se realizan, así como cada una de las máquinas. Esto es con la idea de dar una introducción al desarrollo formal del modelo y con la intención de comprobar si se está realizando de manera correcta el desarrollo del proyecto. En la Figura 3.9 se presenta el esbozo de modelo en su versión de dos dimensiones, mientras que en la Figura 3.10 se muestra en tres dimensiones.

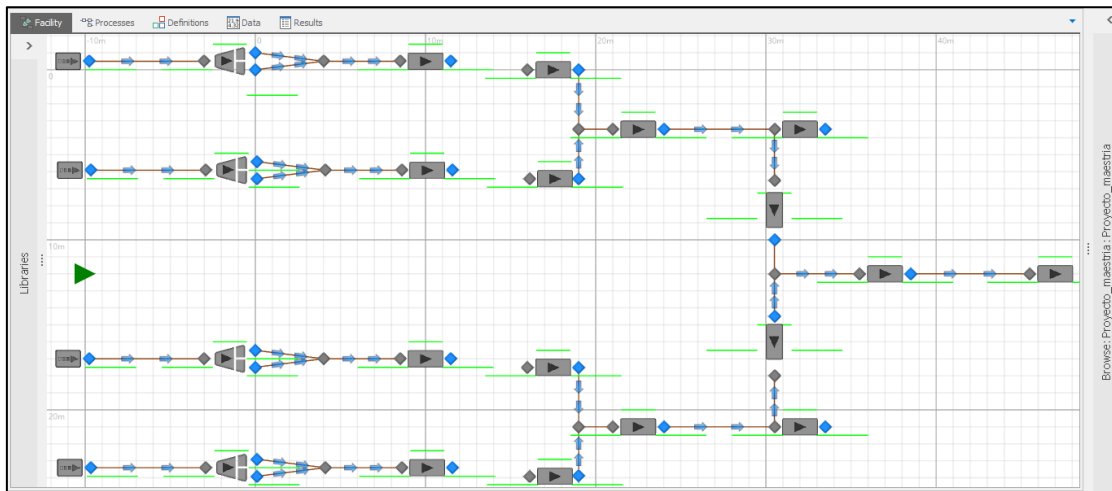


Figura 3.9 Vista 2D del esbozo del modelo.

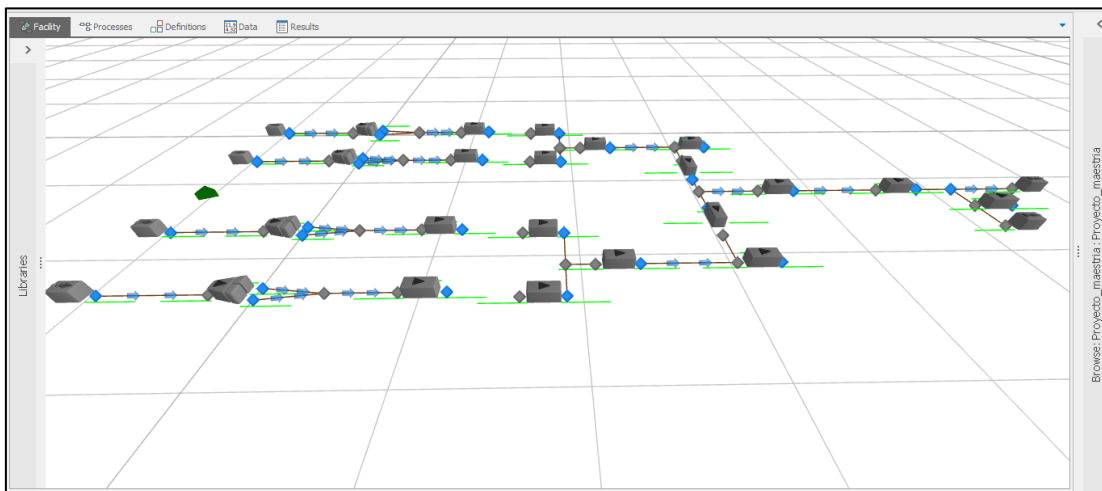


Figura 3.10 Vista 3D del esbozo del modelo.

En este punto es necesario realizar una comparación entre el layout del área (Figura 1.1) con el esbozo del modelo realizado (Figura 3.9 y Figura 3.10), así como preguntar al personal de la empresa si el esbozo realizado da una idea adecuada del modelo. De igual manera es necesario realizar una revisión de las distribuciones para corroborar que exista congruencia entre los tiempos de muestra obtenidos y el comportamiento de la distribución obtenida mediante los softwares.

Tras realizar las comparaciones y preguntar al personal sobre la similitud entre el esbozo y el área, se obtiene que realmente existe un parecido, por lo que es posible continuar con el modelo.

3.4 Construir el modelo de simulación

Una vez que se comprobado que el modelo planteado se asemeja al área de la empresa y se tienen las distribuciones de cada uno de sus procesos, es posible comenzar con el desarrollo formal del modelo de simulación, antes esbozo del modelo. Para ello, se aplican símbolos que ofrezcan un buen parecido con lo que se tiene realmente en la empresa, así como se agrega un vehículo que represente al robot en cada uno de los procesos donde éste es utilizado.

Los cambios aplicados al modelo se presentan en 2D en la Figura 3.11 y en 3D en la Figura 3.12, junto con la Figura 3.13.

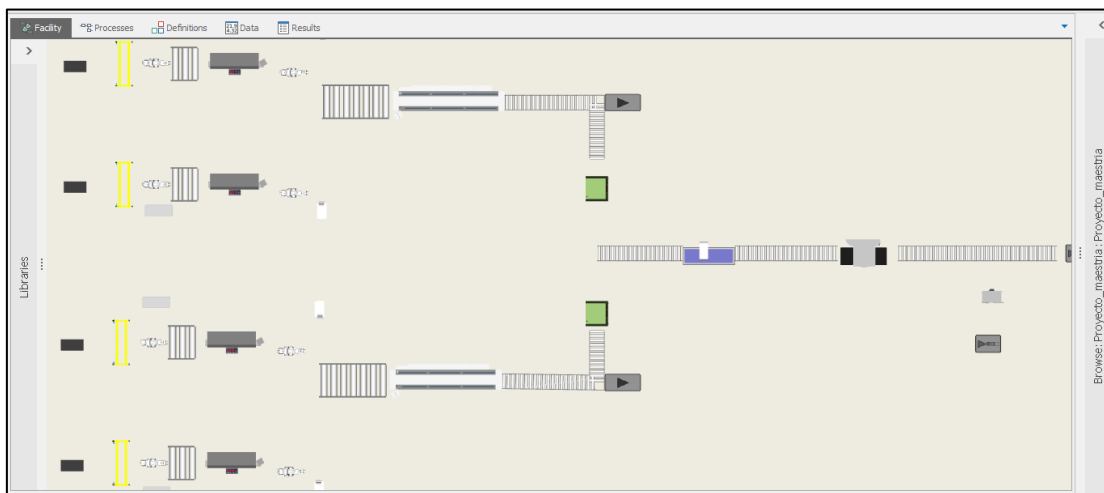


Figura 3.11 Vista 2D del modelo.

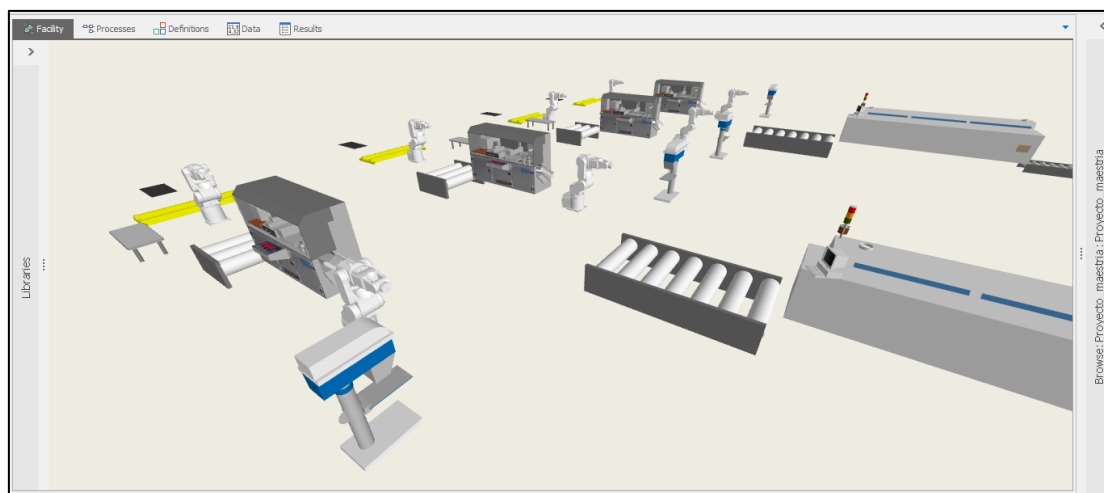


Figura 3.12 Vista 3D del modelo, parte inicial del área.

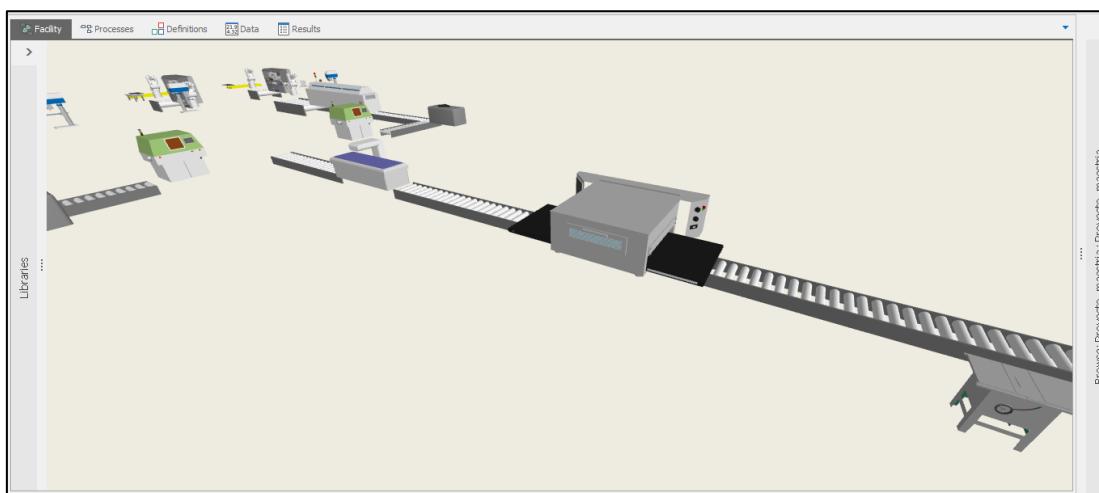


Figura 3.13 Vista 3D del modelo parte final del área.

3.4.1 Asignar las distribuciones

Una vez que se tiene estructurado el modelo con el que se piensa desarrollar el proyecto, se toman las distribuciones obtenidas anteriormente para ser ingresadas en Simio en sus objetos respectivos, esto con la intención de que el modelo comience a mostrar un comportamiento lo más parecido al sistema real. En la Figura 3.14 y Figura 3.15 se presentan 2 ejemplos de cómo se ingresaron estas distribuciones.

▶ Transfer-In Time	0.0
Process Type	Specific Time
▲ Processing Time	Random.Normal(19.67867,0.59106)
Units	Seconds
Off Shift Rule	Suspend Processing
▶ Other Processing Options	

Figura 3.14 Distribución Normal en Simio.

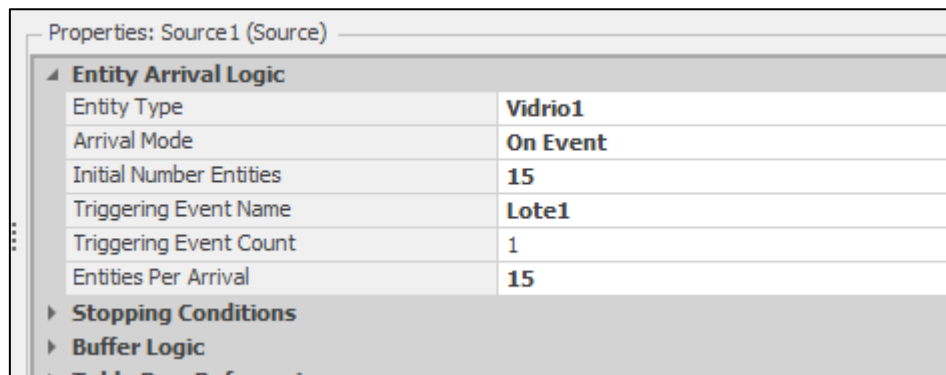
▶ Transfer-In Time	0.0
Process Type	Specific Time
▲ Processing Time	Random.Lognormal(3.71007 ,0.1948)
Units	Seconds
Off Shift Rule	Suspend Processing
▶ Other Processing Options	

Figura 3.15 Distribución Log normal en Simio.

3.4.2 Agregar reaprovisionamiento

El área de templado tiene como primer proceso el catalogado como Carga, por consiguiente, en este proceso es donde se requiere el material (vidrio) que será transformado durante todo el proceso. En este caso se tiene una estructura de donde el robot toma el vidrio que lleva hacia el primer proceso, esta estructura tiene una capacidad limitada de vidrios, por lo que requiere de ser reabastecida constantemente para evitar faltante de material. Este reaprovisionamiento se realiza mediante un montacargas que toma lotes de vidrio de una tarima y los coloca en dicha estructura. Para modelar este reaprovisionamiento se agregan nuevos objetos al modelo, así como procesos, eventos y elementos que permitan simular toda esta acción.

Para ello se requiere configurar el *source* a modo que sus llegadas estén condicionadas a un evento, es decir, que cuando ocurra una acción en específico ésta accione la llegada de nuevo material. En la Figura 3.16 se muestra la configuración dada al *source*.



Properties: Source1 (Source)	
Entity Arrival Logic	
Entity Type	Vidrio1
Arrival Mode	On Event
Initial Number Entities	15
Triggering Event Name	Lote1
Triggering Event Count	1
Entities Per Arrival	15
Stopping Conditions	
Buffer Logic	

Figura 3.16 Configuración del *source*.

Para lograr que el evento se cumpla, se hace uso de los procesos en Simio, de manera resumida lo que se hace es comprobar si en la estructura donde se coloca el material, aún existen piezas de cristal, por lo cual se requiere de un *decide* para que, en caso de ser verdadero el hecho de no existir más piezas, se generen nuevas piezas que en este caso es un lote de 15; en caso de contrario en el cual aún se tengan piezas, no habrá llegada de nuevas piezas. La Figura 3.17 contiene la configuración utilizada en dicho proceso.

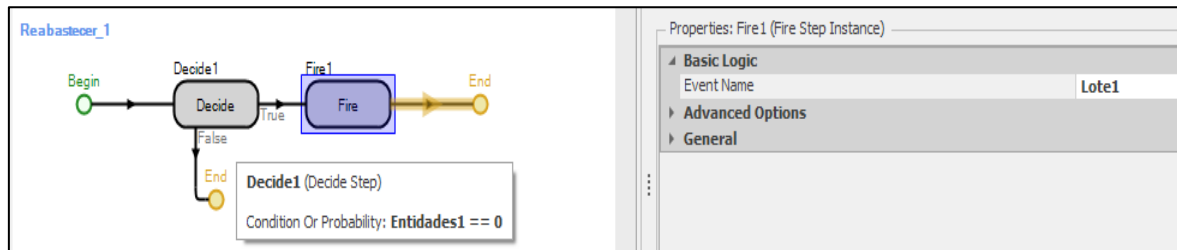


Figura 3.17 Proceso para reabastecer material.

Finalmente se agregan los procesos en donde se requiere que sean ejecutados, se unen los objetos, se agrega el vehículo a su vez que se configura para que su nodo casa sea el *source* y lleve todas las entidades en un solo viaje hasta el lugar donde se almacenan. Para una mejor presentación se da forma de tarima al *source* y al *vehicle* se le asigna el de un montacargas. El resultado final se presenta en la Figura 3.18.



Figura 3.18 Área del montacarga, tarima y carga

3.4.3 Movimiento del brazo robótico

Posteriormente, se requiere que un brazo robótico tome una pieza, la transporte hacia una mesa, donde divide en dos partes iguales al vidrio, generando así dos piezas de menor tamaño, una vez termina esta actividad el robot toma ambas piezas llevándolas hacia un transportador y sólo hasta que ha soltado ambas piezas cortadas vuelve para recoger la siguiente pieza completa. Para lograr esto se hace uso de las configuraciones tanto del objeto que representa al proceso, así como del vehículo que representa al brazo robótico, puesto que si no se realiza esto el robot regresaría a tomar entidades sin haber dejado las demás en el transportador final.

Lo que se realiza es un cambio en las configuraciones que le indican al robot (*vehicle*) en qué momento está libre y en qué momento está siendo ocupado inclusive cuando esté esperando las piezas. Esto se realiza dentro del objeto de Simio llamado *separator* y la configuración realizada para desempeñar esta actividad se muestra en la Figura 3.19.

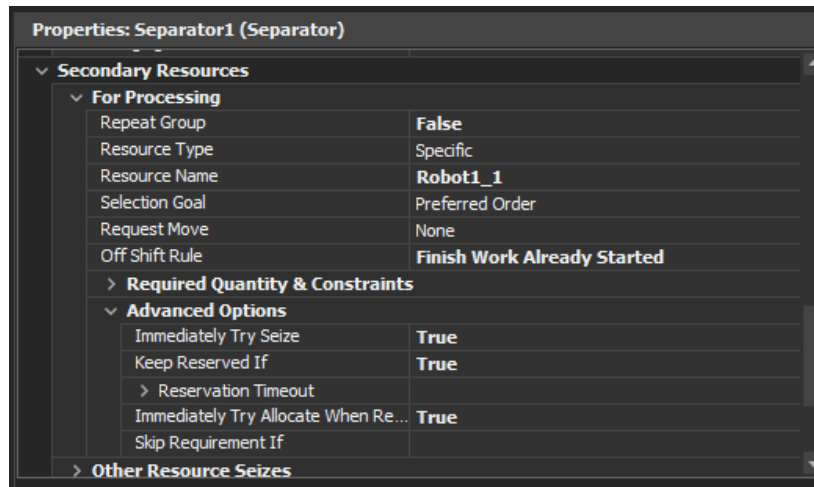


Figura 3.19 Configuración para hacer esperar al robot.

Con estas configuraciones se puede realizar la actividad conocida como carga en el área de templado de la empresa en la cual el brazo robótico toma una pieza, las lleva a la mesa para cortarla en dos partes y llevarlas hacia la banda transportadora donde seguirán el proceso. Cabe mencionar que algunos procesos adelante se tiene otro brazo robótico que realiza una acción parecida, sólo que en esta ocasión toma una pieza, la lleva hacia un área donde la barrena y se mantiene como una sola pieza, que posteriormente toma para llevarla a una banda transportadora, soltarla y el brazo regresa por otra pieza. Dado que es una acción similar, se repite el proceso; sin embargo, en este caso las piezas tomadas por el segundo brazo robótico provienen de la banda transportadora de salida de uno de los procesos por lo cual se agrega dicha banda y se sigue una configuración parecida a la ya mostrada en la Figura 3.19 para el movimiento del brazo.

La Figura 3.20 muestra como se ve el área donde suceden las actividades del segundo brazo robótico.

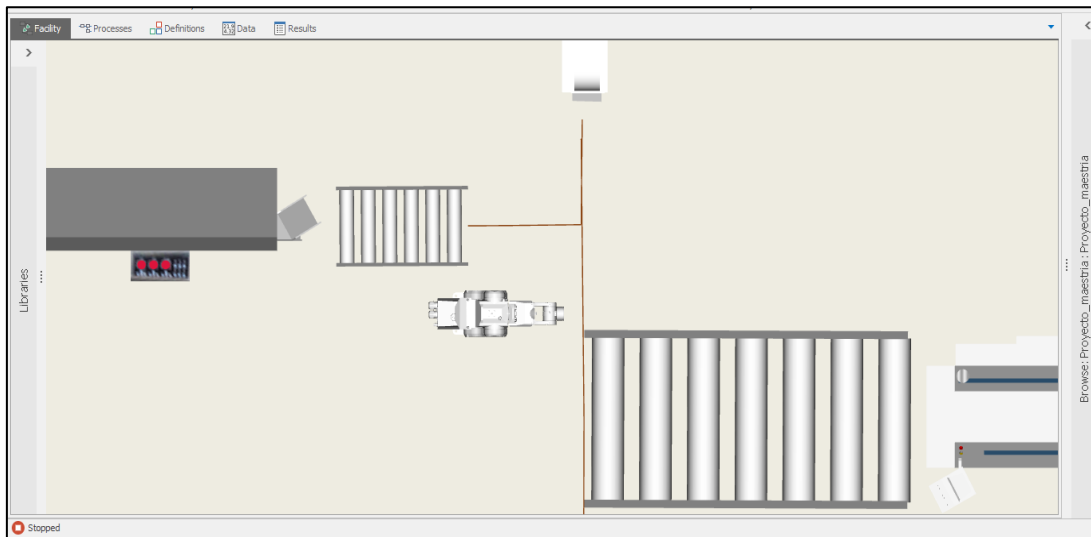


Figura 3.20 Área de barrenado y bandas transportadoras.

3.4.4 Cambio del tamaño de la entidad

De igual manera se ha modificado el tamaño de las entidades antes de salir del primer proceso, esto debido a que en el área de templado se tiene una pieza de vidrio como materia prima, la cual es tomada por el robot, colocada en una mesa y cortada en dos partes por la mitad. Las dos nuevas entidades son generadas mediante un *Separator* y la modificación del tamaño mediante las opciones del *State Assignments* de este objeto (*Separator*). En la Figura 3.21 se muestran los ajustes realizados.

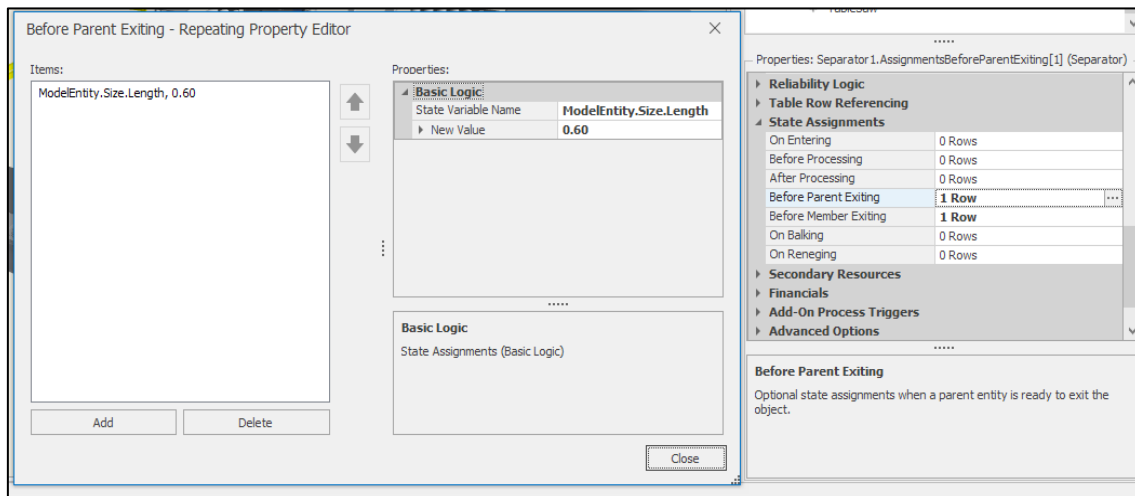


Figura 3.21 Modificación del tamaño de la entidad.

La prueba de que esta reducción de tamaño realmente es aplicada, se puede apreciar en la Figura 3.22, donde en la parte superior con referencia al robot se ve la entidad original, mientras que en la parte derecha con referencia al robot se muestran dos entidades más pequeñas esperando a ser procesadas.

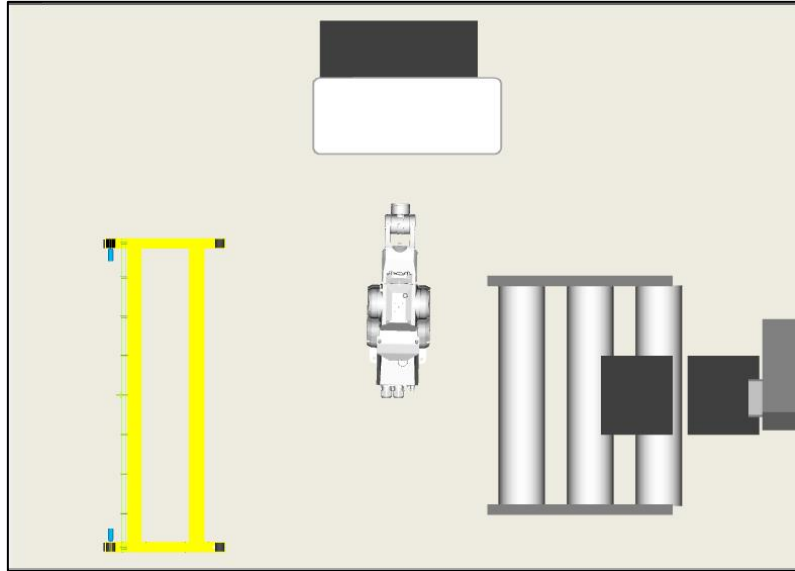


Figura 3.22 Cambio de tamaño de la entidad.

3.4.5 Resumen de objetos de Simio usados para el modelo de simulación

Como se ha explicado en los puntos anteriores, se han utilizados distintos objetos y funciones proporcionadas por Simio para configurar al modelo de simulación de tal manera que su comportamiento se asemeje al sistema real. Con la intención de resumir la construcción del modelo de simulación se presenta la Tabla 3.4, que contiene la cantidad de los objetos y algunas herramientas utilizadas en el presente modelo, así como una breve descripción de la función que desempeñaron en el modelo de simulación.

Tabla 3.4 Resumen de objetos de Simio usados para el modelo de simulación del área de templado.

Objeto	Cantidad	Descripción
Source	4	Crean las piezas, en este caso vidrios
Sink	4	Destruye las piezas, en este caso vidrios
Server	31	Representan a los procesos del área y para acumular algunas piezas.
Separator	4	Representan un proceso en especial donde una pieza de vidrio es dividida por la mitad
Vehicle	12	Actúan como brazos robóticos para transportar piezas entre los procesos
Worker	4	Realizan el último proceso de empacar las piezas y sacarlas del sistema
BasicNode	57	Sirven como intermediarios para conectar procesos, en su mayoría como entradas
TransferNode	62	Sus configuraciones permiten redirigir las piezas y llamar a los Vehicles o Workers
Connector	2	Unen de manera inmediata (tiempo 0) dos nodos
TimePath	71	Representan bandas transportadoras por donde circulan las piezas con tiempo específico
Processes	42	Realizan configuraciones especiales que permiten al modelo actuar de mejor manera

3.4.6 Ambientar el modelo

Como parte de la elaboración del presente modelo no sólo se contempla la parte lógica, que sin duda es la más importante para que el modelo pueda representar adecuadamente al sistema real, sino que también es necesario tomar en cuenta la parte estética de los objetos y el ambiente del área. Esta ambientación se considera de importancia puesto que este proyecto será presentado ante directivos de la empresa y el tener un modelo visualmente parecido al área real les ayudará a familiarizarse de mejor manera, logrando un mayor impacto.

En este aspecto, Simio ofrece algunas herramientas para agregar objetos que pueden ser manipulados para representar paredes, de igual manera algunos objetos estáticos que pueden representar autos, personas, mesas, árboles y distintas cosas más; así mismo en los objetos que representan los procesos pueden agregarse diseños personalizados.

Tomando estas opciones de diseño estético ofrecidas por Simio se ha dedicado cierto tiempo a modificar el ambiente del modelo llevándolo a ser visualmente parecido al área real de la empresa. El diseño dado puede verse en las Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25 y Figura 3.26.

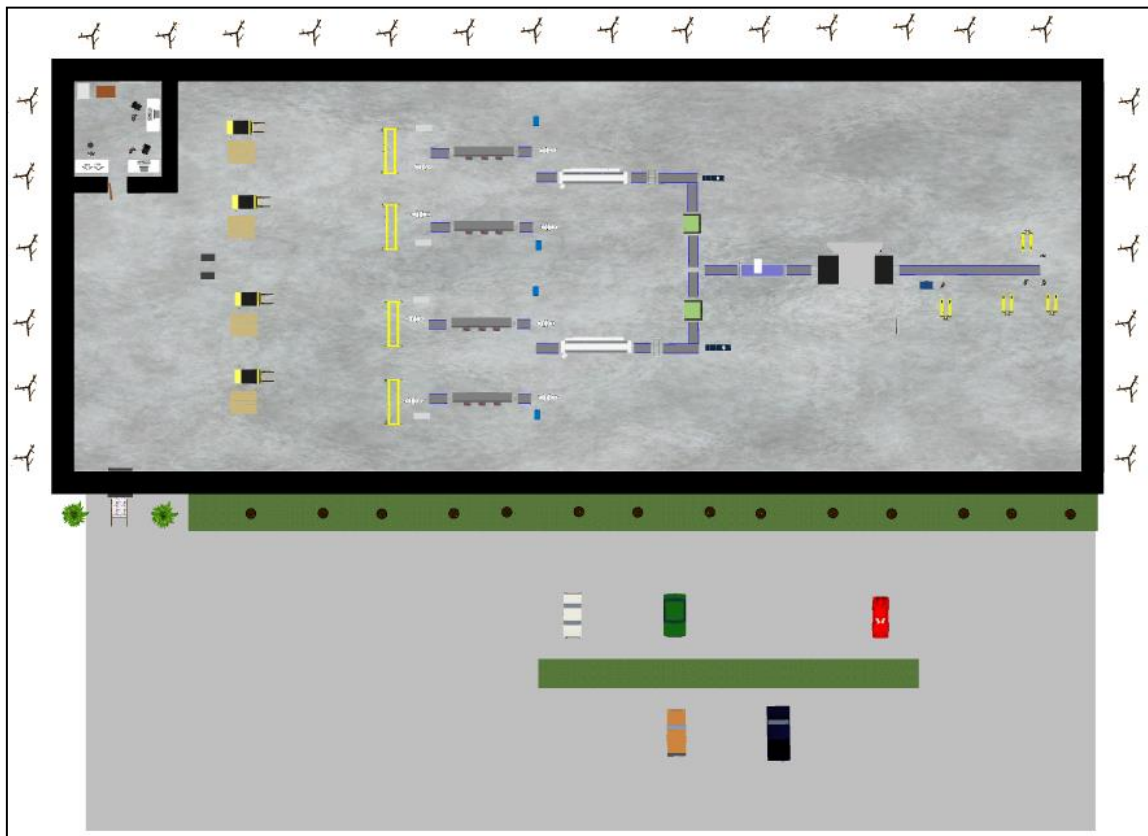


Figura 3.23 Vista general en 2D del modelo con diseño.

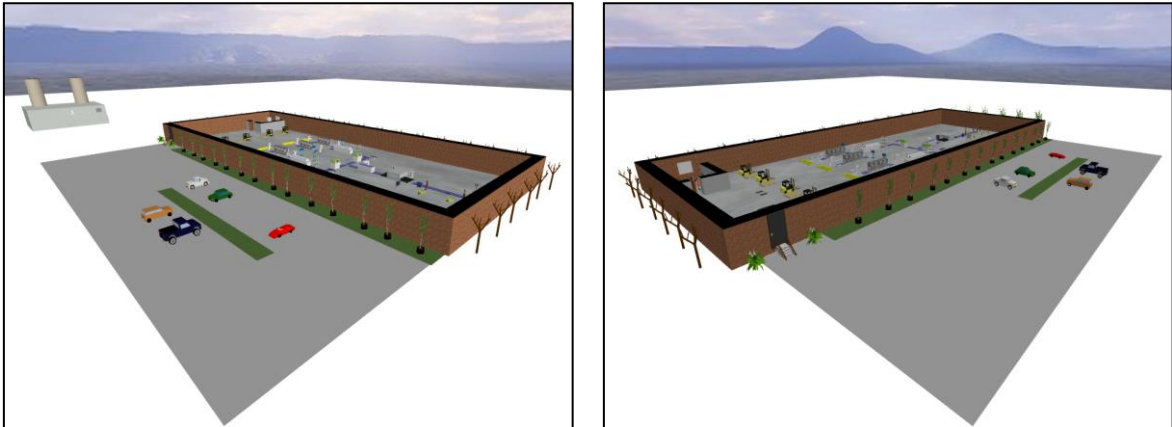


Figura 3.24 Vista general en 3D del modelo con diseño.

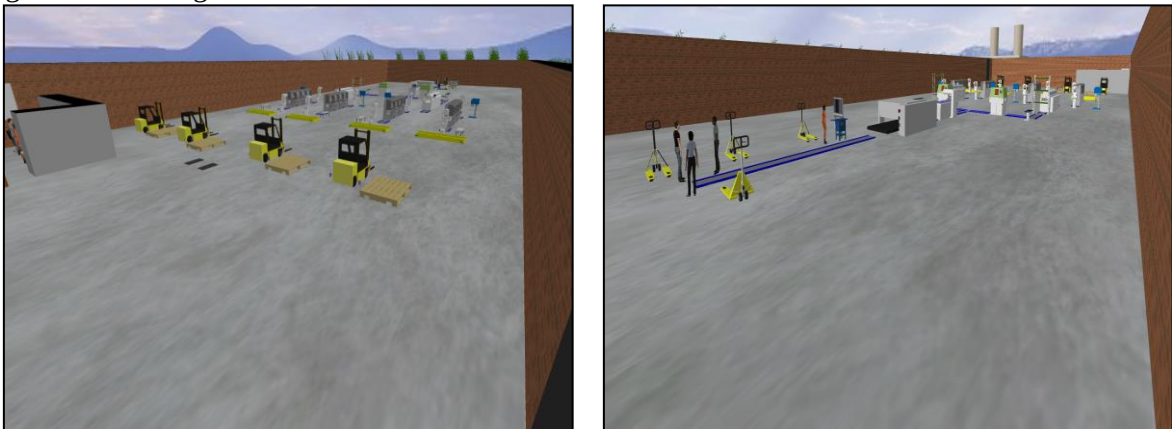


Figura 3.25 Vista interna en 3D del modelo con diseño.

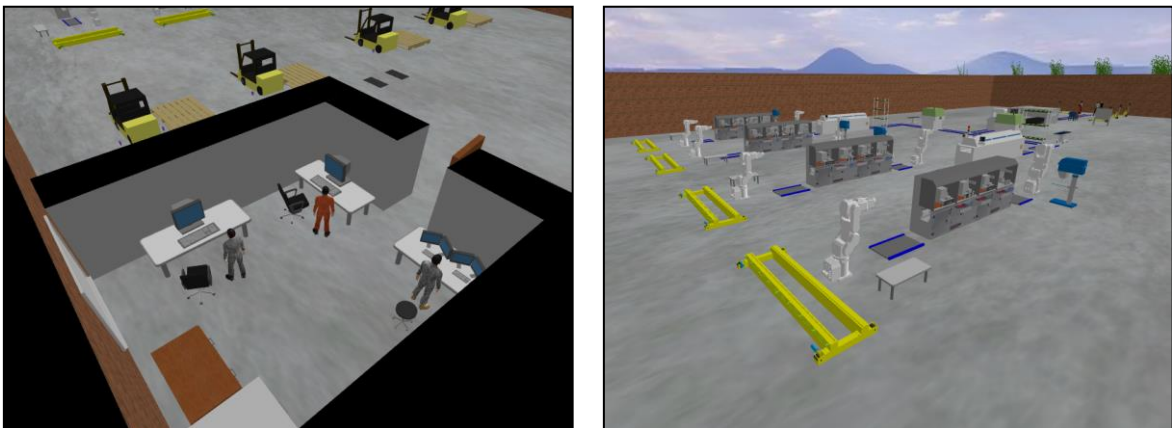


Figura 3.26 Vista de algunas áreas en 3D del modelo con diseño.

3.5 Corridas piloto

Una vez que el modelo ha sido tratado en la parte lógica de agregar los objetos y procesos necesarios para simular la lógica del sistema, se han agregado las distribuciones obtenidas en base a los datos recabados directamente del sistema real y ha ambientado al grado de parecerse gráficamente al área de la empresa, es necesario correr el modelo en busca de errores durante la simulación que pudieran detener al modelo. En el caso de que el modelo funcione bien y no se presente ningún error, se prosigue a generar datos con el mismo, es decir, se realizarán distintas corridas de simulación del modelo a las cuales se les llama corridas piloto, esto con la intención de analizar cómo se comportan los datos, lo cual servirá para realizar cálculos en pasos posteriores al presente.

En este caso se realizan 10 corridas piloto, modificando en cada una de ellas una parte en Simio que sirve para cambiar la semilla inicial con la cual se ejecuta la simulación, esto con la intención de agregar aleatoriedad y poner a prueba al modelo bajo condiciones iniciales distintas. Cada replicación tuvo una duración de 18 horas.

En estas 10 corridas piloto podrían estudiarse una gran cantidad de datos generados por el software, a pesar de ello, se ha elegido enfocarse específicamente en dos medidas de desempeño de interés: tiempo de ciclo en segundos y piezas producidas. Cabe mencionar que para el caso del tiempo de ciclo se usó la Ec. 2.3. En la Figura 3.27 se muestra el resultado de una corrida piloto del modelo.

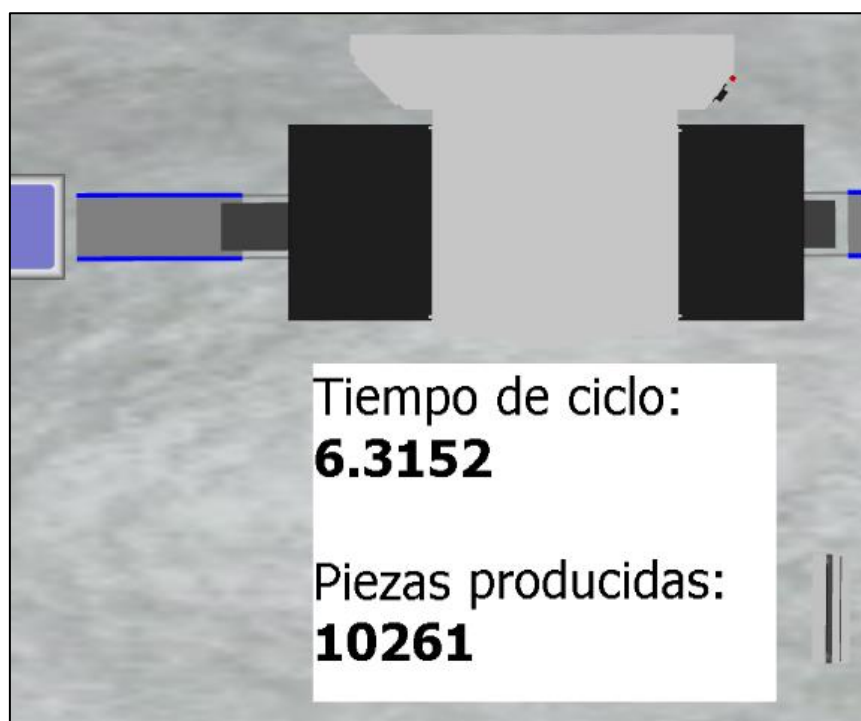


Figura 3.27 Muestra de una corrida piloto.

Una vez realizadas las 10 corridas piloto del modelo de simulación, se ha obtenido la Tabla 3.5 mostrada a continuación.

Tabla 3.5 Datos de las corridas piloto.

Corrida	Tiempo de ciclo en segundos	Piezas producidas
1	6.3158	10260
2	6.3152	10261
3	6.3146	10262
4	6.3146	10262
5	6.3183	10256
6	6.3164	10259
7	6.3183	10256
8	6.3158	10260
9	6.3146	10262
10	6.3152	10261

3.6 Prueba t-pareada

Basándose en los datos obtenidos del sistema real al inicio de la metodología, se realiza una comparación estadística contra los datos generados por el modelo de simulación. Esta comparación se realiza con la intención de probar si el modelo está generando resultados estadísticamente parecidos a los observados, a pesar de que numéricamente puedan ser distintos. Para ello, se registran los datos obtenidos inicialmente y los datos de las corridas piloto dentro de una plantilla de Excel que contiene las fórmulas necesarias para conseguir aplicar la prueba t-pareada, con esta prueba se busca obtener un intervalo, el cual si contiene al cero significa que el modelo sí es significativo, es decir que sí representa al sistema real; en caso de no incluir al cero, el modelo realizado no representa al sistema real.

La prueba t-pareada se aplica comparando los datos de las corridas piloto del modelo de simulación contra los datos del sistema real, siendo las medidas de desempeño a comparar el tiempo de ciclo y las piezas producidas. La Figura 3.28 contiene los datos comparados para el tiempo de ciclo en segundos.

N° de muestras	10					
Consecutivo	Tiempo simulado	Tiempo real	Corridas	X_j	Y_j	Z_j
1	6.3158	6.3085	1	6.3158	6.3085	0.0073
2	6.3152	6.3179	2	6.3152	6.3179	-0.0027
3	6.3146	6.3092	3	6.3146	6.3092	0.0054
4	6.3146	6.3125	4	6.3146	6.3125	0.0021
5	6.3183	6.3245	5	6.3183	6.3245	-0.0062
6	6.3164	6.3203	6	6.3164	6.3203	-0.0039
7	6.3183	6.3043	7	6.3183	6.3043	0.014
8	6.3158	6.3122	8	6.3158	6.3122	0.0036
9	6.3146	6.3282	9	6.3146	6.3282	-0.0136
10	6.3152	6.3171	10	6.3152	6.3171	-0.0019
						$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
						4.7E-05
						9.7E-06
						2.5E-05
						2.9E-06
						4.4E-05
						1.9E-05
						0.00018
						1E-05
						0.0002
						5.3E-06

Figura 3.28 Datos para prueba t-pareada del tiempo de ciclo en segundos.

Antes de continuar con los cálculos matemáticos es necesario establecer las siguientes hipótesis:

- H_0 : No existe diferencia significativa entre la media del tiempo de ciclo del sistema real y la media del tiempo de ciclo del modelo de simulación.
- H_1 : Existe diferencia significativa entre la media del tiempo de ciclo del sistema real y la media del tiempo de ciclo del modelo de simulación.

Posteriormente se calcula un intervalo de confianza utilizando la Ec. 3.1.

$$\bar{Z}_{10} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{Var}(\bar{Z}_n)} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Tras esto se procede a calcular el intervalo de confianza utilizando la Ec. 3.1, con ello se determinará si el modelo es válido o no, la Figura 3.29 presenta los cálculos realizados.

alfa	0.05			
Suma	63.1588	63.1547	0.0041	0.000544
Promedio	6.32	6.32	0.00	0.00
Prueba t	2.262	$\widehat{Var}[\bar{Z}_n]$	0.000	
Intervalo		-0.005	A	0.006

Figura 3.29 Intervalo de confianza de la prueba t-pareada para el tiempo de ciclo.

Tras lo cual se observa que se incluye al valor de 0 dentro del intervalo de confianza por lo que, con un 95% de confianza, se concluye que estadísticamente el modelo representa de forma adecuada al sistema real.

Se repite este proceso para las piezas producidas, mostrándose en esta ocasión únicamente la obtención del intervalo de confianza, éste se puede observar en la Figura 3.30.

alfa	0.05			
Suma	102599	102633	-34	314.4
Promedio	10259.90	10263.30	-3.40	31.44
Prueba t	2.262	$\widehat{Var}[\bar{Z}_n]$	3.176	
Intervalo		-7.431	A	0.631

Figura 3.30 Intervalo de confianza de la prueba t-pareada para las piezas producidas.

Al analizar este segundo intervalo de confianza es posible afirmar con un 95% de confianza que el modelo sí es válido y representa al sistema real adecuadamente dado que se incluye al 0.

3.7 Número óptimo de corridas

El realizar corridas de simulación puede resultar algo sencillo una vez que el modelo ha sido validado; sin embargo, esto puede resultar algo tedioso puesto que podrían hacerse demasiadas corridas innecesarias o, por el contrario, realizarse corridas muy por debajo de las necesarias

para obtener resultados confiables. Para evitar esta problemática se recurre a aplicar un diseño de experimentos y encontrar el número óptimo de corridas a simular. El número óptimo de corridas denominadas como $n^*\beta$ se obtiene con la siguiente ecuación (Ec. 3.2):

$$n^*(\beta) = \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde:

i = Número de corridas a probar

β = Error absoluto

α = Nivel de significancia

$1 - \alpha$ = Nivel de confianza

S^2n = Varianza de las corridas de la variable

t = Valor de tablas de la distribución t-student

n = Número de corridas piloto

Para desarrollar este punto se hace uso del software Excel en el cual se aplican los cálculos de la Ec. 3.2, en donde se cambia el valor de i hasta encontrar al número óptimo de corridas usando una $\beta=0.0005$ segundos. La Figura 3.31 muestra los resultados.

Consecutivo	Tiempo de ciclo en segundos
1	6.3158
2	6.3152
3	6.3146
4	6.3146
5	6.3183
6	6.3164
7	6.3183
8	6.3158
9	6.3146
10	6.3152
$\bar{x}$	6.31588
$S^2 n$	1.98178E-06
β	0.0005

Número óptimo de corridas	
i	33
alfa	0.05
t	2.036933343
Raíz	0.000245059
=	0.000499169
Se deben hacer las i replicaciones mencionadas	

Figura 3.31 Obtención del número óptimo de corridas.

Obteniendo así que el número óptimo de corridas para este modelo de simulación es de 33 replicaciones.

3.8 Correr el modelo de simulación

En este paso de la metodología de simulación se realiza la configuración del software para poder replicar el número óptimo de corridas una tras otra de manera automática, evitando tener que replicar una por una de manera manual. Esto es posible por medio de una herramienta ofrecida por Simio llamada Experimentos, donde se configura el número óptimo de corridas definido en la Figura 3.31, el cual es de 33 replicaciones, así como también se agregan como *responses* (variables de respuesta o de salida del modelo) las dos medidas de desempeño seleccionadas (tiempo de ciclo y piezas producidas). Todo esto es con la intención de que el software registre los resultados para las medidas de desempeño de cada una replicación en una misma casilla, es decir, un resumen de las 33 corridas, tal y como se muestra en la Figura 3.32. Cabe mencionar que nuevamente se ha configurado una duración de 18 horas para cada corrida de la simulación.

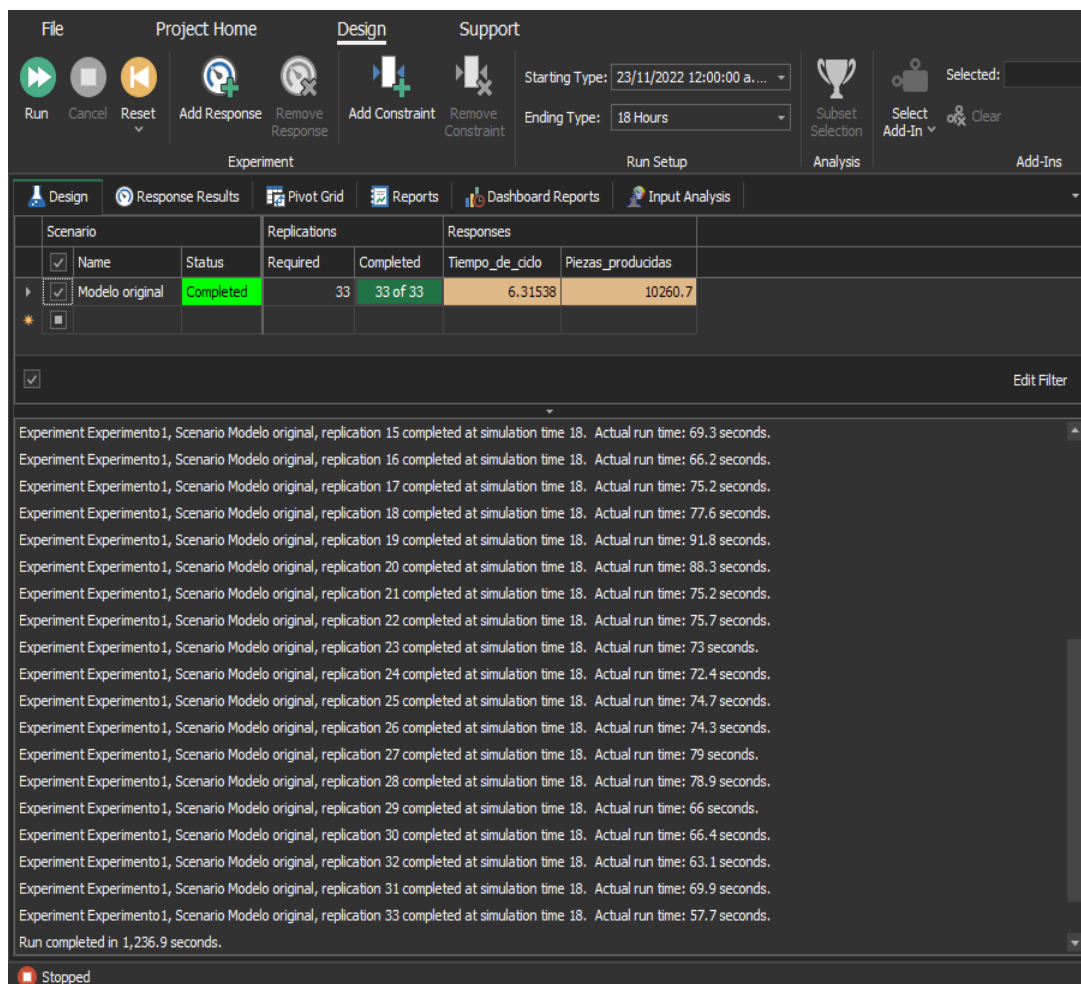


Figura 3.32 Simulación del número óptimo de corridas del modelo original.

Al observar la Figura 3.32 se obtienen los resultados de las dos medidas de desempeño, donde el tiempo de ciclo promedio es de 6.31538 segundos y las piezas producidas promedio es de 10260.7 piezas, en un tiempo de 18 horas. Para complementar estos resultados se hace uso de la Ec. 2.1 que sirve para calcular la productividad, en este caso se aplica dicha ecuación utilizando los datos generados por el modelo original, que son las piezas producidas y el insumo empleado son las horas corridas de la simulación. La Ec. 3.3 muestra el desarrollo de la fórmula con los datos del modelo original.

$$Productividad_{modelo_original} = \frac{10260.70 \text{ piezas producidas}}{18 \text{ horas simuladas}} = 570.04 \text{ piezas/hora} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Tras aplicar la fórmula de productividad se obtiene que el modelo original tiene la capacidad de producir 570.04 piezas por hora.

Estos datos son de suma importancia, sobre todo los que representan a las medidas de desempeño, debido a que a través del modelo de simulación se está representando al sistema real y servirán de referencia para ser comparados con los futuros resultados presentados en el Capítulo 4, donde serán propuestas las alternativas de mejora dentro del modelo.

3.9 Diagnóstico de la situación actual

Al tener un modelo de simulación que representa de manera adecuada al sistema real, es posible realizar cambios sobre el modelo con el objetivo de buscar la mejora del sistema. En este aspecto es necesario saber cómo identificar las partes donde el sistema está limitado, es decir que tiene una restricción o más conocido como cuello de botella. Para definir el concepto de cuello de botella se toma la definición dada por Casas (2010) “se refiere a diferentes actividades que disminuyen la velocidad de los procesos, incrementan los tiempos de espera y reducen la productividad, trayendo como consecuencia final el aumento en los costos”, mencionando que éste puede reducir la productividad del sistema e incluso da un ejemplo donde cierto proceso recibe más material del que puede procesar. Como complemento de esta definición se encuentra que Mans et al. (2008) mencionan que “los cuellos de botella pueden ser identificados buscando los lugares que presenten un tiempo de espera alto”.

Tomando en consideración lo anteriormente mencionado, es posible aplicar este mismo concepto al modelo de simulación en busca de aquella parte del sistema que presente un cuello de botella, es decir, el proceso que reciba más piezas de las que puede procesar y por consiguiente que retrase la producción.

En el área que está siendo simulada se ha encontrado un cuello de botella, de manera específica en el proceso llamado sistema de visión (SVisión), que es donde se juntan las salidas de dos procesos para convertirse en uno solo, haciendo que las entradas a este proceso sean constantes, pero no procesadas al mismo ritmo de llegada. Esto repercute directamente en dos objetos anteriores al sistema de visión llamados acumulador1 y acumulador2, los cuales almacenan hasta 20 piezas cada uno, en cierto punto éstos se llenan debido a que no se tiene un flujo continuo.

En la Figura 3.33 se muestra la parte del sistema descrita mediante la representación del modelo de simulación, donde se ha agregado una etiqueta que muestre cuantas piezas se han acumulado en ambos objetos. Nótese que ambos acumuladores se encuentran antes del proceso sistema de visión.

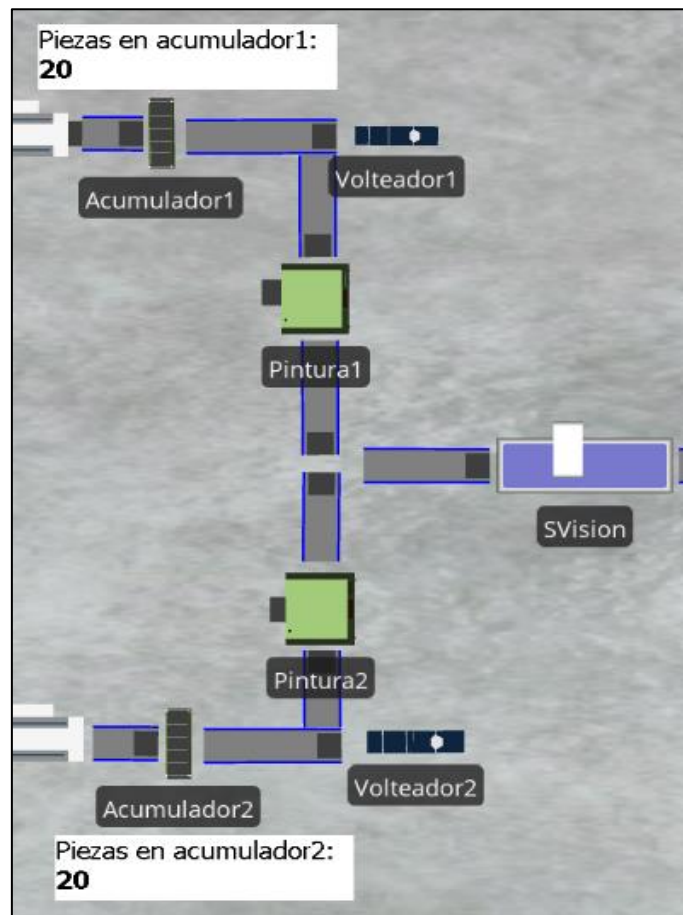


Figura 3.33 Identificación del cuello de botella por medio de acumuladores.

De esta manera se logra identificar el cuello de botella llamado sistema de visión, el cual causa que ambos acumuladores se llenen de piezas volviendo lento el flujo del proceso. Por lo tanto, se determina que el sistema de visión es un área de oportunidad que será analizada en el Capítulo 4 proponiendo alternativas de mejora.

Como parte de los resultados que presenta Simio se tienen algunos datos específicos sobre los objetos dentro del modelo, por ello se darán algunos datos como complemento y que pueden resultar de interés para complementar el estudio de la situación actual del proceso. Estos datos serán respecto a las máquinas anteriores al sistema de visión, que son las que desarrollan el proceso de pintura. En la Figura 3.34 se muestra una captura de todos los valores que ofrece Simio como resultados de la simulación para cada uno de los objetos contenidos en el modelo original.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲ ▼	Statistic ▲ ▼	Category ▲	Data Item ▲ ▼	Average Total
Server	Pintura1	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	11.7934
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	30.4616
				ResourceState	TimeStarved	0.6734
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,147.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	EntryQueue	TimeWaiting	10.4032
				HoldingTime	TimeInStation	12.4261
			Total	Throughput	NumberEntered	5,148.0000
					NumberExited	5,147.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	12.5065
			Total	Throughput	NumberEntered	5,147.0000
					NumberExited	5,146.0000
	Pintura2	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	10.9321
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	30.6586
				ResourceState	TimeStarved	0.9616
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,147.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	EntryQueue	TimeWaiting	10.3926
				HoldingTime	TimeInStation	12.3938
			Total	Throughput	NumberEntered	5,148.0000
					NumberExited	5,147.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	12.4697
			Total	Throughput	NumberEntered	5,147.0000
					NumberExited	5,146.0000

Figura 3.34 Resultados de los objetos del modelo original.

Dentro de los resultados generados por Simio, se tiene que las piezas esperaron un promedio de 10.40 segundos para entrar al objeto llamado Pintura1 y a su vez este objeto procesó un total de 5146 piezas durante la simulación, otro dato relevante es el porcentaje de utilización del servidor que mostró una utilización del 30.46%; por otra parte se tiene al objeto llamado Pintura2 el cual mantuvo a las piezas esperando a ser procesadas hasta un promedio de 10.39 segundos y procesó 5146 piezas durante la misma simulación y respecto a la utilización de este servidor se obtuvo un 30.66%.

Respecto a los porcentajes de utilización de ambos servidores (Pintura1 y Pintura2) se puede comentar que a pesar de ser un porcentaje relativamente bajo, esto es razonable, debido a que desempeñan una acción rápida, de unos pocos segundos, lo que provoca que el material fluya de manera casi constante, pero debido a que el siguiente proceso (sistema de visión) es más

lento que estos procesos de pintura, se provoca el ya explicado cuello de botella, provoca que las piezas pasen un mayor tiempo esperando a ser procesadas en pintura o que terminen de ser procesadas y queden a espera de continuar su recorrido. De igual manera este sistema productivo avanza de una manera similar a un flujo continuo, como una célula de manufactura, donde si un proceso se retrasa, los anteriores se detienen hasta que se libere el siguiente. Todo esto provoca que los procesos de pintura que son los anteriores al cuello de botella, mantengan las piezas por un tiempo de espera a pesar de ser un proceso más rápido.

Capítulo 4. Resultados

En este apartado se presentan como resultado las tres alternativas de mejora propuestas para el modelo de simulación desarrollado a lo largo del Capítulo 3, el cual a partir de ahora será llamado modelo original. Posteriormente se realizará un análisis y comparación entre los resultados del modelo original y los resultados de los nuevos modelos propuestos (alternativas) para determinar cuál es mejor. Para finalizar se darán las conclusiones generales acerca de los análisis realizados y de los resultados obtenidos.

4.1 Alternativas de mejora

Para el desarrollo de las alternativas se realizarán cambios al modelo original, llegando a proponer tres modelos alternativos, describiendo cuales son los cambios realizados en cada caso hasta obtener resultados y posteriormente hacer una breve comparación individual entre el modelo y la alternativa en turno.

4.1.1 Alternativa 1: Cambios en el tiempo del sistema de visión

En esta primera alternativa lo que se busca es realizar cambios en la velocidad del sistema de visión, aumentando y disminuyendo el tiempo que pasa la pieza siendo revisada en el proceso sistema de visión, esto con la intención de buscar el valor en segundos que proporcione el mejor rendimiento para las medidas de desempeño. Si bien este proceso puede ser realizado de manera manual, es decir, probar cada valor, correr el modelo y repetir el proceso, esto conllevaría un alto consumo de tiempo y uso de la computadora, así como requeriría una atención al detalle. Una mención acerca de este inconveniente se encuentra dada por (Simio LLC, s.f.) “investigar todos los escenarios posibles puede llevar mucho tiempo y, en muchos casos, ser imposible”.

Precisamente para evitar esto, Simio cuenta con una herramienta llamada *OptQuest* la cual es, según lo mencionado en (Simio LLC, s.f.), un algoritmo enfocado a la búsqueda de mejores soluciones. De igual manera, en esta misma fuente, se explica el funcionamiento de este algoritmo como “OptQuest combina la búsqueda Tabú, la búsqueda dispersa, la programación de enteros y las redes neuronales en un solo algoritmo de búsqueda compuesto que proporciona la máxima eficiencia en la identificación de nuevos escenarios. OptQuest también es flexible, inteligente y fácil de usar”.

Debido a las características descritas de esta herramienta y porque se ajustan a la alternativa planteada, es que se elige trabajar con este algoritmo para la búsqueda del mejor tiempo para el sistema de visión.

4.1.1.1 Desarrollo de la alternativa 1

En esta alternativa lo que se busca es que el valor del tiempo del sistema de visión sea dinámico, para ello se configura el objeto de Simio que representa a este proceso agregando una herramienta llamada propiedad (*property*) la cual ayudará a dar la flexibilidad deseada al tiempo del proceso y evitar tener que hacer cambios manuales. La Figura 4.1 muestra como ha sido configurado el objeto, indicando con una flecha verde que se hace referencia a una propiedad llamada “tiempo_Svision” que su vez se configuró para tener valores del tipo tiempo en unidades de segundos.

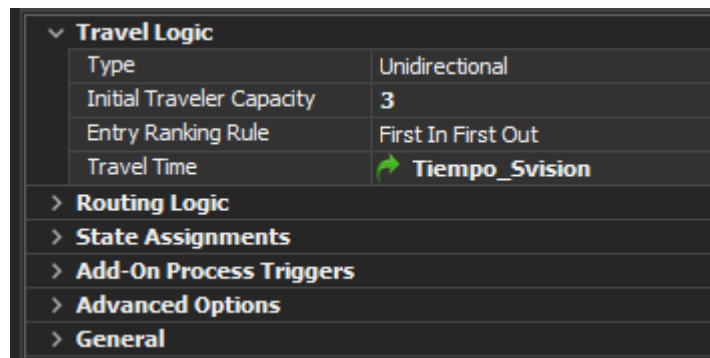


Figura 4.1 Configuración del sistema de visión para la alternativa 1.

De esta manera es posible comenzar con la configuración del experimento que permitirá realizar las corridas de simulación en busca del mejor tiempo por el ya explicado algoritmo *OptQuest*, este experimento es llamado alternativa 1. El algoritmo seleccionado requiere de configurar tres cosas: variables de control, variables de respuesta y parámetros del algoritmo para correr el experimento.

En este caso la variable de control es la propiedad agregada para el tiempo del sistema de visión, de aquí la importancia de haber sido agregada. En su configuración se le indica que sí sea incluida en el experimento y se determina que pueda tener valores tanto por encima como por debajo del promedio del tiempo en el sistema de visión, recordando que el tiempo promedio del sistema de visión es de 18.06 segundos, dejando un valor mínimo de 10 segundos y máximo de

20 segundos, permitiendo incrementos de 0.20 segundos. La Figura 4.2 presenta la configuración agregada al *OptQuest* de Simio.

Properties: Tiempo_Svision (Control)	
▼ Tiempo_Svision	
Description	
Units	Seconds
▼ OptQuest for Simio - Parameters	
Include in Optimization	Yes
Minimum Value	10
Maximum Value	20
Increment	0.20

Figura 4.2 Configuración de la variable de control Tiempo_Svision en el *OptQuest*.

Posteriormente se configuran las variables de salida (responses), que son las dos medidas de desempeño elegidas, siendo la de mayor interés las piezas producidas para la cual se elige que sea maximizada, mientras que la variable tiempo de ciclo se desea que sea minimizada. En la Figura 4.3 se muestran ambas configuraciones introducidas en Simio.

Properties: Tiempo_de_ciclo (Response)	
▼ OptQuest for Simio - Parameters	
Weight	1
▼ General	
Name	Tiempo_de_ciclo
Display Name	Tiempo_de_ciclo
Expression	Math.Round((Run.Ending...
Unit Type	Unspecified
Objective	Minimize
Lower Bound	
Upper Bound	

Properties: Piezas_producidas (Response)	
▼ OptQuest for Simio - Parameters	
Weight	1
▼ General	
Name	Piezas_producidas
Display Name	Piezas_producidas
Expression	Math.Round(VidrioDer.Po...
Unit Type	Unspecified
Objective	Maximize
Lower Bound	
Upper Bound	

Figura 4.3 Configuración de las variables de respuesta Tiempo_de_ciclo y Piezas_producidas.

Finalmente se configura al algoritmo indicando que la variable de respuesta primaria son las piezas producidas y dando un mínimo de 10 replicaciones hasta un máximo de 33, para que sea el propio algoritmo el que evalúe el número de replicaciones adecuadas en cada escenario; cabe mencionar que se eligieron estos números dado que 10 fueron las corridas piloto y 33 el número óptimo de corridas calculado, con lo cual se obtiene un rango justificado para las réplicas. Véase Figura 4.4 para consultar la configuración final del algoritmo para esta alternativa 1.

Properties: Alternativa1 (Experiment)	
Analysis	
Warm-up Period	0
Default Replications	10
Confidence Level	95%
Upper Percentile	75%
Lower Percentile	25%
Primary Response	Piezas_producidas
Advanced Options	
OptQuest for Simio - Parameters	
Min Replications	10
Max Replications	33
Max Scenarios	300
Confidence Level	95%
Relative Error	0.1
Objective Type	Single Objective
General	
Name	Alternativa1

Figura 4.4 Configuración del algoritmo *OptQuest* para la alternativa 1.

Una vez realizado todo lo anterior, se cerraron todos los programas y ventanas ajenas al software Simio con la intención de obtener el mayor potencial de la computadora al momento de correr este experimento, dado que será un elevado número de corridas, llegando a tener 51 escenarios con 10 replicaciones cada uno, sumando un total de 510 corridas.

Después de esperar 4 horas y 33 minutos, se obtuvieron los resultados preliminares de la alternativa 1, véase Figura 4.5. Se dice que fueron resultados preliminares debido a que son todos los resultados de los 51 escenarios, es decir, muchos datos en una misma pantalla, pero Simio ofrece la facilidad de aplicar filtros que permitan reducir la cantidad de datos mostrados.

Para este caso se elige aplicar un filtro que muestre únicamente aquellos valores iguales o mayores al promedio de piezas producidas obtenido en el experimento del modelo original, las cuales fueron de 10260.7 piezas; de igual manera es posible aplicar un ordenamiento de los datos, así que se ordenan los escenarios por la columna piezas producidas de forma descendente y mostrar primero los escenarios con mayor cantidad de piezas producidas. Los escenarios restantes después de la aplicación del filtro y ordenados de forma descendente se muestran en la Figura 4.6.

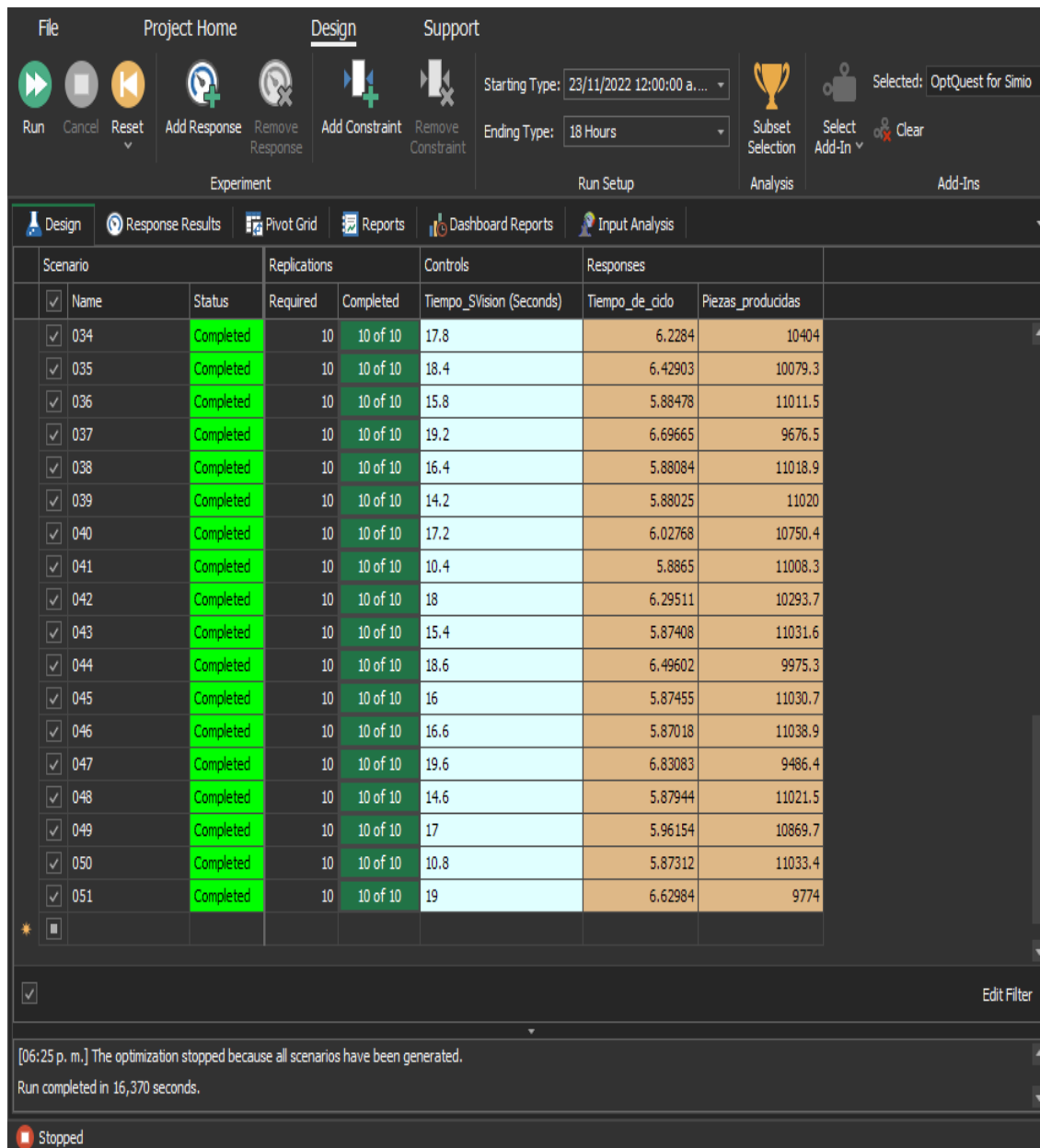


Figura 4.5 Resultados preliminares del experimento de la alternativa 1

Scenario			Replications		Controls	Responses	
☒	Name	Status	Required	Completed	Tiempo_SVision (Seconds)	Tiempo_de_cido	Piezas_prod...
☒	046	Idle	10	10 of 10	16.6	5.87018	11038.9
☒	029	Idle	10	10 of 10	14.4	5.87066	11038
☒	020	Idle	10	10 of 10	14.8	5.87114	11037.1
☒	014	Idle	10	10 of 10	13	5.87231	11034.9
☒	033	Idle	10	10 of 10	11	5.87295	11033.7
☒	050	Idle	10	10 of 10	10.8	5.87312	11033.4
☒	027	Idle	10	10 of 10	15.2	5.8732	11033.2
☒	018	Idle	10	10 of 10	11.6	5.87364	11032.4
☒	043	Idle	10	10 of 10	15.4	5.87408	11031.6
☒	045	Idle	10	10 of 10	16	5.87455	11030.7
☒	011	Idle	10	10 of 10	11.2	5.87608	11027.8
☒	006	Idle	10	10 of 10	11.4	5.87623	11027.5
☒	013	Idle	10	10 of 10	10.2	5.87641	11027.2
☒	028	Idle	10	10 of 10	12	5.87742	11025.3
☒	002	Idle	10	10 of 10	10	5.87784	11024.5
☒	009	Idle	10	10 of 10	13.8	5.87794	11024.3
☒	031	Idle	10	10 of 10	13.4	5.87853	11023.2
☒	001	Idle	10	10 of 10	15	5.87883	11022.7
☒	016	Idle	10	10 of 10	12.2	5.87939	11021.6
☒	048	Idle	10	10 of 10	14.6	5.87944	11021.5
☒	017	Idle	10	10 of 10	12.8	5.87966	11021.1
☒	024	Idle	10	10 of 10	15.6	5.88018	11020.1

☒ Piezas_producidas > 10260.7 Edit Filter

Stopped

Figura 4.6 Resultados filtrados y ordenados del experimento de la alternativa 1.

Con el filtro y orden aplicado se ha pasado de tener 51 escenarios a 41 escenarios, los cuales pasarán a ser analizados en el siguiente punto. Cabe mencionar que Simio mantiene la numeración de los escenarios del 1 hasta el 51 a pesar de haber aplicado el filtro.

4.1.1.2 Modelo original vs alternativa 1

Una vez que se obtuvieron los resultados de interés para la alternativa 1, se procede a realizar un análisis de los 41 escenarios. Si bien es cierto que todos éstos resultan en un promedio de piezas igual o mayor al del modelo original, algunos podrían ser lo suficientemente importantes dado que siguen existiendo escenarios con mejores resultados. Por esta razón se decide tomar a los tres escenarios con mejores resultados, que en este caso es el mayor número promedio de piezas producidas. En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de estos tres mejores resultados de la alternativa 1, así como también el valor de referencia obtenido en el experimento del modelo original. De igual manera en dicha tabla se agrega el valor del tiempo del sistema de visión que el algoritmo *OptQuest* asignó a los escenarios de la alternativa 1 y en el caso del modelo original el promedio de ese proceso.

Tabla 4.1 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 1 (A1).

Modelo	Tiempo en segundos del sistema de visión	Tiempo de ciclo promedio en segundos	Promedio de piezas producidas
Original	18.07	6.31538	10260.7
A1: Escenario 46	16.6	5.87018	11038.9
A1: Escenario 29	14.4	5.87066	11038
A1: Escenario 20	14.8	5.87114	11037.1

Con los resultados de la Tabla 4.1 se demuestra que el algoritmo *OptQuest* sí encuentra buenos resultados siempre y cuando sea configurado de la manera adecuada. Inclusive se han obtenido tres resultados que, a pesar de ser aproximadamente parecidos entre sí, y ser mejores que el modelo original, presentan un tiempo para el sistema de visión diferente, dando así no solamente buenos resultados, sino que también flexibilidad para escoger el que mejor se pueda adaptar al sistema real, ya que en ocasiones los mejores resultados podrían ser bajo condiciones de difícil aplicación. Destacando que el mejor resultado se presentó en el escenario 46, que usó un tiempo de 16.6 segundos para el sistema de visión, dando como resultado un promedio de 5.87018 del tiempo de ciclo y de un promedio de 11038.9 piezas producidas.

Continuando con los análisis de esta alternativa 1, se realiza el cálculo de la productividad al igual que se realizó con el modelo original en la Ec. 3.3, en este caso se toman los datos obtenidos por el escenario 46. La Ec. 4.1 muestra el desarrollo de la fórmula de productividad para la alternativa 1.

$$Productividad_{alternativa1} = \frac{11038.90 \text{ piezas producidas}}{18 \text{ horas simuladas}} = \mathbf{613.27 \text{ piezas/hora}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Se ha obtenido que la productividad de la alternativa 1 resulta ser de 613.27 piezas por hora, que demuestra ser un incremento en la productividad con respecto al modelo original, el cual tiene una productividad de 570.04 piezas por hora.

Como agregado para esta alternativa 1, en la Figura 4.7, se muestra el estado de los acumuladores mencionados en el punto 3.9 que se tomaron como referencia para deducir que en ese punto se tenía una problemática debido a un cuello de botella. Con la presente propuesta estos acumuladores pasan a quedar sin piezas almacenadas. Cabe mencionar que estos resultados son generados tomando como referencia el tiempo que se mostró en la Tabla 4.1, que fue el escenario 46, el cual se considera el mejor escenario porque es el que presenta el menor tiempo de ciclo, la mayor cantidad de piezas producidas y la mayor productividad.



Figura 4.7 Estado final de los acumuladores en alternativa 1.

Al igual que en el modelo original se realizó una revisión de los objetos llamados Pintura1 y Pintura2, en esta alternativa también se toman en cuenta los datos generados por estos objetos durante la simulación. En la Figura 4.8 se muestra la tabla resumen de Simio.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲ ▼	Statistic ▲ ▼	Category ▲	Data Item ▲ ▼	Average Total
Server	Pintura1	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	8.6655
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.8044
				ResourceState	TimeStarved	59.1071
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,519.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	EntryQueue	TimeWaiting	0.2227
				HoldingTime	TimeInStation	0.6800
			Total	Throughput	NumberEntered	5,519.0000
					NumberExited	5,519.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	4.8013
			Total	Throughput	NumberEntered	5,519.0000
					NumberExited	5,519.0000
	Pintura2	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	8.5767
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.6788
				ResourceState	TimeStarved	56.4236
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,529.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	EntryQueue	TimeWaiting	0.5322
				HoldingTime	TimeInStation	1.1932
			Total	Throughput	NumberEntered	5,529.0000
					NumberExited	5,529.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	5.1072
			Total	Throughput	NumberEntered	5,529.0000
					NumberExited	5,529.0000

Figura 4.8 Resultados de los objetos de la alternativa 1.

Respecto al objeto Pintura1 se tiene una utilización del 32.80%, un tiempo de espera para que las piezas entren al proceso de 0.22 segundos y 5519 piezas procesadas; mientras que en Pintura2 se tiene una utilización de 32.68% con un tiempo de espera para entrar de 0.53 segundos y 5529 piezas procesadas. Con estos nuevos datos es posible ver que las piezas tardan menos en esperar al proceso de pintura, pues en el modelo original les tomaba alrededor de 10 segundos y ahora ese tiempo es menor de 1 segundos, así como un cambio en la utilización de estos procesos que paso de tener alrededor de 30% a tener aproximadamente 32%, mostrando un 2% de mejoría en la utilización. Lo cual es entendible debido a que se ha agilizado el siguiente proceso (sistema de visión) que era un cuello de botella que repercutía en los tiempos y utilización de estos procesos previos.

4.1.2 Alternativa 2: Agregar un sistema de visión extra

Para esta segunda alternativa se plantea un escenario en el cual sea posible agregar un sistema de visión extra para que en total se tengan dos de estos procesos. Esta propuesta se realiza dado que en el modelo original antes del sistema de visión se tienen dos procesos iguales que llegan hasta éste mismo, con lo cual podría haber un sistema de visión independiente para dichos procesos previos, de tal manera que se recorra la unión de los dos procesos hasta el horno que es un proceso con mayor capacidad. La elaboración en Simio de esta alternativa junto con una breve comparación con el modelo original se explica en los siguientes puntos.

4.1.2.1 Desarrollo de la alternativa 2

Para el desarrollo de esta alternativa se ha tomado como referencia el modelo original, del cual se copió y pegó el objeto que representa al sistema de visión, así como el objeto previo y posterior al mismo, esto con la intención de mantener las mismas características en ambos sistemas de visión. Posteriormente se realizaron los ajustes necesarios de tal manera que el sistema pudiera fluir de manera normal y sin problemas desde el inicio hasta el final de la simulación.

Una vez que se comprobó que la simulación corre de manera normal, se tomó la captura de pantalla mostrada en la Figura 4.9 desde una perspectiva 2D del modelo.

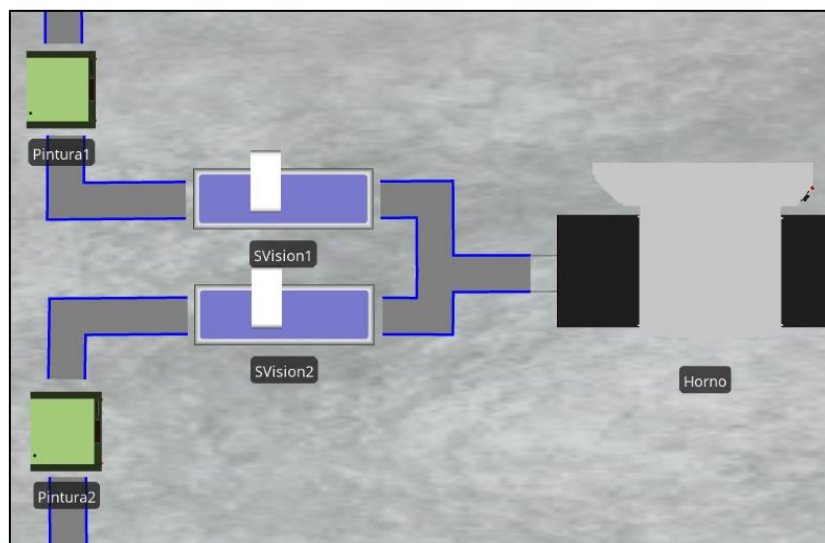


Figura 4.9 Vista 2D del sistema de visión de la alternativa 2.

Con la finalidad de tener una referencia gráfica del cambio realizado al modelo original, la Figura 4.10 presenta la vista 2D del sistema de visión sin cambios.

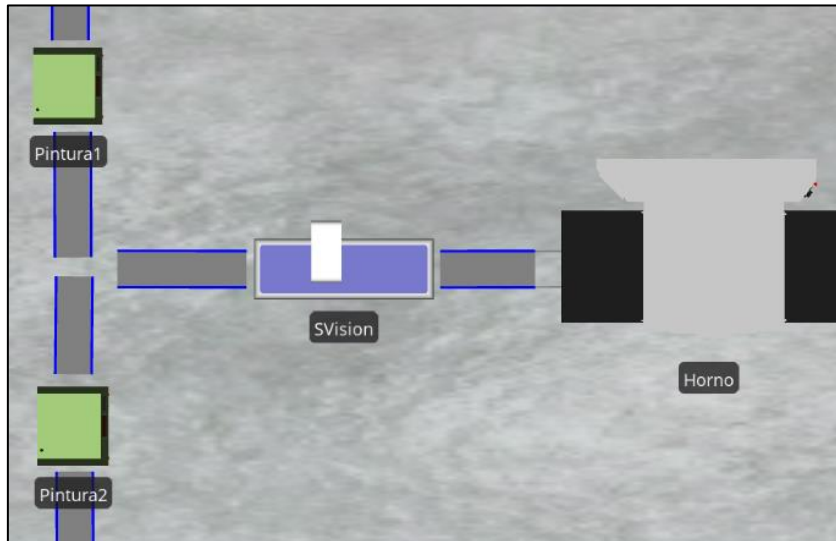


Figura 4.10 Vista 2D del sistema de visión del modelo original.

Nótese como en esta alternativa 2 (Figura 4.9) existen dos sistemas de visión (SVision1 y SVision2) en lugar de uno como se tenía originalmente.

De esta manera es como se ha logrado realizar el cambio propuesto sin presentar problemas de simulación, lo siguiente es obtener resultados para evaluar numéricamente a las medidas de desempeño de esta alternativa 2.

4.1.2.2 Modelo original vs alternativa 2

Dado que este modelo está basado en el modelo original, el cual a su vez fue justificado por la prueba t-pareada y se obtuvieron el número óptimo de corridas, es posible tomar como referencia ese mismo número calculado, el cual fue correr el modelo 33 veces para obtener buenos resultados de simulación. Nuevamente, para tener que evitar realizar cada simulación hasta llegar a las 33 réplicas, se hace uso de los experimentos en Simio. Este experimento es llamado alternativa 2 y se configura para ser corrido automáticamente 33 veces seguidas, agregando las medidas de desempeño correspondientes para obtener el promedio de éstas tras la finalización del experimento. La Figura 4.11 muestra el resultado del experimento completado. Es importante mencionar que se ha mantenido el mismo tiempo de 18 horas de simulación para cada réplica.

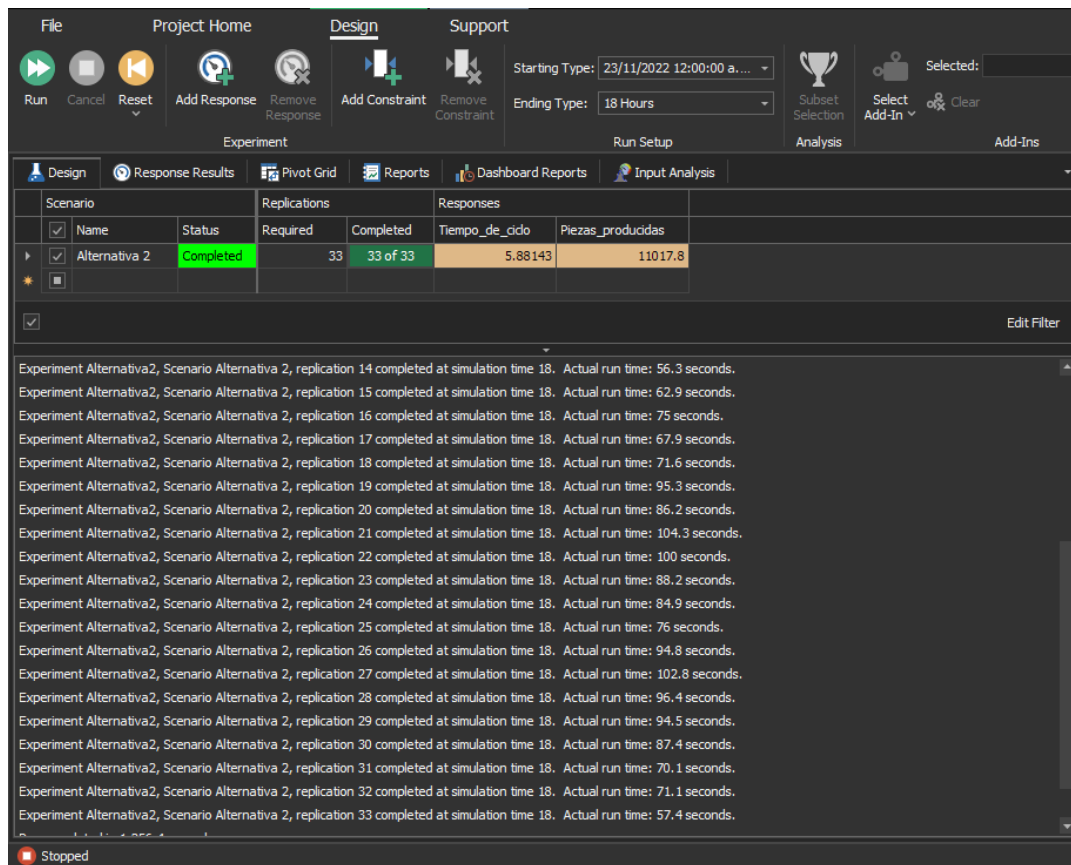


Figura 4.11 Simulación del número óptimo de corridas de la alternativa 2.

De esta manera se obtuvieron los nuevos resultados de las dos medidas de desempeño, donde el tiempo de ciclo promedio es de 5.88143 segundos y las piezas producidas promedio es de 11017.8 piezas, en un tiempo de 18 horas.

Se presenta la Tabla 4.2 como un resumen numérico de los resultados obtenidos con esta alternativa 2 y los que ya se conocían del modelo original.

Tabla 4.2 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 2.

Modelo	Tiempo de ciclo promedio en segundos	Promedio de piezas producidas
Original	6.31538	10260.7
Alternativa 2	5.88143	11017.8

De esta manera se demuestra que realmente existe un cambio en las medidas de desempeño, los cuales, para evitar conclusiones adelantadas, serán analizados a detalle en el punto 4.2.

Para complementar el análisis de la alternativa 2 se realiza el cálculo de la productividad al igual que se realizó tanto en el modelo original como en la alternativa 1, usando la fórmula de productividad se sustituyen los valores obtenidos en la presenta alternativa y se obtienen los resultados de la Ec. 4.2.

$$Productividad_{alternativa2} = \frac{11017.80 \text{ piezas producidas}}{18 \text{ horas simuladas}} = \mathbf{612.10 \text{ piezas/hora}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

La productividad de la alternativa 2 es de 612.10 piezas por hora, lo cual representa un aumento de este valor al ser comparado con la productividad del modelo original, que como recordatorio es de 570.04 piezas por hora.

De igual manera, como complemento a esta alternativa 2, se muestra la Figura 4.12 que presenta el estado de los acumuladores tras realizar una corrida del modelo, encontrando que en esta alternativa estos acumuladores quedan vacíos al final de la simulación.

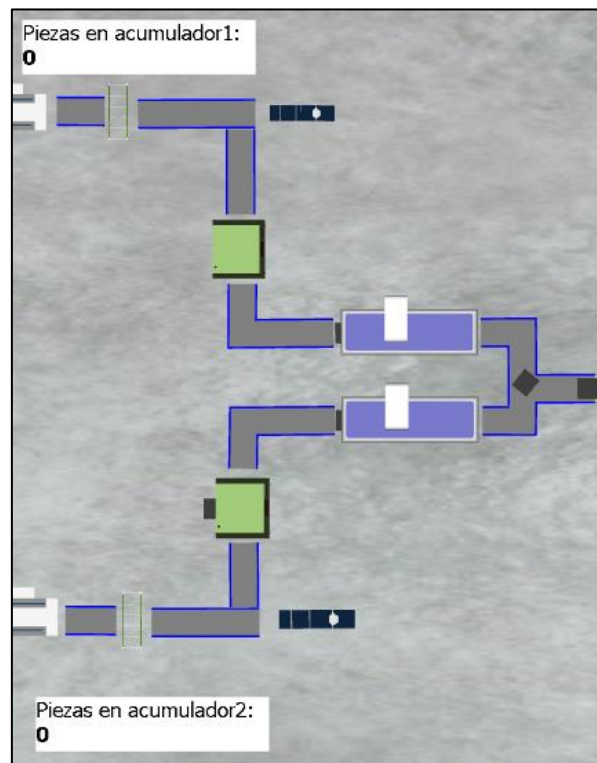


Figura 4.12 Estado final de los acumuladores en alternativa 2.

Continuando con el análisis de la presente alternativa, se observan los datos que Simio muestra como resumen de la información recabada por sus objetos durante la simulación del modelo de la alternativa 2. Dicho resumen de datos se muestra en la Figura 4.13.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲ ▼	Statistic ▲ ▼	Category ▲	Data Item ▲ ▼	Average Total
Server	Pintura1	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	9.0889
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.4360
				ResourceState	TimeStarved	67.5640
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,509.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	0.0885
			Total	Throughput	NumberEntered	5,509.0000
					NumberExited	5,509.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	3.8153
			Total	Throughput	NumberEntered	5,509.0000
					NumberExited	5,509.0000
	Pintura2	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	8.8955
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.6527
				ResourceState	TimeStarved	67.3473
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,527.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	0.0695
			Total	Throughput	NumberEntered	5,527.0000
					NumberExited	5,527.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	3.8286
			Total	Throughput	NumberEntered	5,527.0000
					NumberExited	5,526.0000

Figura 4.13 Resultados de los objetos de la alternativa 2.

De todos los resultados mostrados se toman como los más importantes los relacionados al objeto de Pintura1 y Pintura2, en donde se encuentra que Pintura1 tuvo un porcentaje de utilización de 32.44%, las piezas tardaron 0.09 segundos esperando a ser procesadas y en total se procesaron 5509 piezas; para Pintura2 se tuvo utilización de 32.65%, un tiempo promedio de espera para procesar las piezas de 0.07 segundos y este objeto procesó 5526 piezas. Nuevamente se nota una disminución en el tiempo de espera para procesar las piezas, que en el modelo original fue alrededor de 10 segundos y ahora las piezas prácticamente tienen un flujo constante, así como un aumento de la utilización de aproximadamente 2% (pasó de 30% a 32%). Esto podría explicarse debido a que ahora cada proceso de pintura cuenta con su propio sistema de visión,

recordando que este sistema de visión es el detectado como cuello de botella, y al tener uno extra el flujo de los procesos anteriores se vuelve fluido y no se tienen tantas esperas.

4.1.3 Alternativa 3: Sistema de visión extra con el mejor tiempo

Continuando con el análisis de las alternativas de mejora y tomando en cuenta los dos modelos alternativos anteriores, se propone esta tercera alternativa en donde se modifica el modelo original para hacer un nuevo modelo que combine las alternativas previas, es decir, agregar un sistema de visión extra (alternativa 2) con el mejor tiempo del proceso obtenido tras aplicar el algoritmo *OptQuest* (alternativa 1). Esta alternativa 3 se realiza con la intención de probar si es posible obtener una mejoría que supere a sus precedentes.

4.1.3.1 Desarrollo de la alternativa 3

Para desarrollar esta nueva alternativa se usa el modelo obtenido en la alternativa 2, el cual ya contiene el sistema de visión extra, como se presentó en la Figura 4.9, posteriormente se configura el tiempo de cada sistema de visión para asignarles el mejor tiempo obtenido en la alternativa 1, este dato se toma de lo obtenido en la Tabla 4.1, el cual es 16.6 segundos. Para tener un mejor control y referencia visual de este ajuste en el tiempo de los procesos, se agrega un elemento llamado propiedad (*property*) en cada objeto. En la Figura 4.14 se muestran las dos propiedades agregadas, cabe mencionar que fueron configuradas para ser del tipo tiempo en unidades de segundos.

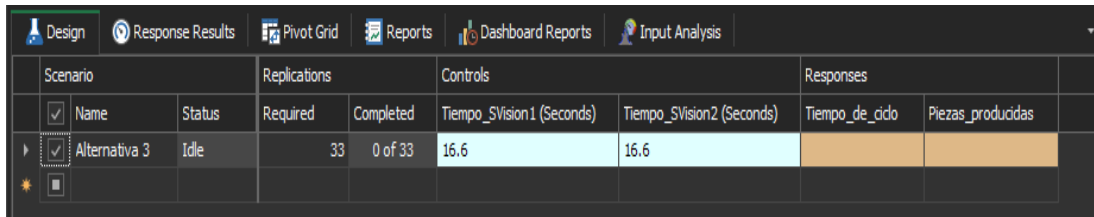
▼ Travel Logic	
Type	Unidirectional
Initial Traveler Capacity	3
Entry Ranking Rule	First In First Out
Travel Time	➡ Tiempo_SVision1
> Routing Logic	
> State Assignments	

▼ Travel Logic	
Type	Unidirectional
Initial Traveler Capacity	3
Entry Ranking Rule	First In First Out
Travel Time	➡ Tiempo_SVision2
> Routing Logic	
> State Assignments	

Figura 4.14 Configuración del sistema de visión 1 y sistema de visión 2 para la alternativa 3.

De esta manera es posible continuar con el experimento que permita correr el modelo de simulación varias veces de manera simultánea, por ello se crea un experimento llamado alternativa 3. Este nuevo experimento será corrido 33 veces según lo obtenido como el número óptimo de corridas, también se contienen dos controles correspondientes a las propiedades agregadas en la Figura 4.14, asignando un tiempo de 16.6 segundos para cada sistema de visión

y como respuestas (medidas de desempeño) se tiene al tiempo de ciclo en segundos y la cantidad de piezas producidas. La Figura 4.15 contiene una captura del experimento previo a ser realizado.

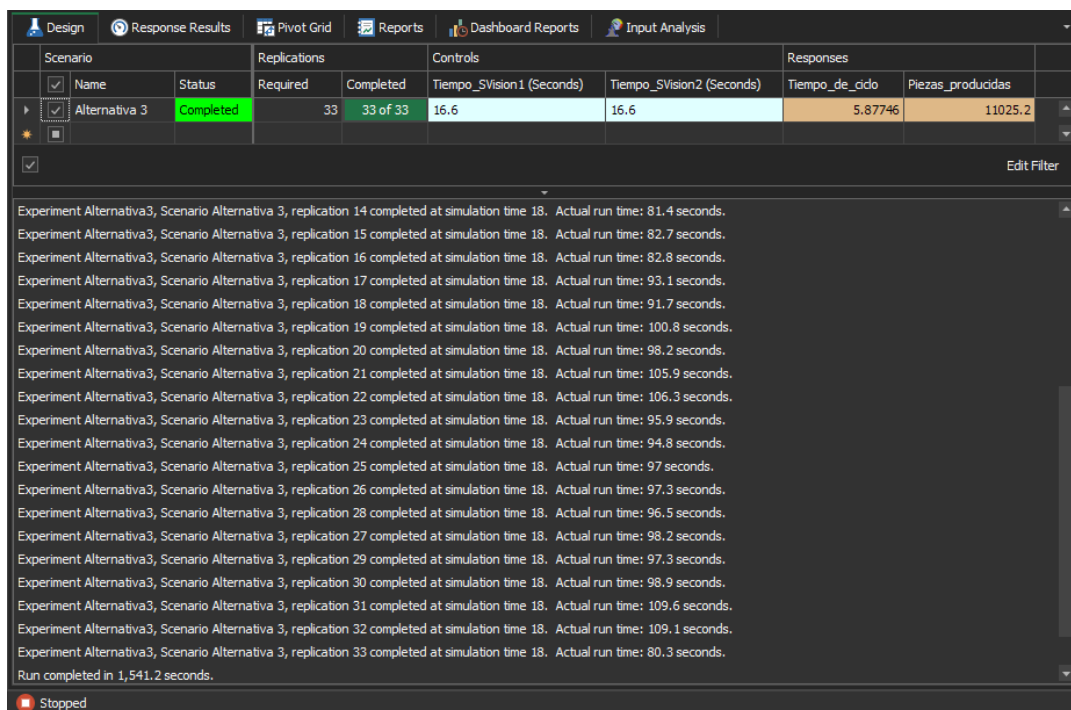


Scenario		Replications		Controls		Responses	
☒ Name	Status	Required	Completed	Tiempo_SVision1 (Seconds)	Tiempo_SVision2 (Seconds)	Tiempo_de_ciclo	Piezas_producidas
☒ Alternativa 3	Idle	33	0 of 33	16.6	16.6		

Figura 4.15 Configuración del experimento para la alternativa 3.

4.1.3.2 Modelo original vs alternativa 3

Una vez configurado el experimento se realiza la corrida con las 33 réplicas y tras 26 minutos de espera se obtienen los resultados para esta alternativa, los cuales pueden ser consultados en la Figura 4.16.



Scenario		Replications		Controls		Responses	
☒ Name	Status	Required	Completed	Tiempo_SVision1 (Seconds)	Tiempo_SVision2 (Seconds)	Tiempo_de_ciclo	Piezas_producidas
☒ Alternativa 3	Completed	33	33 of 33	16.6	16.6	5.87746	11025.2

Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 14 completed at simulation time 18. Actual run time: 81.4 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 15 completed at simulation time 18. Actual run time: 82.7 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 16 completed at simulation time 18. Actual run time: 82.8 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 17 completed at simulation time 18. Actual run time: 93.1 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 18 completed at simulation time 18. Actual run time: 91.7 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 19 completed at simulation time 18. Actual run time: 100.8 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 20 completed at simulation time 18. Actual run time: 98.2 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 21 completed at simulation time 18. Actual run time: 105.9 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 22 completed at simulation time 18. Actual run time: 106.3 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 23 completed at simulation time 18. Actual run time: 95.9 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 24 completed at simulation time 18. Actual run time: 94.8 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 25 completed at simulation time 18. Actual run time: 97 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 26 completed at simulation time 18. Actual run time: 97.3 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 28 completed at simulation time 18. Actual run time: 96.5 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 27 completed at simulation time 18. Actual run time: 98.2 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 29 completed at simulation time 18. Actual run time: 97.3 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 30 completed at simulation time 18. Actual run time: 98.9 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 31 completed at simulation time 18. Actual run time: 109.6 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 32 completed at simulation time 18. Actual run time: 109.1 seconds.
 Experiment Alternativa3, Scenario Alternativa 3, replication 33 completed at simulation time 18. Actual run time: 80.3 seconds.
 Run completed in 1,541.2 seconds.

Stopped

Figura 4.16 Simulación del número óptimo de corridas de la alternativa 3.

De esta manera se obtienen los resultados de la alternativa 3, donde se muestra que para la medida de desempeño del tiempo de ciclo se obtuvo un promedio de 5.87746 segundos, mientras que las piezas producidas fueron un promedio de 11025.2 piezas en un tiempo de 18 horas.

Como resumen de estos resultados obtenidos para la alternativa 3, se presenta la Tabla 4.3 que contiene los valores obtenidos para las medidas de desempeño en cada modelo.

Tabla 4.3 Resumen de resultados modelo original vs alternativa 3.

Modelo	Tiempo de ciclo promedio en segundos	Promedio de piezas producidas
Original	6.31538	10260.7
Alternativa 3	5.87746	11025.2

De manera preliminar se observa que sí hubo cambios notables entre el modelo original y la alternativa 3, a pesar de ello en el siguiente punto se realizará un análisis contemplado todos los modelos realizados.

Para complementar el análisis de los resultados que la alternativa 3 ha generado, se realiza el mismo cálculo aplicado en las alternativas pasadas, es decir, obtener la productividad. En la Ec. 4.3 se utilizan los valores correspondientes para saber cuál es la productividad de esta alternativa.

$$Productividad_{alternativa3} = \frac{11025.20 \text{ piezas producidas}}{18 \text{ horas simuladas}} = \mathbf{612.51 \text{ piezas/hora}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Al haber realizado el cálculo de la productividad para la alternativa 3 se encuentra que ésta produce 612.51 piezas por hora, que en comparación con el modelo original que demostró una productividad de 570.04 piezas por hora, resulta ser un aumento en este valor.

Para finalizar la comparación de esta alternativa 3, la Figura 4.17 presenta el estado de los acumuladores tras realizar una simulación del modelo, en donde se encuentra que los acumuladores quedan vacíos, es decir, sin piezas contenidas en ellos tras la simulación.

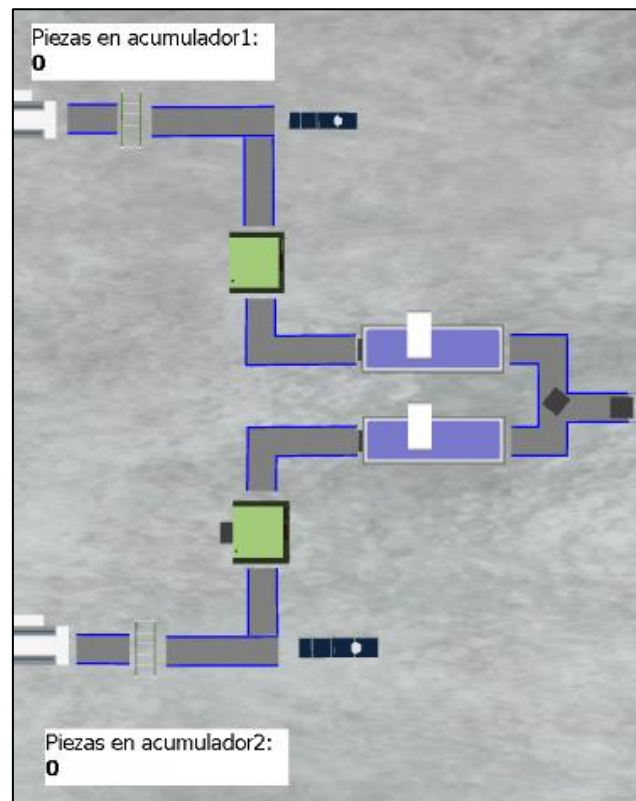


Figura 4.17 Estado final de los acumuladores en alternativa 3.

Al igual y como se realizó en las alternativas pasadas, en esta alternativa 3 se realiza un análisis de los resultados de los objetos de Simio durante la simulación para enfocarse en los datos que generaron los objetos Pintura1 y Pintura2. La Figura 4.13 muestra la tabla resumen que genera el software de manera automática.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲ ▼	Statistic ▲ ▼	Category ▲	Data Item ▲ ▼	Average Total
Server	Pintura1	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	8.9952
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.6745
				ResourceState	TimeStarved	67.3255
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,527.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	0.0849
			Total	Throughput	NumberEntered	5,527.0000
					NumberExited	5,527.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	3.8308
			Total	Throughput	NumberEntered	5,527.0000
					NumberExited	5,527.0000
	Pintura2	[Resource]	Average (Seconds)	ResourceState	TimeStarved	8.9402
			Percent	Capacity	ScheduledUtilization	32.7000
				ResourceState	TimeStarved	67.3000
			Total	Capacity	UnitsAllocated	5,540.0000
		InputBuffer	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	0.0738
			Total	Throughput	NumberEntered	5,540.0000
					NumberExited	5,540.0000
		Processing	Average (Seconds)	HoldingTime	TimeInStation	3.8255
			Total	Throughput	NumberEntered	5,540.0000
					NumberExited	5,539.0000

Figura 4.18 Resultados de los objetos de la alternativa 3.

Dentro de la tabla resumen de Simio se encontró que Pintura1 tiene una utilización de 32.67%, piezas esperando a entrar durante un tiempo promedio de 0.08 segundos y que se procesaron 5527 piezas durante la simulación; Pintura2 presentó un 32.70% de utilización, un tiempo promedio de espera para procesar piezas de 0.07 segundos y un total de 5539 piezas procesadas.

En esta alternativa 3 que combina aspectos de las alternativas predecesoras, nuevamente se encuentra un aumento de la utilización alrededor del 2% y una reducción del tiempo de espera para procesar de las piezas el cual era en el modelo original de 10 segundos y paso a durar únicamente algunas décimas de segundo. Las razones para estas mejoras son, en gran parte, porque se han combinado los cambios de las alternativas pasadas que mostraron mejorías, que fue la implementación de un sistema de visión extra y el aumento de la velocidad de ese proceso de visión.

4.2 Comparación del modelo original contra alternativas propuestas

En este apartado se realizará el análisis de los cuatro modelos presentados hasta el momento (original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3) para determinar cuál es el que ofrece los mejores resultados. En este caso los mejores resultados son aquellos que ofrezcan el menor tiempo de ciclo promedio y el mayor promedio de piezas producidas.

Como inicio del análisis se presenta la Tabla 4.4 que contiene los resultados obtenidos de los experimentos realizados para cada modelo. Cabe mencionar que para el caso de la alternativa 1, se tomó al mejor resultado contenido en la Tabla 4.1, el cual es el escenario 46.

Tabla 4.4 Resultados del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.

Modelo	Tiempo de ciclo promedio en segundos	Promedio de piezas producidas
Original	6.31538	10260.7
Alternativa 1	5.87018	11038.9
Alternativa 2	5.88143	11017.8
Alternativa 3	5.87746	11025.2

A partir de la anterior tabla presentada, se realizarán las comparaciones por medida de desempeño y finalmente una comparación simultánea de dichas medidas.

Para complementar la comparación del modelo original contra las alternativas realizadas, también se incluyen los valores de la productividad obtenidos para cada modelo. La Tabla 4.5 contiene un resumen de cada uno de los resultados obtenidos al aplica la Ec. 2.1 en cada uno de los casos.

Tabla 4.5 Productividad del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.

Modelo	Productividad (piezas/hora)
Original	570.04
Alternativa 1	613.27
Alternativa 2	612.10
Alternativa 3	612.51

De la Tabla 4.5 se puede destacar que la alternativa 1 es la que presenta la mejor productividad entre todos los modelos, así mismo la alternativa 2 y alternativa 3 demuestran un aumento en su productividad con respecto al modelo original.

4.2.1 Tiempo de ciclo

Para esta medida de desempeño del tiempo de ciclo se tienen los cuatro datos obtenidos de los modelos desarrollados, para la cual, como ya se mencionó, se busca que sea el menor tiempo posible. Basándose en la Tabla 4.4, se ha realizado una gráfica presentada en la Figura 4.19. Dicha figura es un gráfico de columnas que contiene una escala en segundos en el eje Y, el cual muestra los valores obtenidos en cada uno de los modelos mencionados en el eje X.

Al analizar la Figura 4.19 se puede notar que el modelo original es el que presenta el mayor tiempo de ciclo, mientras que la alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3 son menores que éste. Sin embargo, debido a la escala visualmente es complicado definir cuál es la mejor alternativa, por ello se agregaron las etiquetas con los valores sobre cada columna. Con ello se logra diferenciar que la alternativa 1 presenta un resultado ligeramente inferior con respecto a la alternativa 2 y alternativa 3. Por su parte la alternativa 3 tiene un tiempo de ciclo menor a la alternativa 2 pero mayor a la alternativa 1.

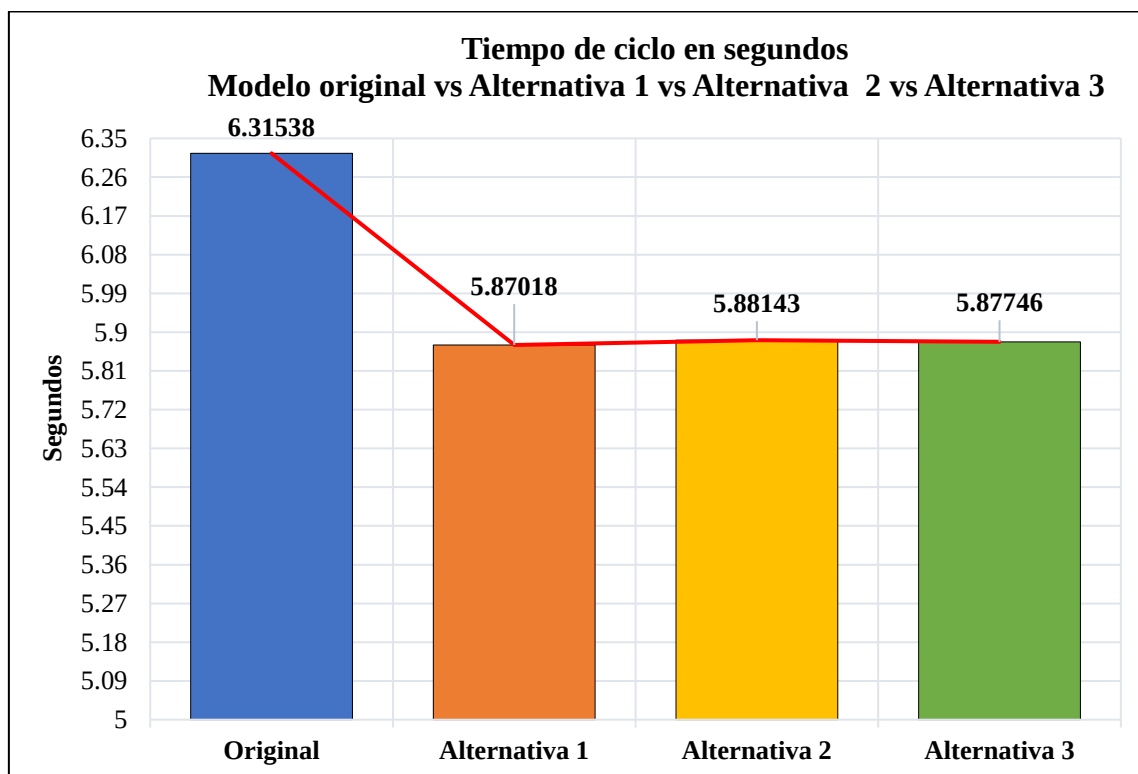


Figura 4.19 Comparación del tiempo de ciclo del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.

Tras el análisis de la Figura 4.19 es posible concluir que el mejor modelo para el tiempo de ciclo es la alternativa 1 con un resultado promedio de 5.87018 segundos. Como agregado a esta conclusión es importante mencionar que la alternativa 2 y alternativa 3 también presentan una mejoría respecto al modelo original, por lo que también podrían ser candidatas para tomar en cuenta si se deseara tener más de una opción como respuesta.

4.2.2 Piezas producidas

Las piezas producidas son la otra medida de desempeño elegida, en este caso se toma como mejoría un aumento en la cantidad de piezas durante un periodo de 18 horas. Nuevamente se toma como referencia la Tabla 4.4 para realizar el gráfico correspondiente, el cual es presentado en la Figura 4.20. En esta gráfica de columnas el eje Y presenta la escala en unidades para las piezas en cada uno de los modelos simulados, los cuales se mencionan en el eje X.

Del análisis a la Figura 4.20 se establece que el modelo original es el que menor cantidad de piezas produce de los tres modelos. Por su parte, se tiene que, gráficamente, la alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3 son parecidas, pero al comparar el dato numérico de ambas se puede notar que la alternativa 1 tiene el mejor resultado de las cuatro barras presentadas.

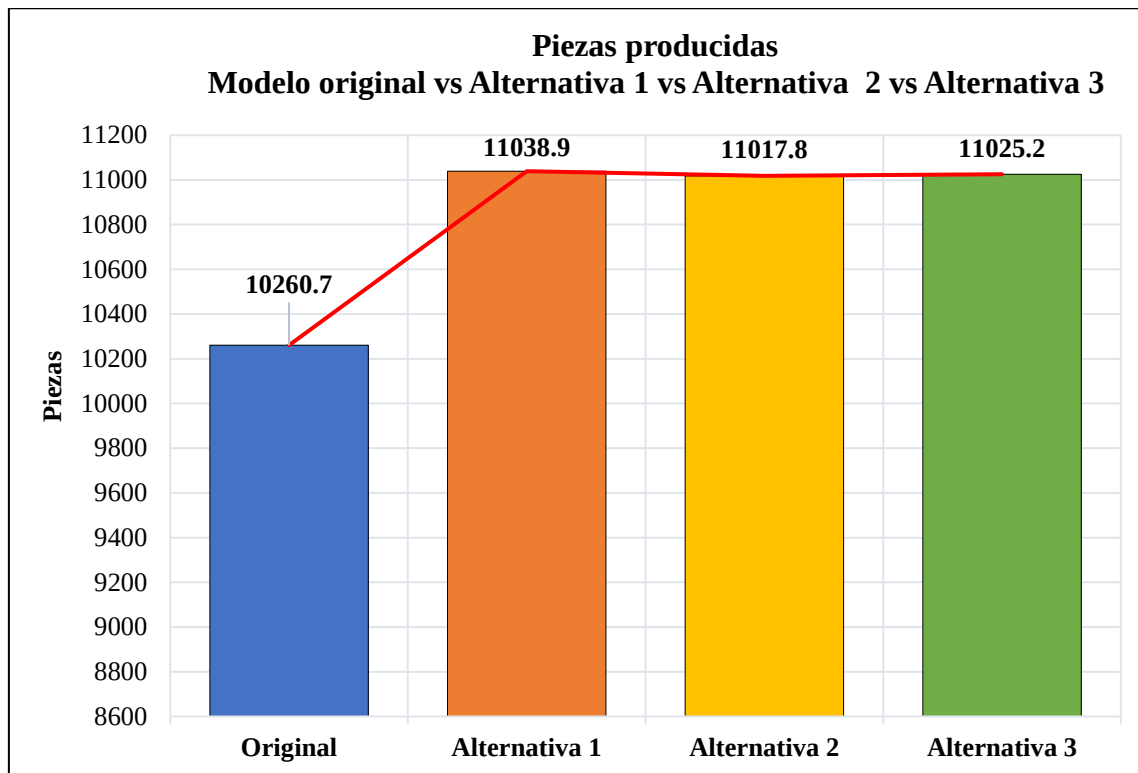


Figura 4.20 Comparación de las piezas producidas del modelo original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.

De la Figura 4.20 se puede concluir que la mejor alternativa es la alternativa 1, debido a que presenta el mejor comportamiento para esta medida de desempeño con un promedio de piezas producidas de 11038.9 piezas. Cabe mencionar que la alternativa 2 y alternativa 3 también presentan un aumento con respecto al modelo original, por lo que éstas también podrían ser una buena opción para tomar en cuenta.

4.2.3 Tiempo de ciclo y piezas producidas

Finalmente se realiza una comparación de las medidas de desempeño en conjunto y para facilitar este cotejo se obtendrán los porcentajes de mejora. Para calcular los porcentajes se tomará como referencia el modelo original, ya que es el que representa al sistema real y se busca saber si realmente las alternativas propuestas presentan un mejor desempeño. La Tabla 4.6 presenta el resultado del cálculo de la mejoría porcentual de la alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3 para ambas medidas de desempeño, recordando que para el tiempo de ciclo la disminución del

tiempo resulta en mejoría y, por el contrario, para las piezas producidas un aumento de piezas se toma como algo mejor.

Tabla 4.6 Porcentajes de mejora de cada medida de desempeño.

Modelo	Tiempo de ciclo promedio en segundos	Porcentaje de mejora del tiempo de ciclo	Promedio de piezas producidas	Porcentaje de mejora de piezas producidas
Original	6.31538	—	10260.7	—
Alternativa 1	5.87018	7.05%	11038.9	7.58%
Alternativa 2	5.88143	6.87%	11017.8	7.38%
Alternativa 3	5.87746	6.93%	11025.2	7.45%

Con base a los resultados presentados en la Tabla 4.6 se realiza Figura 4.21 que contiene un gráfico de columnas en el cual se contiene la comparación de ambas alternativas para cada medida de desempeño, presentando una escala porcentual en el eje Y, por su parte el eje X contiene a cada una de las alternativas en las medidas de desempeño.

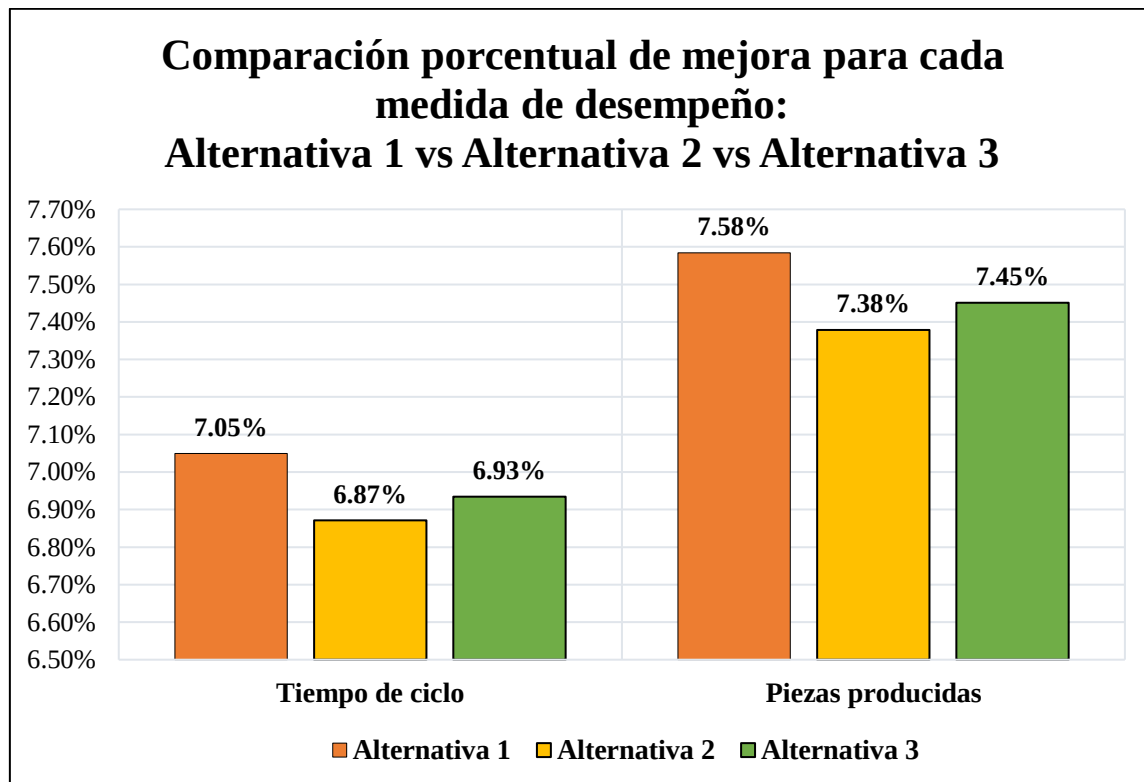


Figura 4.21 Comparación porcentual de mejora entre las alternativas de mejora para cada medida de desempeño.

Tomando en cuenta la Figura 4.21, se obtiene que para el tiempo de ciclo la alternativa 1 es la que presenta el mejor desempeño con una mejora del 7.05%; mientras que, para las piezas

producidas, nuevamente la alternativa con un mejor resultado es la alternativa 1 presentando un 7.58% de mejoría. Mientras que la segunda mejor alternativa es la alternativa 3 con una mejoría de 6.93% en el tiempo de ciclo y para las piezas producidas mejora en 7.45%.

4.3 Conclusiones de los análisis y resultados

Tras haber comparado al modelo original con la alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3, los análisis tanto de manera individual para cada medida de desempeño como el análisis porcentual de mejora indican que los modelos alternativos propuestos sí cumplen con el objetivo inicial de buscar mejorar las medidas de desempeño en contraste con el modelo original. El resultado obtenido de lo anterior es que el mejor modelo es el propuesto en la alternativa 1, ya que obtuvo mejor desempeño que la alternativa 2 y la alternativa 3. Sin embargo, esto no significa que la alternativa 2 o la alternativa 3 queden descartadas, puesto que estas otras alternativas también presentaron mejoría para cada medida de desempeño, aunque ligeramente menor al mostrado por la alternativa 1.

Con lo cual, se concluye que las tres alternativas propuestas han demostrado una mejoría en el tiempo de ciclo y las piezas producidas durante las simulaciones realizadas, siendo preferible la alternativa 1 desde el punto de vista numérico para las medidas de desempeño. Por otra parte, es necesario tomar en cuenta los costos que conllevaría implementar cada una de las alternativas, así como las implicaciones para el sistema real, sobre esto se comentará a continuación.

Referente a los costos o implicaciones que conllevaría aplicar en el sistema real cada una de las alternativas propuestas, la alternativa 1 es la que podría resultar más atractiva, debido a que ésta plantea utilizar el mismo número de máquinas y procesos pero modificando la velocidad a la que circulan las piezas por el proceso de sistema de visión; que si bien esto podría no presentar ningún costo aparente sí requiere de realizar ajustes y las pruebas necesarias para corroborar si estos cambios realmente se pueden aplicar. Para el caso de la alternativa 2 en la cual sí existe una modificación al sistema productivo, ya que plantea agregar un sistema de visión para pasar de tener uno a tener dos sistemas que realicen la misma acción, lo que en la simulación ha demostrado una mejoría. Sin embargo, la implementación de la maquinaria extra puede resultar excesivamente costosa debido a que este sistema de visión se apoya en el uso de inteligencia

artificial, determinar un costo exacto es difícil debido a la confidencialidad que tiene la empresa con sus equipos y componentes, pero se puede tomar como referencia costos de sistemas de visión similares, los cuales varían dependiendo las especificaciones de los componentes, encontrando que estos sistemas pueden rondar los \$30,000 pesos mexicanos, incluso pasar de los \$100,000 pesos mexicanos. Así mismo se tendría que agregar toda una nueva estructura para que el material pueda pasar a través de los procesos hacia este nuevo sistema añadido y finalmente se realice el análisis y planeación de como juntar estos dos procesos para que resulten en un mismo flujo, puesto que el proceso siguiente cuenta con únicamente una entrada. Por último, se tiene la alternativa 3, que es una mezcla de las dos alternativas previas, esto quiere decir que se requieren hacer análisis parecidos a los mencionados, más no tomar exactamente los mismos estudios, puesto que este caso tendría que evaluarse ese costo extra pero también contemplar una velocidad, aunque igual entre los sistemas de visión, es diferente a la planeada para el proceso.

Con lo anterior mencionado, se plantean algunos posibles enfoques de evaluación para las alternativas desarrolladas, el principal enfoque desarrollado en este proyecto son los resultados numéricos generados por la simulación referentes a las medidas de desempeño que se sugieren contrastar con la disponibilidad de la empresa para adquirir un nuevo equipo de visión debido a los costos del equipo de visión, así como la capacidad en cuanto a espacio y materiales para implementar esa infraestructura extra o si se cuenta con el tiempo necesario para analizar y determinar los cambios que conlleva un aumento de velocidad en el proceso de sistema de visión y como esto repercute en todo el sistema.

Habiendo realizado el análisis de forma general y sencilla acerca de los costos e implicaciones que conlleva el implementar cada una de las alternativas, se puede concluir que aquella alternativa que puede resultar en un menor costo y presentar mínimos cambios al sistema productivo del área de templado, es la alternativa 1. Esto se debe a que no implica alguna inversión en nueva máquina, teniendo únicamente que realizar algunos ajustes y pruebas para lograr aplicar los cambios que esta alternativa 1 en el sistema real.

Conclusiones

La metodología seleccionada para el desarrollo del presente proyecto permitió realizar el trabajo de forma adecuada y ordenada desde la definición de la problemática y objetivos hasta el análisis final de los resultados obtenidos. Al tratarse de un proyecto enfocado a la simulación de eventos discretos fue de suma importancia contar con datos obtenidos directamente del proceso, pero aún más el contar con un software tan completo como lo es Simio, ya que permitió generar resultados de manera rápida tanto para el modelo original como para las alternativas propuestas.

Para obtener resultados de la simulación fueron seleccionadas dos medidas de desempeño: el tiempo de ciclo en segundos y las piezas producidas, además de la productividad. Respecto a estos resultados es importante mencionar que son el dato promedio de las múltiples corridas realizadas, teniendo lo anterior en cuenta se encontró que el modelo de simulación que representaba al sistema real (modelo original) tenía 6.31538 segundos para el tiempo de ciclo y 10260.7 piezas producidas en un tiempo de 18 horas; de igual manera se calculó la productividad para este modelo como una manera extra de medir su desempeño, y se obtuvo que puede producir 570.04 piezas por hora. Estos datos son de suma importancia por dos principales razones, la primera porque fueron los datos contrastados con el sistema real para saber si realmente el modelo creado representaba la realidad, lo cual sí fue logrado; la segunda razón por la que son importantes los datos del modelo original es que son los que se tomarán como referencia para la comparación con los modelos propuestos, que a su vez derivan de ese primer modelo, o como fue nombrado, modelo original.

Basándose en el modelo original fueron propuestos tres escenarios alternativos distintos, en la alternativa 1 se buscó cambiar la velocidad del proceso llamado sistema de visión, mientras que en la alternativa 2 se propuso agregar un servidor extra de un mismo proceso (sistema de visión) para agilizar el flujo de material y en la alternativa 3 se realizó una combinación de las dos alternativas previas (alternativa 1 y alternativa 2).

Para la alternativa 1 que requería evaluar múltiples posibles velocidades se usó una opción de Simio que hace uso del algoritmo *OptQuest* aplicando metaheurísticas para buscar el mejor resultado, esto se realizó corriendo varios escenarios con varias réplicas hasta obtener que los

mejores resultados para la alternativa 1 fueron de 5.87018 segundos de tiempo de ciclo y 11038.9 piezas producidas, que como análisis extra se calculó su productividad, que al aplicar la fórmula correspondiente se obtuvo una productividad de 613.27 piezas por hora.

Por su parte en la alternativa 2 se realizaron los cambios necesarios al modelo, los cuales consistieron en copiar los objetos que representan al sistema de visión ya existente, pegarlo y unirlo con los demás objetos. Posteriormente se aplicó un experimento para correrlo el número óptimo de corridas, tras lo cual se obtuvo un tiempo de ciclo de 5.88143 segundos y 11017.8 piezas producidas, de igual manera se aplicó el cálculo de la productividad, encontrando que en esta alternativa es de 612.10 piezas por hora.

Finalmente, para la alternativa 3 aplicaron los ajustes correspondientes al modelo de simulación los cuales consisten en agregar un segundo sistema de visión al igual que se hizo en la alternativa 2 y posteriormente ajustar la velocidad del sistema de visión que se eligió como la mejor en la alternativa 1. Para que, posteriormente, tras correr el número óptimo de corridas se obtuviera un tiempo de ciclo de 5.87746 segundos y 11025.2 piezas producidas, esto con respecto a las medidas de desempeño, mientras que respecto a la productividad de este modelo el cálculo de la fórmula dio como resultado 612.51 piezas por hora.

Posteriormente, con los resultados obtenidos se realizaron comparaciones de dichos datos por cada medida de desempeño, así como también se obtuvieron los porcentajes de mejora que permitieron hacer una comparación directa entre la alternativa 1 contra la alternativa 2 y contra la alternativa 3 en base a su mejora respecto al modelo original. La alternativa 1 presentó un 7.05% de reducción en el tiempo de ciclo y 7.58% de aumento para las piezas producidas; mientras la alternativa 2 mostró una disminución del 6.87% para el tiempo de ciclo con un incremento de 7.38% en piezas producidas; por su parte la alternativa 3 obtuvo un descenso del 6.93% en el tiempo y un crecimiento del 7.45% de las piezas producidas.

Con lo que se logró demostrar que las alternativas de simulación propuestas obtuvieron un mejor desempeño que el modelo original que representó al sistema real, siendo la alternativa 1 la que obtuvo los mejores resultados dentro de las corridas de simulación realizadas.

Referente a la simulación como herramienta para evaluar el desempeño de un sistema de producción, fue posible comprobar que, con los datos correctos, el software indicado y el tiempo suficiente se pudo obtener un modelo de simulación que se asemeja al área real de la empresa bajo estudio. Esto da como resultado tener una poderosa herramienta que permite replicar sistemas reales de manera virtual, pero la importancia no recae en la capacidad de poder replicar la realidad, sino más bien en lo que se puede hacer con esos modelos de simulación. Dependiendo del software de simulación serán las cosas que se puedan modificar, es aquí donde se considera que encuentra una gran área de estudio y aplicaciones, debido a que de aplicarse la simulación como entorno de pruebas, se ahorra una gran cantidad de recursos al no alterar el sistema real, ofreciendo la capacidad de poner a prueba un sistema mediante condiciones extremas o distintas a las reales, e inclusive permitir implementar todos aquellos cambios que de otra forma sería complicado o costoso aplicar en la vida real.

En este aspecto de la simulación, el software Simio es un programa de simulación bastante completo, puesto que, a pesar de estar enfocado en la simulación de eventos discretos, también ofrece algunos objetos con comportamiento continuo, así como también presenta herramientas que ayuden en asemejar lo mayor posible el modelo a la realidad. Como agregado Simio ofrece maneras de calcular costos o realizar experimentos que corran varios escenarios de simulación con distintas réplicas de manera simultánea e incluso cuenta con una herramienta para implementar metaheurísticas en la búsqueda de un mejor resultado. Por todas estas razones es que Simio fue utilizado en el desarrollo del presente proyecto, debido a su amplia su amplia variedad de funciones e interfaz intuitiva que hicieron posible crear cuatro modelos (original, alternativa 1, alternativa 2 y alternativa 3.). Además, se pudo realizar una ambientación 3D del modelo, haciendo que el modelo fuera parecido a la realidad tanto numéricamente como visualmente, dando un agregado de mejor entendimiento de la simulación realizada para la alta gerencia de la empresa donde fue desarrollado este proyecto.

El desarrollo de un proyecto de simulación conlleva el reto de trabajar con algo no tangible y del cual no se puede obtener una retroalimentación constante, ya que se obtiene hasta el final del modelado, por lo cual podría resultar en un proceso tedioso, por esta razón es que se sugiere

tener en cuenta una metodología que de un enfoque no sólo al proceso de simulación, sino que englobe todo como un proyecto, debido a que existen aspectos importantes a definir que son ajenos a la simulación en sí. Junto con esto el adecuado conocimiento del software fue de gran ayuda, puesto que se llevó un curso enfocado en Simio, lo que dio el conocimiento y perspectiva necesaria para abordar el proyecto de una mejor forma, que en conjunto con los conocimientos de la ingeniería industrial permitieron aplicar esta simulación con el objetivo de la mejora del sistema basado en un modelo comprobado estadísticamente.

Recomendaciones

Finalmente se presentan algunas recomendaciones a tomar en consideración respecto a los resultados obtenidos, así como para trabajos futuros:

- Realizar otros tipos de análisis para evaluar si las alternativas propuestas son factibles más allá de los datos obtenidos para las medidas de desempeño.
- El modelo de simulación realizado representa al sistema real según los datos obtenidos y el enfoque establecido al inicio del proyecto, investigar otras características podría requerir de un modelo distinto o de reestructurar el actual.
- Replicar el enfoque de simulación para analizar otras áreas y, de ser posible, usar o adaptar la metodología de simulación utilizada en este proyecto

Referencias bibliográficas

- Aguilar, J. O., Gómez Daza, O., Nair, M. T., Nair, P. K., & Brito L., A. (2004). Resistencia adhesiva interfacial de vidrios laminados con películas delgadas semiconductoras. *Superficies y vacío*, 17(2), 15-20.
- Allen Joines, J., & Dean Roberts, S. (2015). *Simulation modeling with SIMIO: a workbook*. Pensilvania: SIMIO LLC.
- Avilés Medina, E. A. (2014). *Estudio de factibilidad para la producción y la comercialización de vidrio templado en la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: UEES.
- Belohlavek, P. (2006). *OEE Overall Equipment Effectiveness. Su abordaje unicista* (Primera ed.). Buenos Aires: Blue Eagle Group.
- Buselato Maurício, T., Barra Montevechi, J., Leal, F., de Carvalho Miranda, R., & Lombardi, F. (2015). Using discrete event simulation to change from a functional layout to a cellular layout in an auto parts industry. *Acta Schientiarum. Technology*, 37(3), 371-378.
- Capdevila, J. F., Ruiz, J. M., Salinas, J. L., & Sánchez Pérez, E. A. (2010). Redes neuronales y algoritmos genéticos en la docencia en las escuelas de ingenieros: Un problema práctico de diseño de pantallas acústicas. *Modelling in science education and learning*, 3(2), 17-27.
- Casas, N. (2010). Teoría de las restricciones o cuellos de botella. *Revista M&M*, 81-86.
- Castellano Méndez, M. (2009). *Modelización estadística con Redes Neuronales. Aplicaciones a la Hidrología, Aerobiología y Modelización de procesos*. La Coruña.
- Celestino Guajardo, F. A. (2017). *Simulación de termo-fromado de un vidrio con aplicación automotriz*. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Corrales C., S. (2010). La industria del vidrio en el noroeste de México. *Trayectorias*, 12(30), 95-118.
- Coss Bu, R. (1999). *Simulación un enfoque práctico*. México: Limusa.
- Duran Cabrera, V. H. (2014). *Estudio técnico de factibilidad para la creación de una empresa manufacturera de parabrisas templados para vehículos México*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andres.
- Faundes Berkhoff, J. A. (2014). *Análisis del rendimiento del algoritmo OptQuest para optimización en la simulación*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Félez Blasco, A. (2014). *Modelización y simulación con Simio de procesos industriales y logísticos*. Zaragoza, España.
- Flórez López, R., & Fernández Fernández, J. M. (2008). *Las redes neuronales artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. España: Netbiblo.
- Fogg, E. (24 de Septiembre de 2020). *Takt time vs cycle time vs lead time. Definitions and calculations*. Obtenido de Machinometrics: <https://www.machinometrics.com/blog/takt-time-vs-cycle-time-vs-lead-time>
- Fu, M. C., Glover, F. W., & April, J. (2005). Simulation optimization: a review, new developments, and applications. *Proceedings of the Winter simulation conference*, 83-95.
- Fuentes Rosas, L., López Cabrera, A. G., & Rojas Mora, L. (2021). Determinación del número óptimo de unidades en un sitio de taxis, usando simulación en Simio. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 1(7), 76-80.

- García Remigio, C. M., Cardenete, M. A., Campoy Muñoz, P., & Venegas Martínez, F. (2020). Valoración del impacto de la industria automotriz en la economía mexicana: una aproximación mediante matrices de contabilidad social. *El trimestre económico*, 84(2), 437-461. doi:10.20430/ete.v87i346.852
- Glover, F. (1997). A template for scatter search and path relinking. *Lecture Notes in Computer Science*, 1-53.
- Heizer, J., & Render, B. (2009). *Principios de administración de operaciones* (Septima ed.). Estado de México: Pearson Education.
- Hernández Matías, J. C., & Vizán Idoipe, A. (2013). *Lean Manufacturing: Conceptos, técnicas e implementación*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.
- Herrera García, A., Moreno Quintero, E., & Martner Peyrelongue, C. (2014). Evaluación de una nueva estrategia de atención a los despegues y aterrizajes en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, para reducir los costos de operación de las aeronaves y las demoras de los pasajeros. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV(I), 51-61.
- Hoyos G., J. G., Evelio Cardona, J., & Arango, R. (2007). Control en línea con algoritmos genéticos y recocido simulado. *Scientia et Technica*, 13(35), 113-116.
- Jiménez Avelló, A., Castro Gil, M., & Costa García, J. M. (2015). *Simulación de procesos y aplicaciones*. Madrid: Dextra. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/133345>
- Kelton, W. D., S. Smith, J., & T. Sturrock, D. (2011). *Simio and simulation: Modeling, analysis, applications*. Indianapolis, India: Simio LLC.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (Quinta ed.). New York: McGraw-Hill.
- López, T., & Martínez, A. (2012). *El mundo mágico del vidrio*. Ciudad de México: Fondo de cultura económica. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/71991>
- Mans, R., Schonenberg, H., Leonardi, G., Panzarasa, S., Cavallini, A., Quaglini, S., & van der Aalst, W. (2008). Process Mining Techniques: an Application to Stroke Care. *eHealth Beyond the Horizon – Get IT There*, 136, 573-578.
- Marín Amador, J. C. (2019). *Incremento de la productividad de una línea de producción mediante simulación en Simio y Witness*. Orizaba, Veracruz: Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Melián Batista, B., & Glover, F. (2006). Introducción a la búsqueda tabú. 3, 1-36.
- Ochoa Valladolid, K. (2005). La industria automotriz de México: las expectativas de competitividad del sector de autopartes. *México y la cuenca del pacífico*, 8(26), 33-58.
- Ojstersek, R., Palcic, I., & Buchmeister, B. (2019). Real-Time manufacturing optimization with a simulation model and virtual reality. *Procedia Manufacturing*, 38, 1103-1110.
- Paredes Lino, A. (2018). *Incremento de la productividad en una empresa manufacturera mediante el mejoramiento del micro layout empleando Lean manufacturing y simulación con Simio*. Orizaba, Veracruz.
- Pearson, C., Levacic, D., Bergant, D., & Diez, M. (2009). *Manual del vidrio plano*. Buenos aires: CAVIPLAN.
- Pérez, J. F., & Riaño, G. (2007). Análisis de colas para el diseño de una cafetería mediante simulación de eventos discretos. *Revista de ingeniería*, 25, 12-21.
- Riverola, J., & Cuadrado, B. (2003). *Arte y oficio de la simulación. Un entorno completo y su uso en la mejora de los servicios*. España: EUNSA. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/47455>

- Rodríguez Quintero, J. G. (2016). *Diseño de un plan de optimización para la aplicación de Prymer en los parabrisas de las líneas Sail y Spark M200-M300*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Simio LLC. (s.f.). *OptQuest add in for Simio*. Obtenido de <https://www.simio.com/software/OptQuest.php>
- Smith, J. S., & Sturrock, D. T. (2021). *Simio and simulation: Modeling, analysis applications* (Sexta ed.). Simio LLC. Obtenido de <https://textbook.simio.com/SASMAA/front-matter.html>
- Tinoco Chamaidan, E. P. (2017). *Simulación del proceso de fabricación de un circuito electrónico basado en eventos discretos*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Urquía Moraleda, A., & Martín Villalba, C. (2013). *Modelado y simulación de eventos discretos*. Madrid: UNED. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/48697>
- Vanalle, R. M., Lucato, W. C., Vieira Júnior, M., & D. Sato, I. (2012). Uso de la simulación Monte Carlo para la toma de decisiones en una línea de montaje de una fábrica. *Información Tecnológica*, 23(4), 33-44.
- Vieira, A. A., Dias, L. S., Santos, M. Y., Pereira, G., & Oliveira, J. A. (2018). Simulation of an automotive supply chain in SIMIO: Data model validation. *European Modeling and Simulation Symposium*, 294-301. Obtenido de <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/66686?mode=full>
- Villegas Broncano, M. Á., Durán Suárez, J. A., Sorroche Cruz, A., & Fernández Navarro, J. M. (2017). *La escultura en vidrio*. Granada: Editorial universidad de Granada. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/itorizababiblio/48212>