

Simulación de eventos discretos aplicada al análisis de escenarios de reconversión industrial en
una empresa manufacturera.

Silvia Alejandra Ayala Hernández y Luis Alejandro Jácome Julio

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Edwin Alberto Garavito Hernández

Magister en Ingeniería Industrial

Codirector

Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Magíster en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios nuestro creador todo poderoso por darme las habilidades, el conocimiento, la constancia y la sabiduría necesaria para cumplir esta meta de mi vida.

A mi padre Alfredo Jácome y mi madre Neidy Julio por forjar la persona que soy y ser dos figuras indispensables promotoras de mis sueños.

A mis hermanos Diego y Jose por su apoyo incondicional, por sus consejos de superación y por enseñarme que los malos momentos son lecciones de vida que me permiten madurar, crecer y ser mejor persona.

A mis amigos Dubán y Cristian por creer, apoyarme, motivarme en cada etapa del proyecto y enseñarme que la lealtad es ese respeto y fidelidad que nos une como hermanos para la vida.

Luis Alejandro Jácome Julio

A mi madre, por el amor, el sacrificio y el esfuerzo que desde siempre ha dado por mí.

Por ser mi mayor fortaleza y mi inspiración diaria para alcanzar mis sueños.

A mi padre, por ser mi ejemplo de constancia y de fortaleza ante las adversidades. Por demostrarme lo que es el amor verdadero y creer en mí siempre.

A mis abuelas, por su cariño que me hizo sentir mejor, sus cuidados que me hicieron fuerte y por su amor y apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

Silvia Alejandra Ayala Hernández

Agradecimientos

A Dios, por darnos fortaleza, sabiduría y paciencia para culminar con éxito nuestros estudios profesionales.

A el profesor Edwin Alberto Garavito Hernández y la profesora Laura Yeraldín Escobar Rodríguez por su acompañamiento y apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y todos sus consejos y recomendaciones.

A nuestras familias, por ser el ancla, el consuelo, el soporte y la motivación durante todo este camino.

A nuestros amigos, por todos los momentos inolvidables y por estar presentes en nuestras vidas.

Al grupo de investigación Opalo, por su constante colaboración y apoyo en el proyecto.

A mi compañero, por sus consejos, paciencia y exigencia que hicieron de este proyecto un gran trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	15
1. Generalidades del Proyecto	18
1.1 Título	18
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Planteamiento del problema.....	19
1.4 Justificación	21
2. Metodología de investigación.....	24
2.1 Revisión de literatura en bases de datos científicas	24
2.2 Modelado de sistema de producción	26
2.2.1 Formulación del problema y sus objetivos	27
2.2.2 Construcción del modelo conceptual.....	27
2.2.3 Recolección y tratamiento de datos.....	27
2.2.4 Construcción del modelo computacional.....	28
2.2.5 Validación y verificación.....	28
2.2.6 Configuración de experimentos	29
2.2.7 Ejecución, análisis y evaluación de escenarios alternativos	29
3. Revisión de Literatura Científica	30

3.1 Análisis de literatura.....	30
3.1.1 Elementos a considerar	30
3.1.2 Aplicaciones de la simulación de eventos discretos en sistemas de manufactura	37
4. Marco metodológico para el desarrollo de proyectos de simulación en sistemas de manufactura	45
4.1 Definición de Objetivos.....	46
4.2 Modelo conceptual para el desarrollo de proyectos de simulación.....	47
4.2.1 Caracterización de entidades.....	48
4.2.2 Caracterización de procesos.....	53
4.2.3 Caracterización de recursos	54
4.3 Modelo Computacional	55
4.3.1 Definir el modelo digital.....	56
4.3.2 Implementar los objetos visuales del software FlexSim en el plano.....	57
4.3.3 Caracterizar el sistema siguiendo los parámetros del modelo conceptual.....	57
4.3.4 Realizar pruebas de corrida del modelo computacional	58
4.4 Verificación	58
4.5 Validación.....	60
4.6 Experimentación	62
5. Caso de estudio empresa manufacturera en Santander	65
5.1 Definición de Objetivos.....	65
5.2. Modelo Conceptual para el desarrollo del proyecto de simulación	66
5.2.1 Caracterización de las entidades	66
5.2.1.1 Eventos.....	67

5.2.1.2 Atributos.	69
5.2.1.3 Variables globales del sistema.	69
5.2.1.4 Medidas de efectividad o desempeño.	70
5.2.1.5 Localizaciones.	70
5.2.1.6 Principales Materias Primas.	71
5.2.2 Caracterización de los procesos	73
5.2.2.1 Definición del sistema productivo real.	73
5.2.2.2 Diagrama de Operaciones.	75
5.2.2.3 Descripción del proceso productivo.	76
5.2.3 Caracterización de los recursos.	78
5.2.3.1 Recursos.	78
5.3 Modelo Computacional	79
5.3.1 Definición del modelo formal en FlexSim	79
5.3.1.1 Determinación de tiempos de procesamientos.	80
5.3.2 Fixed Resources	85
5.3.2.1 Source/Fuente.	85
5.3.2.2 Queue/Fila.	87
5.3.2.3 Processor/Procesador.	89
5.3.2.4 Combiner.	91
5.3.3 TaskExecuters	93
5.3.3.1 Operator/Operario.	93
5.3.2.2 Dispatcher.	93
5.3.4 Controladores	94

5.3.4.1 Triggers/Gatillos.....	94
5.3.5 Asignación de atributos al modelo	95
5.3.6 Variables Globales	96
5.3.7 Medidas de Desempeño	98
5.3.8 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)	100
5.4 Verificación del modelo	103
5.5 Validación del modelo	105
5.5.1 Intervalo de confianza para el sistema real.....	106
5.5.2 Intervalos de confianza para el modelo computacional.....	107
5.6 Experimentación y análisis de las medidas de desempeño.....	109
5.6.1 Escenarios de Reconversión Industrial.....	111
5.6.1.1 Redistribución de planta.	113
5.6.1.2 Compra de sistema para reforzar el proceso de laminado.	119
5.6.1.3 Compra de centro de mecanizado para reforzar el área de accesorios.	121
5.6.2 Análisis de medidas de desempeño	124
5.6.2.1 Análisis redistribución de planta.	124
5.6.2.2 Análisis compra de sistema para refuerzo del proceso de laminado.	128
5.6.2.3 Análisis compra de centro de mecanizado para reforzar el área de accesorios.	132
6. Conclusiones	137
7. Recomendaciones.....	139
Referencias Bibliográficas.....	142

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tabla de cumplimiento de objetivos.....	17
Tabla 2. Criterios de Segmentación	73
Tabla 3. Descripción del proceso productivo	76
Tabla 4. Tiempos de procesamiento para el proceso productivo.....	81
Tabla 5. Recursos fijos y ejecutores de tarea del modelo	84
Tabla 6. Fuentes empleadas en el modelo de simulación.....	85
Tabla 7. Tiempos de procesamiento by percentage en los diferentes procesos	90

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Declaración prisma de Urrutia	25
Figura 2. Metodología para modelar el sistema.....	26
Figura 3. Metodología SLP	36
Figura 4. Proceso adaptado para el desarrollo y la validación	42
Figura 5. Etapas para el desarrollo de proyectos de simulación en sistemas de manufactura	46
Figura 6. Configuración de una fila en el modelo conceptual.....	50
Figura 7. Configuración de un combinador en el modelo conceptual	51
Figura 8. Configuración de un separador en el modelo conceptual.....	52
Figura 9. Interrelación de algunos diagramas del modelo conceptual.....	53
Figura 10. Diagrama de flujo para la construcción de un modelo computacional	56
Figura 11. Distribución de la planta actual.....	68
Figura 12. Adaptación de la planta de producción en SketchUp.....	71
Figura 13. Diagrama de Operaciones.....	75
Figura 14. Modelo Computacional en el software FlexSim.....	80
Figura 15. Configuración para envío del mensaje y creación del flowitem.....	88
Figura 16. Pestaña Labels de un Flowitem.....	96
Figura 17. Configuración de las variables globales	97
Figura 18. Interfaz Gráfica de Usuario.....	101
Figura 19. Tiempo medio de Flujo Spa.....	108

Figura 20. Tiempo medio de flujo Piscina	108
Figura 21. Tiempo medio de flujo Tina	109
Figura 22. Componentes de la reconversión industrial	112
Figura 23. Diagrama Multiproducto	114
Figura 24. Matriz Origen Destino	115
Figura 25. Análisis de movimientos	115
Figura 26. Análisis de transferencia por pares	116
Figura 27. Índice de similitud.....	116
Figura 28. Matriz Relación de Actividades	117
Figura 29. Diagrama relación de actividad.....	118
Figura 30. Propuesta para la nueva distribución de planta.....	119
Figura 31. Pistola de pulverización de resina	121
Figura 32. Centro de mecanizado CNC	123
Figura 33. Nueva distribución de planta en el software Flexsim	125
Figura 34. Utilización de los operarios del sistema real y nueva distribución de planta	127
Figura 35. Tiempo medio de flujo spa	128
Figura 36. Tiempo medio de flujo piscina	129
Figura 37. Tiempo medio de flujo tina.....	130
Figura 38. Tiempos de operación proceso laminado del sistema real y escenario propuesto	131
Figura 39. Utilización de los operarios proceso laminado del sistema real y escenario propuesto	132
Figura 40. Tiempo medio de flujo spa	133
Figura 41. Tiempo medio de flujo piscina	134

Figura 42. Tiempo medio de flujo tina.....	135
Figura 43. Tiempos de operación proceso accesorios del sistema real y escenario propuesto ...	136
Figura 44. Utilización de los operarios proceso accesorios del sistema real y escenario propuesto	137

Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Modelo computacional con adaptaciones para la GUI

Apéndice B. Modelo conceptual del sistema real

Apéndice C. Descripción códigos de programación

Apéndice D. Descripción códigos de usuario

Apéndice E. Conceptualización básica de modelos de manufactura bajo el paradigma FlexSim

Apéndice F. Análisis bibliométrico en Vantage Point

Apéndice G. Modelo Conceptual de la práctica

Apéndice H. Datos de tiempos de procesamiento por referencia

Apéndice I. Escenario 1

Apéndice J. Escenario 2

Apéndice K. Escenario 3

Apéndice L. Modelo Computacional verificado y validado

Apéndice M. Artículo académico de carácter publicable

Apéndice N. Análisis Bibliométrico

Resumen

Título: Simulación de eventos discretos aplicada al análisis de escenarios de reconversión industrial en una empresa manufacturera *

Autores: Silvia Alejandra Ayala Hernández y Luis Alejandro Jácome Julio **

Palabras clave: Simulación de eventos discretos, reconversión industrial, producción, manufactura, sistemas productivos, tecnología, reconversión de la producción, evaluación de escenarios.

Descripción:

El sector industrial juega un papel crucial en la economía de un país, de este modo se debe fortalecer la capacidad mediante procesos de transformación que vinculen las cadenas productivas con la innovación. En este sentido, la aplicación de la simulación de eventos discretos permite evaluar escenarios con miras a mejorar los sistemas productivos, al presentar una herramienta para fundamentar las decisiones de producción y un bosquejo de los resultados que obtendrían al permitir analizar cada proceso que conforma la cadena de producción a fin de identificar falencias, plantear escenarios de mejora y estudiar su comportamiento en tiempo real.

La presente investigación presenta un caso de estudio sobre el uso de la simulación de eventos discretos para el proceso de producción de una fábrica de accesorios para zonas húmedas que pretende validar una propuesta metodológica como refuerzo de los proyectos de mejoramiento de procesos para intervenir un sistema productivo y comprender los puntos críticos de los procesos de producción de una organización y con estos, modelar diferentes soluciones que aumenten la productividad mediante herramientas de simulación en un contexto local. El modelo se utiliza para comparar los diferentes escenarios planteados con respecto al sistema real de la empresa y detallar como la estructura en general mejora su flexibilidad, garantice buenas medidas de desempeño y reduce los cuellos de botella.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Edwin Alberto Garavito Hernández, Magister en Ingeniería Industrial. Codirector: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez, Magister en Ingeniería Industrial

Abstract

Title: Simulation of discrete events applied to the analysis of industrial conversion scenarios in a manufacturing company*

Authors: Silvia Alejandra Ayala Hernández y Luis Alejandro Jácome Julio**

Key words: Simulation of discrete events, industrial conversion, production, manufacturing, production systems, technology, production conversion, scenario assessment.

Description:

The industrial sector plays a crucial role in any country's economy; therefore capacity must be strengthened through transformation processes linking production chains with innovation. In this sense, the application of discrete event simulation enables a significant improvement in the performance of manufacturing processes by presenting a tool to inform production decisions and an outline of the results they would get by allowing you to analyze each process that makes up the production chain to identify fallacy, raise improvement scenarios, and study its behavior in real time. This research presents a case study on the use of discrete event simulation for the production process of a wet accessories factory that aims to validate a methodological proposal as a reinforcement of process improvement projects to intervene a production system and understand the critical points of an organization's production processes and with them, model different solutions that increase productivity through simulation tools in a local context. The model is used to compare the different scenarios raised with respect to the actual system of the company and detail how the structure in general improves its flexibility, ensures good performance measures and reduces bottlenecks.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Advisor: Edwin Alberto Garavito Hernández, M.Sc. Industrial Engineering. Co-advisor: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez, M.Sc. Industrial Engineering.

Introducción

La globalización de la economía mundial ha desatado la competencia en mercados locales e internacionales, obligando a las empresas a mejorar en la calidad y los precios de los productos para ampliar su alcance y mantener la fidelidad de sus clientes. Una de las formas de enfrentar los retos de la globalización consiste en incrementar la eficiencia productiva, mediante un proceso de reestructuración, permitiéndole a las industrias recuperar su competitividad (Jaramillo Jaramillo, 2012).

En Colombia, la industria manufacturera es una actividad fundamental en la economía, según la Encuesta Anual Manufacturera de 2019 realizada por el DANE, de los 7.631 establecimientos industriales de los que se obtiene información ocupan un total de 705.999 personas, otorgándole empleo al 3% de la población económicamente activa. Por otra parte, estos establecimientos registran una producción bruta de \$273,8 billones, un consumo intermedio de \$177,4 billones y un valor agregado de \$96,4 billones, la cual tiene un aumento del 1,6% con respecto al año anterior que influye a su vez en el crecimiento del PIB, demostrando la necesidad de dar una mirada al tema de la manufactura para mejorar la productividad y así apoyar la economía del país.

Actualmente, los métodos más empleados para realizar mejoras en la industria están relacionados con conceptos de manufactura esbelta e incluyen búsquedas del tesoro, mapeo de flujo de valor, Six Sigma y eventos Kaizen. La mayoría de estos métodos se basan en la observación empírica y el análisis básico. Sin embargo, las empresas recopilan datos del proceso de diversos sistemas de control y supervisión en la planta y los almacenan en bases de datos, en

donde, se consideran vitales para comprender un proceso, porque a través de unos datos precisos y oportunos se puede realizar el análisis adecuado para eliminar ineficiencias y desperdicios (Michaloski et al., 2013).

La recopilación de estos datos contribuye a un mejor entendimiento de cómo opera el sistema y se convierte en un punto de partida para analizar los factores, variables y condiciones que influyen durante el proceso, al permitir la creación de diferentes modelos que permitan predecir el comportamiento del sistema.

Para ello, la simulación ofrece una alternativa para conocer de forma acertada los puntos críticos que pueden tener los procesos de producción de una empresa y con ellos modelar soluciones que incrementen la eficiencia y mejoren las medidas de desempeño del sistema en las diferentes actividades realizadas durante la producción de un artículo o la prestación de un servicio. Donde sin importar, la técnica de simulación empleada, la literatura demuestra que es una herramienta fundamental para optimizar el sistema productivo de las empresas (Sánchez et al., 2015).

Dicho lo anterior, es necesario llevar a cabo un proyecto de investigación que tenga como objetivo el análisis de los procesos que conforman la cadena de producción de una empresa manufacturera mediante una simulación de eventos discretos (Discrete event simulation, DES), de manera que se pueda desarrollar un recurso experimental que permita identificar las falencias y plantear diferentes escenarios de mejora, para determinar cuál de ellos brinda el mejor resultado si fuera implementado.

Por tal razón, en el presente documento se presenta el libro del proyecto; constituido por: las generalidades del proyecto, el marco teórico, la metodología de investigación que se desarrolla, una revisión de literatura científica, un modelo metodológico para el desarrollo de proyectos de

simulación en sistemas de manufactura, el desarrollo y verificación del modelo, la validación del modelo, la experimentación y el análisis de las medidas de desempeño, las conclusiones y, finalmente, la recomendaciones para futuros trabajos. Con lo anterior, se da cumplimiento objetivos propuestos para el proyecto (Ver Tabla 1).

Tabla 1.

Tabla de cumplimiento de objetivos

Objetivos	Apartado Relacionado
Identificar aplicaciones de simulación discreta en procesos de reconversión industrial en manufactura, a partir de una revisión de literatura.	Numeral 3
Caracterizar un sistema productivo a partir del análisis de datos e información de los componentes.	Numeral 5
Desarrollar el modelo de simulación en el software FlexSim.	Numeral 5
Evaluar escenarios de reconversión industrial a partir de la experimentación y el análisis de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.	Numeral 7
Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada.	Apéndice M

1. Generalidades del Proyecto

1.1 Título

Simulación de eventos discretos aplicada al análisis de escenarios de reconversión industrial en una empresa manufacturera.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar escenarios de reconversión industrial en el sistema productivo de una empresa de manufactura a partir del desarrollo de modelos de simulación de eventos discretos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar aplicaciones de simulación discreta en procesos de reconversión industrial en manufactura, a partir de una revisión de literatura.
- Caracterizar un sistema productivo a partir del análisis de datos e información de los componentes.
- Desarrollar el modelo de simulación en el software FlexSim.

- Evaluar escenarios de reconversión industrial a partir de la experimentación y el análisis de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada.

1.3 Planteamiento del problema

Las exigencias del desarrollo económico actual obligan a las empresas a estar en una transformación permanente, anticipándose al futuro y dinamizando el mercado. Por lo cual, se manifiesta la necesidad de crear estrategias que le den relevancia a la presencia y el desarrollo de las pymes mediante programas de reestructuración industrial para mejorar la competitividad y a su vez minimizar los costos asociados a la producción.

En Colombia, según las estadísticas proporcionadas por el DANE, para el segundo trimestre del año 2020, la economía decreció un 15.7%, siendo las industrias manufactureras una de las actividades económicas que más contribuyen a la disminución del PIB, puesto que tuvo un declive de 25.4%, es decir, -3.1 puntos porcentuales a la variación anual. Por otro lado, en el periodo de enero a septiembre con respecto al año anterior, el índice de producción industrial (IPI) presento una variación negativa de 10.9%, del cual el sector manufacturero presentó -10.6%.

En relación con lo anterior, es importante resaltar que se debe fortalecer el sector industrial proporcionando las herramientas necesarias para lograr una rápida recuperación, y solo la eficiencia en la producción les permitirá a las empresas cumplir con los objetivos propuestos, pues las tecnologías progresan diariamente sin cesar y la duración de los productos disminuye cada vez

más. Todo esto afirma el hecho de que no se podrá llevar a cabo una modernización productiva sin nuevos desarrollos tecnológicos (Jaramillo Jaramillo, 1993).

En mayo del año 2020, se reúnen en el foro del periódico La República ‘Cómo se reactiva la industria manufacturera’ José Manuel Restrepo, ministro de Comercio, Industria y Turismo; Rosmery Quintero Castro, presidente nacional de la Asociación Colombiana de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (Acopi), entre otros empresarios de la industria, donde se afirmó que se tendrá que avanzar en un proceso de reindustrialización y fortalecer la capacidad industrial, acompañando a las empresas en procesos de transformación no solo tecnológica, sino de procesos industriales, para desarrollar cadenas productivas que vinculen innovación. De esta manera, se incentiva en los jóvenes la capacidad de generar nuevos conocimientos e impulsar estos nuevos procesos (Vita Mesa, 2020).

Es por esto por lo que la tecnología de simulación juega un papel importante al contribuir a la toma de decisiones operativas, tácticas y estratégicas, permitiendo la evaluación rápida de los posibles escenarios para identificar las potenciales mejoras al sistema. Por tal razón, es correcto afirmar que un tema clave para la pronta recuperación de nuestra industria sería combinar las técnicas de mejora de la producción con la simulación de eventos discretos, puesto que nos permite analizar la eficiencia de los equipos en los sistemas de producción, cambiar diferentes condiciones y observar los resultados en el modelo para tener una perspectiva inicial si las mejoras a realizar son más beneficiosas en comparación a los costos en los que se incurriría al llevar a cabo la simulación.

Ahora bien, el presente proyecto es una contribución metodológica para el refuerzo de los proyectos de mejoramiento de procesos. La pandemia derivada por la propagación de la COVID-19 que inicio en marzo del 2020 ha traído consigo grandes cambios que afectan la realización de

los proyectos apoyados en el trabajo de campo, por ende, se deben explorar diferentes estrategias que permitan medir las implementaciones y evaluar, a partir del contraste de indicadores, el desarrollo de las propuestas de mejora.

De acuerdo con lo anterior, con el presente proyecto se pretende validar una propuesta metodológica, que permita intervenir un sistema productivo mediante herramientas de simulación en un contexto local como lo es el sector manufacturero en el departamento de Santander. Dicho lo anterior, se propone el uso del software FlexSim que presenta herramientas, recursos y, en general un paradigma diferente, contrastado con otras herramientas de simulación digital que se han empleado para los trabajos realizados por otros autores. Como componente adicional, se desarrollarán Interfaces Gráficas de Usuario (*Graphical User Interface*, GUI) que, al igual que la simulación, es un recurso para hacer del recurso experimental lo más accesible al usuario que no tiene experiencia ni conocimiento en simulación ni en la herramienta de software, que proporciona un apoyo a la toma de decisiones, ayudando a abordar la incertidumbre y la variabilidad de los parámetros que constituyen un sistema. Esta herramienta permite a otras partes interesadas que, aunque no estén familiarizadas con el software puedan manejarlo y realizar diferentes modificaciones para futuros estudios sin estar capacitados completamente en el manejo de este.

1.4 Justificación

La simulación es un tema que ha cobrado gran importancia dentro de la educación, puesto que le permite al estudiante afrontar situaciones de la vida real desde una perspectiva particular. Además de proporcionarle técnicas, herramientas y métodos que lo incorporen en la construcción del conocimiento y le proporcione nuevas formas de experiencia y aprendizaje. De esta manera, el

estudiante puede realizar la formulación, exploración y aprendizaje de un gran número de hipótesis y de nuevos modelos mentales, emocionales y experienciales. Por esta razón, es fundamental partir del desarrollo de modelos teóricos que nos permitan estudiar el comportamiento de las organizaciones desarrollando métodos y herramientas que permitan la incursión de estos modelos en casos de empresas reales mediante simulaciones, que nos ofrecen modelos dinámicos que facilitan el aprendizaje (Huynh et al., 2020).

En la actualidad la necesidad de encontrar soluciones efectivas a diferentes problemas que se presentan en las organizaciones ha impulsado el desarrollo de un sinnúmero de software que hagan que el análisis de las problemáticas y soluciones a las mismas sean más rápidas y con mayor credibilidad. Particularmente, la simulación de estos sistemas ha tenido diversas alternativas de seguimiento a partir del desarrollo de lenguajes de programación y software comerciales. En consonancia con lo anterior, es necesario definir lo que es simulación, que según Shannon (1987) es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real, y así conducir experimentos que pretendan entender el comportamiento del sistema o evaluar distintas estrategias que se encuentren dentro de los límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios para la operación del sistema.

Por otra parte, las empresas manufactureras a diario se enfrentan con diversos desafíos como la planificación y gestión de la producción para cumplir con los requisitos del mercado y mejorar la productividad. Por ello, las herramientas de simulación desempeñan un papel fundamental para que las empresas de fabricación se enfrenten a estas adversidades. De diversas formas, las aplicaciones efectivas de técnicas de simulación pueden mejorar significativamente el rendimiento de los procesos de fabricación en diferentes fases, como la planificación, la implementación y las fases operativas, puesto que el modelado y la simulación de sistemas

industriales les brinda a las empresas una herramienta para fundamentar sus decisiones de producción y un bosquejo de los resultados que obtendrían con ella sin representar una inversión significativa.

Jaramillo Jaramillo, (1993) define la reconversión industrial como la “destrucción creativa”, es decir, el abandono de viejos métodos de trabajo y productos y su reemplazo por nuevos, tomando una actitud innovadora para poder adaptar las empresas a un entorno donde el cambio y la renovación forman parte del curso normal de las cosas. Además, se enfatiza en que la competitividad en el mercado solo se logra con eficiencia en la producción, logrando flexibilizar tanto la capacidad instalada como el manejo del personal. Así, es importante realizar en primer lugar una reconversión de la producción para atender las todas las condiciones que permitan ofrecer un producto diferenciado empleando estrategias como la búsqueda de tecnologías de punta, el realizar procesos de investigación y desarrollo o actividades de transferencia de tecnología, la integración de sistemas administrativos de mayor participación, entre otros.

Con el fin de apoyar a las empresas en la aplicación de estas estrategias, el departamento de Santander, en su Plan Regional de Competitividad (PCR) 2018-2032, elige como uno de sus tres pilares la productividad empresarial, puesto que, al ser influyente en la internalización de la economía, es un punto crucial en la mejora de la competitividad. En este pilar, se pretende realizar un acompañamiento productivo a las microempresas al incrementar el número de ellas que participan en programas de mejora de la productividad ofrecidos por el Gobierno Nacional y, asimismo, el porcentaje de empresas que implementan planes de incremento de la misma.

Por lo mencionado anteriormente, en el grupo de investigación OPALO, los trabajos de investigación pretenden promover el desarrollo empresarial a través del desarrollo de modelos de gestión, y que se generan a partir del conocimiento que se tiene en modelos de optimización,

simulación, manufactura inteligente, entre otros. Así, los estudiantes pueden contribuir al desarrollo de las empresas de la región santandereana brindando herramientas de simulación que sirvan para resolver problemas de sistemas productivos en busca de la mejora de la productividad.

Finalmente, se plantea un proyecto de simulación, como alternativa para comprender de manera adecuada los puntos críticos que tienen los procesos de producción de una organización y con estos, modelar diferentes soluciones que aumenten la productividad de las actividades realizadas durante la producción de un artículo, y se fundamenta la elección de la empresa manufacturera debido a la disponibilidad de datos secundarios para la validación del modelo creado, donde se represente el comportamiento de todas las operaciones del sistema real en la medida que evoluciona en el tiempo, permitiendo entenderlo en detalle y con ello crear estrategias que lo hagan más eficiente, anticipando los posibles resultados y los problemas que puedan presentarse.

2. Metodología de investigación

2.1 Revisión de literatura en bases de datos científicas

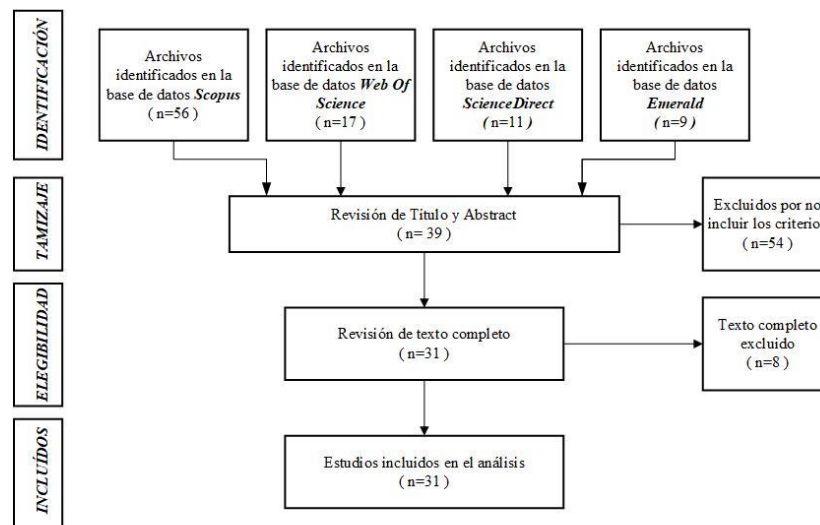
La metodología que se emplea en la elaboración de esta fase del proyecto es una adaptación de la declaración PRISMA de Urrutia, la cual, a diferencia de QUORUM, viene acompañada de un extenso documento donde se explica cada uno de los 27 ítems propuestos, así como el proceso de elaboración de estas directrices. Igualmente, incorpora varios aspectos conceptuales y

metodológicos novedosos como el carácter iterativo del proceso de desarrollo de una revisión sistemática, la evaluación del riesgo de sesgo al nivel de los estudios o de los resultados, entre otros (Urrútia & Bonfill, 2010).

La metodología inició con la revisión preliminar de literatura en bases de datos científicas hasta la construcción de la ecuación de búsqueda, tomando como referencia los siguientes criterios de exclusión: Artículos en inglés y español únicamente, empleo de alguna herramienta de simulación, familiarización de los términos asociados a la búsqueda, empresas manufactureras, investigación de operaciones, entre otros. Así, se obtiene un resumen de artículos elegidos en diferentes bases de datos siguiendo la estructura de la figura 1.

Figura 1.

Declaración prisma de Urrutia

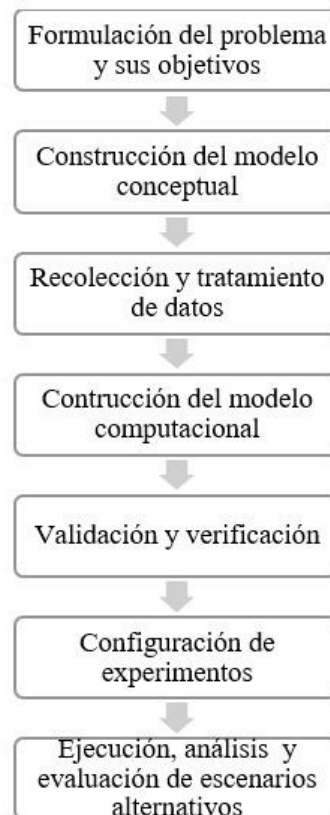


2.2 Modelado de sistema de producción

La finalidad principal, del presente proyecto de trabajo de grado, es analizar el proceso de producción actual y proponer alternativas que mejoren el desempeño productivo de la empresa manufacturera tomada como referencia de caso de estudio. Para el diseño y evaluación de las configuraciones productivas se recurre a modelos de simulación por eventos discretos, de acuerdo con la metodología (Ver figura 2) propuesta por Concannon et. al. (2007, p. 35-40), Chung (2004, p. 59-60), Guasch et. al. (2003, p. 18-20) y Law y Kelton (2000, p. 83-86).

Figura 2.

Metodología para modelar el sistema



2.2.1 Formulación del problema y sus objetivos

Para iniciar con un estudio de simulación se debe realizar una correcta formulación del problema para definir los objetivos globales del estudio y las preguntas específicas a las que se les dará respuesta, las medidas de desempeño que van a ser usadas para evaluar la efectividad de cada escenario planteado, el alcance que va a tener, el marco de tiempo, los recursos y el software que se va a emplear.

2.2.2 Construcción del modelo conceptual

Un modelo conceptual tiene como propósito, organizar y representar, de manera semi formal y unívoca, el conocimiento en un área o campo específico asociado a un sistema de gestión o de información (Planeación, 2013).

Se debe llevar a cabo un análisis previo del sistema que se desea modelar para lograr una definición exacta del mismo, que permita conceptualizar el funcionamiento del sistema de producción, describiendo lo que el sistema necesita hacer y la correlación de las distintas actividades.

2.2.3 Recolección y tratamiento de datos

Se recolectan y se procesan los datos necesarios para describir el comportamiento de los diversos parámetros del modelo conceptual, estos son provistos por registros históricos y mediciones realizadas al sistema real. La información suministrada fue producto de análisis de

reportes facilitados por la empresa, la cual contiene datos sobre la producción mensual, cantidad y tipo de máquinas, cantidad de operarios, diagramas de información, estudios de tiempos, entre otros.

2.2.4 Construcción del modelo computacional

Para la construcción del modelo de simulación se emplea el software FlexSim, que permite modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier proceso industrial. En el software, se desarrolla el modelo verificando que se comporte de acuerdo con los parámetros definidos con la información ya previamente analizada y validada, arrojando resultados que tengan similitud con el comportamiento real y permitan comprender el sistema con mayor detalle.

2.2.5 Validación y verificación

En esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores durante la elaboración e implementación del modelo y se corrobora la exactitud del modelo desarrollado siendo sometido a pruebas para verificar su comportamiento y validar sus resultados.

Según Sargent (2013) la verificación consiste en asegurar que el modelo computarizado y su implementación sean correctos y la validación como la prueba de que un modelo dentro de su dominio de aplicabilidad posee un rango satisfactorio de exactitud consistente con la aplicación pronosticada del modelo.

Además, es importante definir las variables de interés como las medias y las varianzas que son las principales que se utilizan para determinar la validez del modelo. De este modo, se le brinda

al usuario credibilidad y confianza para usar el modelo y la información que se deriva de él. No obstante, este es un proceso iterativo pues debe realizarse cada vez que se le hace un cambio al modelo repitiéndose hasta comprobar su validez operativa.

2.2.6 Configuración de experimentos

La experimentación del modelo se realizará una vez este haya sido validado comparándolo contra el sistema real. Es importante resaltar que en esta etapa se realizan la simulación acorde al diseño realizado previamente. Los resultados arrojados son debidamente recolectados y procesados.

2.2.7 Ejecución, análisis y evaluación de escenarios alternativos

En esta fase se concretan las características respectivas de los escenarios a realizar, el tiempo de simulación y el número de corridas. Además, se interpretan los resultados que arroja el software de simulación y acorde a esto se toman las correspondientes decisiones u opiniones para los resultados del proyecto en curso. Si lo requiere, se recolectan datos adicionales para ajustar la estimación de parámetros críticos.

3. Revisión de Literatura Científica

La revisión de literatura científica contiene dos elementos; el primero es el análisis bibliométrico enfocado en cómo se realiza la investigación para obtener la ecuación de búsqueda que permite conocer sobre los diversos estudios realizados anteriormente aplicando la simulación de eventos discretos en empresas manufactureras que se describe en el Apéndice N. El segundo es el análisis de literatura enfocado en los conceptos importantes extraídos de la investigación y por ende las diversas aplicaciones de la simulación de eventos discretos en sistemas de manufactura obtenidos de esta.

3.1 Análisis de literatura

3.1.1 Elementos a considerar

Avanzando con el razonamiento, se expone el marco conceptual de las principales temáticas que se plantean en esta investigación.

➤ **Reconversión Industrial**

Diversos autores han estructurado definiciones de la reconversión industrial:

Jaramillo Jaramillo, (1993) hace referencia a la reconversión como el proceso de adaptación del sector industrial a los cambios que ocurren durante la evolución de la actividad productiva, convirtiéndose en el abandono de viejos productos y métodos de trabajo y su reemplazo por otros nuevos. (p.2)

De igual manera, Peña, (1991) define que la reconversión industrial significa cambios en la estructura, en la composición de los productos, en la participación de los factores productivos y en otros aspectos básicos de la producción. Es un proceso normativo de adaptación a las nuevas condiciones del presente y del futuro que demanda capacidad de previsión y anticipación. (p. 205)

Arias Cordero, (1996) afirmó que consiste en la adopción de nuevos sistemas, mecanismos y procedimientos en la producción y gestión empresarial, que conduzcan al incremento de la competitividad de las empresas existentes, tanto en el mercado local como el internacional. La reconversión involucra nuevas inversiones en activos, entrenamiento y capacitación.

Además, se explica como un amplio, profundo y complejo proceso de adaptación del aparato productivo a las innovaciones tecnológicas, que tiene como propósito convertir a las ramas tradicionales, articular las cadenas productivas, fomentar el crecimiento estable de las ramas modernas y crear industrias de alta tecnología y que se recurra entre otros mecanismos a programas de inversiones y medidas de saneamiento financiero de las empresas, acompañadas de estímulos y recompensas a la investigación y producción de tecnologías. (p.77)

➤ **Simulación**

El concepto de simulación engloba soluciones para propósitos diferentes, y es el resultado del advenimiento de nuevos y mejores desarrollos computacionales, los cuales han impactado positivamente la toma de decisiones y el diseño de procesos o productos.

El comportamiento de un sistema puede ser estudiado por medio de un modelo, que, basado en la observación de situaciones reales y supuestos de ocurrencia, corresponden a su propia actividad. Estos supuestos son expresados de manera lógica y consecuente a través de representaciones simbólicas o matemáticas (funciones estadísticas) que relacionan los elementos que componen el sistema.

La simulación puede tener diferentes tipos de proceso. Uno de los más usados y sobre todo en el que se soporta el presente proyecto; se refiere a la simulación de eventos discretos, el cual esta soportado en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Este proceso consiste en relacionar los diferentes eventos que pueden cambiar el estado de un sistema bajo estudio por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas del problema que se esté analizando (García Dunna et al., 2006).

Según Shannon, (1975) la simulación es el proceso de 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 y/o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

El autor Thomas H. Naylor, (1975) describe a la simulación como una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un negocio o un sistema económico (o algún componente de ellos) en periodos extensos de tiempo real.

La “simulación” es un modo de usar un modelo Ackoff and Sasieni, (1968); es experimentar en un modelo, en vez de hacerlo en la “realidad” misma, porque experimentar en la realidad misma puede ser imposible, impráctico o inapropiado, por lo que se dice que la “simulación” es una experimentación “vicaria”; es decir, que hace las veces de otra, que simula, que finge, que disimula ser otro (Ruiz et al., 2011).

➤ **Simulación de eventos discretos**

La simulación de eventos discretos según García Dunna et al., (2006) es el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado. El objetivo del modelo de simulación

consiste en comprender, analizar y mejorar las condiciones del sistema de operación relevantes al sistema.

Por lo tanto, el sistema consiste en un conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo; desde el punto de vista de la simulación.

Los componentes del sistema son:

- **Entidad:** Es la representación de los flujos de entrada a un sistema; es el componente responsable de que el estado del sistema cambie.

- **Atributo:** Es una característica de una entidad. Los atributos son muy útiles para diferenciar entidades sin necesidad de generar una entidad nueva, y pueden adjudicarse al momento de la creación de la entidad, o asignarse y/o cambiarse durante el proceso.

- **Actividades:** Representan una acción del sistema establecida en un periodo de tiempo especificado y medido.

- **Eventos:** Es un cambio actual en el estado actual del sistema. Se pueden catalogar estos eventos en dos tipos: eventos actuales, que son aquellos que están sucediendo en el sistema en un momento dado, y eventos futuros, que son cambios que se presentaran en el sistema después del tiempo de simulación, de acuerdo con una programación específica.

- **Variables de Estado:** Son el objeto de evaluación del sistema, o el conjunto de variables necesarias para describirlo en cualquier momento y tal como lo indica su nombre, son valores que se crean o se modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas. Las variables son muy útiles para hacer conteo de piezas y ciclos de operación, así como para determinar características de operación del sistema.

- **Locaciones:** Son todos aquellos lugares en los que la pieza puede detenerse para ser transformada o esperar a serlo. Dentro de estas localizaciones tenemos almacenes, bandas transportadoras, máquinas, estaciones de inspección.

- **Llegadas:** Se le llama llegada o cola de recepción, cuando una entidad ingresa al sistema inicialmente es ubicada en una locación (cola de recepción) y se va moviendo u ocurriendo de acuerdo con el tiempo y tipo de distribución en el modelo

- **Redes de camino:** Se definen como las colas de camino que se presentan dentro del modelo simulado para lograr una actividad.

- **Recursos:** Son aquellos dispositivos diferentes a las locaciones necesarios para llevar a cabo una operación.

- **Procesos:** Describe las operaciones que toman lugar cuando una entidad está en una locación, como la cantidad de tiempo que la entidad permanece ahí, los recursos que necesita para completar el proceso y cualquier otra cosa que sucede en la locación, incluyendo seleccionar el siguiente destino.

- **Reloj de simulación:** Es el contador de tiempo de la simulación, y su función es responder preguntas tales como cuánto tiempo se ha empleado en el modelo y cuanto en tiempo se total se requiere que dure esta última.

➤ **Planificación sistemática de diseño (SLP)**

Esta metodología se sostiene de la información de productos (P), cantidades (Q), proceso y recorrido (R) y servicios (S) del problema, en el cual, por medio de un algoritmo de 10 pasos permitirá encontrar la distribución óptima o aceptable que resuelva el problema planteado.

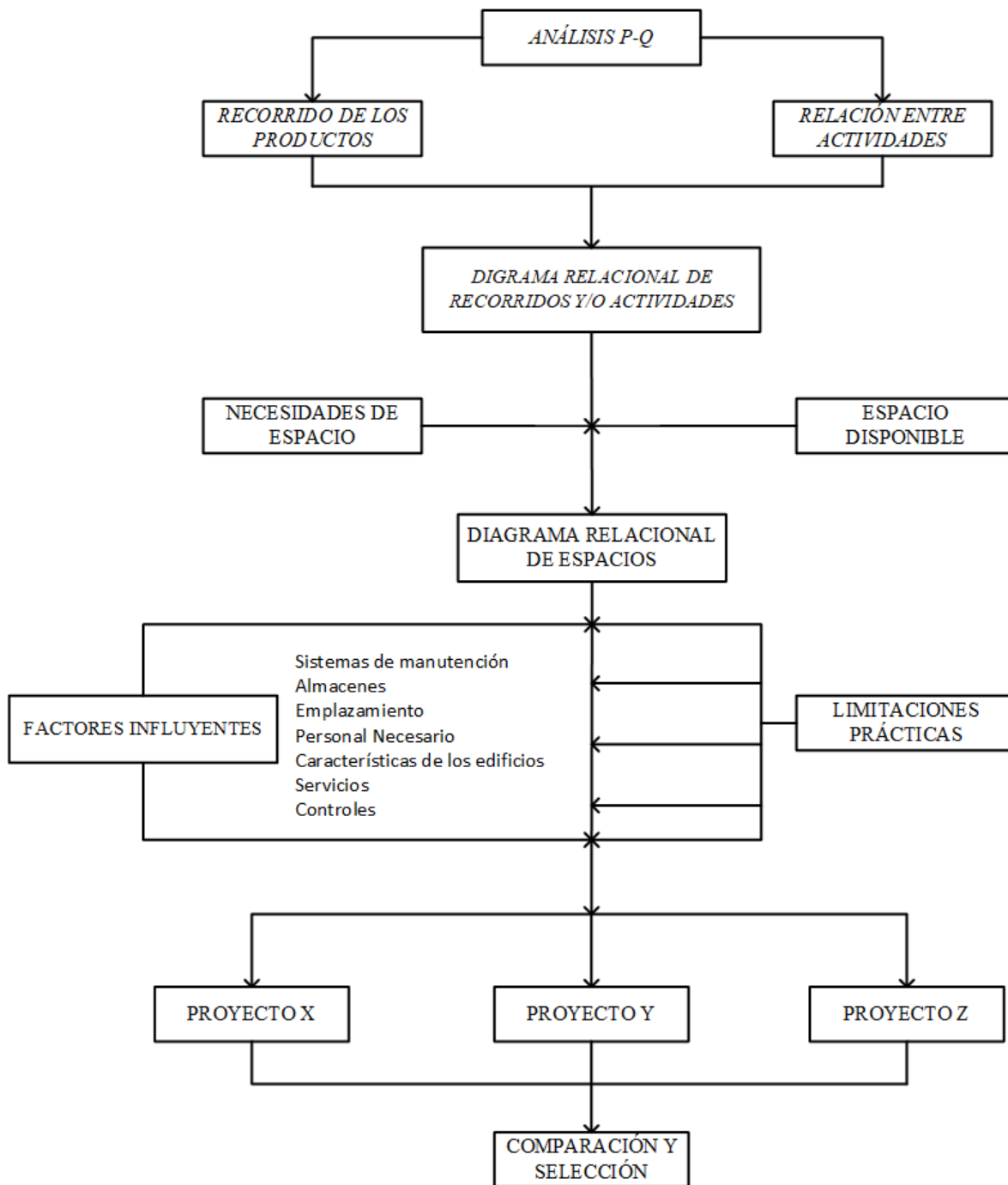
El cual se compone de tres etapas: análisis, búsqueda y selección. En la actualidad, ha sido empleada para la resolución de los problemas de distribución en planta mediante el análisis de

criterios cualitativos. Este método puede ser aplicado a instalaciones inexistentes como las ya existentes. (Campos Valencia, 2020)

En su libro, Muther (1968) explica el procedimiento que se debe llevar a cabo para hacer una planificación sistemática de diseño como se ilustra en la figura 3, iniciando con un análisis previo de los elementos básicos mencionados anteriormente para la elaboración de los datos concretos que se emplearan en las etapas siguientes. Posteriormente, se debe realizar un análisis del recorrido en función del desplazamiento del producto dentro de los sectores afectados, teniendo en cuenta las zonas operacionales y las de los servicios anexos que están comprendidas en el proyecto. En consecuencia, es importante estudiar cómo se orientan geográficamente respecto a los otros las distintas actividades, servicios y zonas sin tener en cuenta el espacio que se requiere entre ellos mediante un diagrama relacional de actividades.

A continuación, se debe examinar los espacios que son requeridos para la producción y las actividades auxiliares comparándose en todo momento con el total disponible y se fija en el diagrama de relaciones con el propósito de obtener un planeamiento del diagrama relacional de espacios. Sin embargo, aún no es totalmente efectivo, puesto que se debe adaptar según factores como sistemas de manutención, las practicas operatorias, consideraciones de seguridad, etc.

Durante el proceso de examinar los factores y de limitaciones prácticas, se derivan varias ideas. Aquellas que tengan algún valor practico las tendremos en cuenta, descartando las demás. Finalmente, después de haber abandonado las que no tenían validez, nos quedaremos un pequeño número de proyectos X, Y y Z. Cada uno de ellos es posible y viable. El problema consiste ahora en decidir cuál debe ser el elegido final. En este momento, debe efectuarse un estudio de costos por cada proyecto definido, estudio que permitirá tomar una decisión. El proyecto definitivo se convierte entonces en el Proyecto seleccionado de planteamiento general.

Figura 3.*Metodología SLP*

Nota. Tomado de: Muther, R. (1968). Planificación y proyección de la empresa industrial

3.1.2 Aplicaciones de la simulación de eventos discretos en sistemas de manufactura

La simulación de eventos discretos se ha estudiado a lo largo de los años mostrando las diferentes aplicaciones que puede tener dentro de la industria manufacturera. Korhonen et al. (2001) realizan un estudio de simulación con el objetivo de desarrollar la planificación de la producción para lograr una mejor rentabilidad y satisfacción del cliente, especialmente en la reducción de los plazos de entrega. Las principales medidas de desempeño utilizadas son el tiempo de entrega, la precisión de entrega, la producción y la utilización de la capacidad. La simulación se lleva a cabo en una fábrica de placas de circuito impreso y para alcanzar las metas establecidas se utilizan existencias para nivelar las necesidades de capacidad y proporcionar un servicio rápido.

También cabe señalar la investigación de Holst & Bolmsjö (2001) donde los resultados se basan en visitas a siete grandes empresas manufactureras japonesas, realizado durante mayo y junio de 1999. A partir de esto, identifican que la simulación no se ve como un punto crítico o estratégicamente importante, sino más bien como herramienta de resolución de problemas que se aplica principalmente como una herramienta cuando sea necesario en ciertos aspectos del sistema de fabricación, por ejemplo, cuellos de botella u otra logística, obteniendo resultados positivos sobre sus experiencias al producir una reducción de costos existencial al disminuir los plazos de entrega de desarrollo y producción y así el tiempo de comercialización. La investigación concluye que el principal interés en el uso futuro de simulación en las empresas visitadas, basadas en puntuaciones altas en los cuestionarios y entrevistas, son logística, producción, simulación, valor añadido en la producción, apoyo a la toma de decisiones, apoyo a la comunicación y aplicaciones de realidad virtual.

Además, identificaron tres áreas de aplicación típicas, los estudios exploratorios de sistemas existentes para mejorarlos, los estudios de sistemas existentes con algunos cambios realizados a ellos, similar a la primera con el propósito de validar un valor específico como el caso de una inversión propuesta y, por último, el diseño y validación de nuevos sistemas.

Posteriormente, Julka et al. (2004) presentan en su investigación algunos de los desafíos que se deben enfrentar al aplicar la simulación de eventos discretos en un entorno impulsado por la demanda. En el entorno empresarial se aborda el ciclo completo desde el modelado de simulación, la validación del modelo, la entrada y salida de datos, la ejecución de la simulación y la implementación. Hay que destacar, que los modelos pueden hacerse lo mayor realista posible, si la planificación, el orden en los procesos de gestión y la ejecución operativa están completamente incorporadas en el modelo.

Además, Ingemansson & Bolmsjö (2004) en su trabajo presentan una metodología basada en la simulación de eventos discretos para reducir las perturbaciones en los diferentes sistemas industriales de fabricación. La DES es una poderosa herramienta para analizar las causas de las perturbaciones en los sistemas de fabricación ya que estas ocurren en distintas partes de un sistema de manufactura. La investigación muestra cuatro casos industriales de estudio donde la formación del personal es clave para el aumento general de la eficiencia de las diferentes empresas. Existe una fuerte relación entre las herramientas de la DES combinado con el conocimiento del personal de trabajo, pues se generan resultados en aumento de la producción total de las diferentes empresas expuestas en los casos de estudio.

Más tarde, Ingemansson et al. (2005) utilizan la simulación de eventos discretos para un sistema de fabricación acompañado de una metodología que trabaja en la reducción de los cuellos de botella con el cual buscan aumentar la eficiencia. Los estudios de sistemas de fabricación

avanzados en la industria manufacturera han demostrado que la eficiencia global del equipo (*Overall Equipment Effectiveness, OEE*) es de aproximadamente el 50% (Blanchard, 1997; Ericsson, 1997). El modelo de simulación de eventos discretos se utiliza para reducir las perturbaciones en la producción cuando es verificado y validado el modelo. Un año después se realiza una nueva simulación con datos del sistema automático de recolección de datos y año a año, el modelo indica una mejora del 6% de la producción total en el sistema de fabricación.

Años más tarde, Pfeffer & Verdonck (2008) mencionan que la DES permite una simulación rápida y precisa de secuencias de procesos en el área relacionada con equipos, la identificación rápida de cuellos de botella en secuencias de procesos, el pronóstico de modificaciones virtuales en el rendimiento y el tiempo de ciclo, entre otros. En este documento, se analiza la capacidad de la simulación de eventos discretos para optimizar el rendimiento de los equipos de fabricación de semiconductores planteando cinco diferentes estrategias para mejorar el rendimiento y el tiempo de ciclo, que induce en una reducción de costos permitiendo a las empresas competir con éxito en el mercado global.

Más adelante, se encuentra la investigación de Lee et al. (2009) para el desarrollo de un sistema de ejecución de producción basado en la simulación en un astillero. Un caso de estudio que se lleva a cabo en un taller de montajes de bloques de paneles. El trabajo presenta la utilización de la simulación de eventos discretos en un sistema para operaciones de bloques de panel. Se busca realizar un análisis que permita maximizar la productividad del proceso en curso y que las personas que intervienen en el estudio tomen la tecnología de optimización como herramienta de simulación para posteriores tomas de decisiones, hablando en términos de planificador y supervisor de la producción. Particularmente, fue validado gracias a la utilización de un escenario de producción

real y al momento de su comparación muestra resultados favorables entre el taller de paneles real y el modelo de simulación.

También, Baraka et al. (2012) realizan un análisis sistemático sobre el modelo de simulación para identificar áreas de ineficiencia relacionadas con la utilización de la mano de obra y la capacidad de producción con el fin de mejorar la competitividad en la industria automovilística. A partir del análisis se establece que se pueden realizar mejoras en la utilización de la mano de obra mediante una redistribución del contenido del trabajo, así como en la capacidad de producción mediante la eliminación de paros y retrasos laborales. El efecto neto de la mejora como se sugiere en este estudio de caso resulta en un aumento general del 4% en la capacidad de producción, la reducción del tiempo de espera y la mejora en la utilización de la mano de obra producen mejoras adicionales.

De manera semejante, Michaloski et al. (2013) utilizan la simulación discreta con un caso de estudio de una instalación de producción de fundición de precisión para automóviles, donde analizan las operaciones de fabricación de fundición en arena de precisión y emplean el modelado DES para derivar proyecciones de costos de fabricación basadas en datos reales del piso de la fábrica, a través del desarrollo de un modelo para correlacionar la actividad de producción con el consumo de energía del proceso. Existen cantidad de factores que son necesarios para modelar eficientemente un sistema de producción, sin embargo, se enuncia algunos parámetros básicos de optimización que se encuentran en el sistema de fabricación como mejorar el tiempo de actividad y la disponibilidad, minimizar las limitaciones del tiempo de espera, aumentar el rendimiento del sistema y reducir costos de producción.

Hay que mencionar, además el trabajo de Paula et al. (2014) donde presentan un método de identificación para sistemas de eventos discretos controlados por un controlador lógico

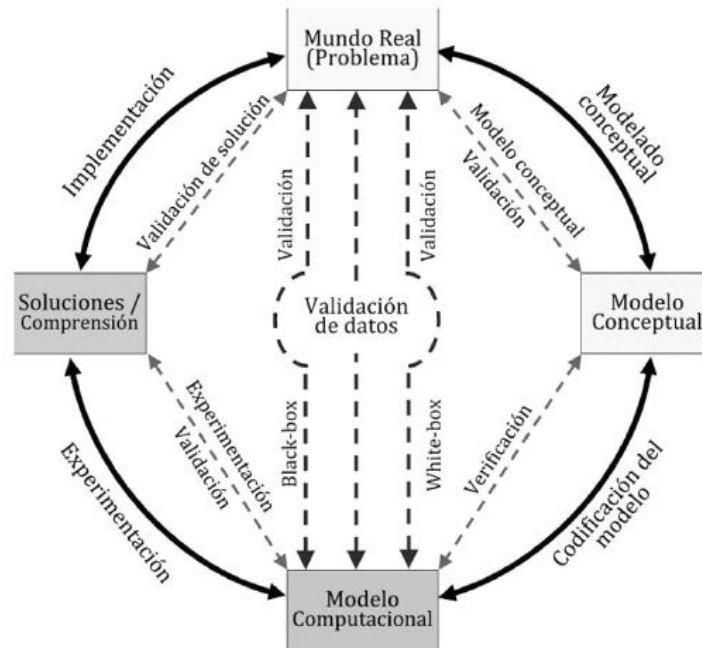
programable. La técnica propuesta permite la identificación de sistemas complejos reales porque es suficientemente eficiente y está bien adaptada para hacer frente tanto a las características tecnológicas de los controladores industriales como a los requisitos de recopilación de datos.

También, Zahraee et al. (2014) estudian métodos para eliminar los cuellos de botella y los tiempos de espera en las líneas de producción a través de la simulación por computadora. Así, selecciona una fábrica de colores como caso de estudio, cuyo sistema de fabricación es tipo taller y se simula en el software Arena, después se agregaron documentos de la empresa con datos históricos sobre las ventas, número de pedidos, número de salidas de productos y el tiempo de trabajo de producción y se comparan con los datos obtenidos por el simulador, obteniendo una aproximación del 90% probando su validez. A su vez, se propuso un mejor diseño de la línea de producción mediante el aumento de otro mezclador delpak y la asignación de una mano de obra como responsable de este deber para eliminar la superposición entre las tareas del operador. Por tanto, la eficiencia de la línea de producción se ha alcanzado hasta el 95%. Además, el tiempo medio de espera en la cola se redujo unos 12 minutos y el número medio en la cola se redujo en más del 90%.

De otra parte, Sánchez et al. (2015) realizan el análisis del proceso productivo de una empresa nacional para incrementar la productividad identificando las partes de los procesos responsables de atrasos y “cuellos de botella”. Su proceso consiste en realizar un acompañamiento a la empresa durante una semana durante 8 horas diarias en cada uno de los puestos de servicio del proceso productivo realizando un estudio de tiempos que clasifican en distribuciones estadísticas para simular los tiempos de proceso de cada estación. Además, plantea un proceso de validación de modelos que se muestra en la figura 4.

Figura 4.

Proceso adaptado para el desarrollo y la validación



Nota. Tomado de: Sánchez, P. A., Ceballos, F., & Sánchez Torres, G. (2015). Análisis del proceso productivo de una empresa de confecciones: Modelación y simulación.

Por otra parte, Kassu Jilcha. (2015) en su trabajo plasma una simulación mediante el software Arena, empleando el rendimiento como medida de desempeño, relacionándola con tiempo de espera, trabajo en proceso, utilización de recursos y capacidad. De igual manera, expone la importancia de encontrar un buen diseño de réplicas de la simulación para obtener la mayor cantidad de información estadística de las ejecuciones de simulación por el menor costo computacional, minimizando el número de repeticiones y su longitud para obtener estadísticas fiables. Para decidir el número de réplicas, el modelo debe ejecutar un conjunto inicial de réplicas para que se calculen el promedio de la muestra, la desviación estándar y el intervalo de confianza.

Más adelante, Pandian & Ali (2016) demuestran cómo mejorar el diseño de fabricación utilizando el modelado de simulación y la tecnología de grupo. Para esto, modela en el software Arena las piezas, los tiempos de proceso, los tiempos de falla de las maquinas, las distancias de recorrido de las piezas, la velocidad de la carretilla elevadora y los tiempos de carga y descarga. El modelo de simulación de diseño de fabricación original predice 113 piezas para una duración de ejecución de simulación de 40 horas. El diseño se mejoró utilizando el método de tecnología grupal. El modelo de simulación de diseño de fabricación mejorado produjo 128 piezas para la misma longitud de ejecución, una mejora del 12% en el rendimiento de producción. Este documento demostró con éxito que el rendimiento de la producción podría mejorarse utilizando el modelado de simulación y la tecnología de grupo.

Luego, Sheng et al. (2017) abordan el tema de la simulación de eventos discretos para evaluar el impacto de la realización de un mantenimiento preventivo (PM) en el piso de producción, centrándose en los efectos imperativos de diferentes parámetros de la planta, como la tasa de rendimiento, la utilización de la máquina y la utilización del técnico en la eficacia de PM. Para esto, se realiza una serie de experimentos para estudiar los efectos del número de técnicos, número de operaciones de cada máquina en el rendimiento del taller utilizando siete modelos diferentes, cada uno con su programa de mantenimiento definido. Así, a partir de la ejecución de las simulaciones, ANOVA y comparaciones realizadas se pudo definir cuál es el modelo más adecuado para su implementación.

De otra parte, Feldkamp et al. (2019) describen tres componentes para tener en cuenta durante un proceso de simulación: el cultivo de datos, minería de datos y la analítica visual. La primera se refiere a un campo de la estadística y las ciencias de la computación referido al proceso que intenta descubrir patrones en grandes volúmenes de conjuntos de datos. Utiliza los métodos

de la inteligencia artificial, aprendizaje automático, estadística y sistemas de bases de datos, la segunda es el proceso de usar experimentos computacionales diseñado para "hacer crecer" los datos, que luego pueden analizarse utilizando técnicas de estadísticas y de visualización para obtener información sobre sistemas complejos. Estos métodos se pueden aplicar a cualquier modelo computacional, y, por último, la analítica visual es representar la información visualmente, permitiendo al usuario interactuar con los datos para comprender mejor, sacar conclusiones y finalmente tomar mejores decisiones basadas en conjuntos de datos extensos y complejos.

En la actualidad, Huynh et al. (2020) en su artículo propuesto, demuestran cómo usar la simulación discreta para evaluar el estado de la operación y aliviar los cuellos de botella del flujo de fabricación de un proceso por lotes, mediante una herramienta de modelado para respaldar la reconfiguración de los sistemas de fabricación con el fin de satisfacer las diversas demandas de los clientes y la mejora del producto, para simular y analizar escenarios de mejora ajustada de los procesos de fabricación antes de su implementación por medio de la medida de desempeño **MAKESPAN**.

Durante este mismo año, Caterino et al., (2020) en su artículo plantean un escenario de trabajo construido para la simulación de un entorno de trabajo real en el que se reproducen las actividades de tres de sus trabajadores. El objetivo de sus investigaciones trata de la simulación en plantas de montaje de automóviles, pero se enfocan en el impacto de la diferencia de producto. Por tal razón describen el desarrollo de un modelo de simulación de una planta de ensamblaje automotriz considerando cuatro niveles: la cadena de suministro, la planta de ensamblaje, los sistemas de ingeniería y el nivel del piso de producción. Se utiliza la simulación de eventos discretos en los diversos escenarios propuestos y se observa las diferentes interrupciones en la

línea de producción que permiten evaluar su desempeño simulando la variabilidad del tiempo de trabajo para operaciones manuales.

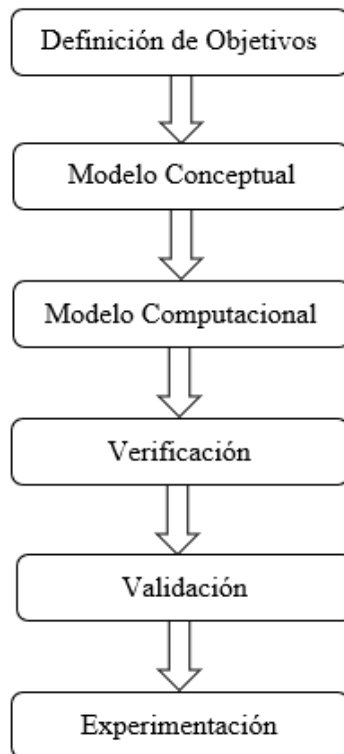
En conclusión, de acuerdo a la revisión realizada, se evidencia la importancia de utilizar la simulación de eventos discretos como una herramienta para intervenir los procesos de las empresas manufactureras, pues a partir del análisis del sistema se pueden proponer y evaluar mejoras que se evidencien no solo en el rendimiento y la eficiencia sino también en la reducción de los costos de producción; aportando de esta manera a aumentar la competitividad de las empresas y a satisfacer las necesidades de los clientes. Asimismo, es necesario destacar la importancia de definir claramente cada una de las etapas de modelado, de tal forma que se obtengan resultados consecuentes con el objetivo de la investigación.

4. Marco metodológico para el desarrollo de proyectos de simulación en sistemas de manufactura

En el presente capítulo se ilustra un marco metodológico para el desarrollo de proyectos de simulación de sistemas productivos en empresas manufactureras, que representa una guía para futuros trabajos que se estén inmersos en la misma área (ver figura 5).

Figura 5.

Etapas para el desarrollo de proyectos de simulación en sistemas de manufactura



4.1 Definición de Objetivos

La definición de objetivos claros y acertados es crucial puesto que determina el rumbo del proyecto. Así, el proyecto de simulación será exitoso en la medida en que los objetivos sean definidos en forma clara y las restricciones sean bien entendidas. Es importante resaltar que deben estar centrados en obtener el máximo beneficio del modelo experimental para identificar las alternativas de mejora.

Según Knepell y Arango (1993) al momento de realizar los objetivos se debe considerar preguntas como: ¿Cuál es el propósito de la simulación? ¿Para quién es el modelo? ¿Quién será el

usuario final? ¿Qué tan importantes serán las decisiones que se tomarán como resultado del modelo de simulación?

Por otra parte, cuando el modelo se encuentre elaborado e inmersas cada una de las etapas de verificación, validación y experimentación, el mismo es quien se encarga en lo posible de dar respuesta a todas las preguntas en consideración. Es así, como permite que los gerentes de empresas manufactureras después de observar las corridas del modelo evaluando sus escenarios, se encamine a tomar decisiones en pro de una mejora a corto plazo y que el proceso actual mejore significativamente.

Siguiendo con este razonamiento, los objetivos deben ser realistas y realizables, enfocados en logros, breves y concisos, redactados en tercera persona con verbos en infinitivo, indicando acciones concretas. Iniciando en el general, el cual es el propósito global del estudio y continuando con los específicos, que son metas de menor alcance que sumados dan el objetivo general.

Por ejemplo, el propósito de este estudio es emplear las herramientas de simulación para evaluar distintos escenarios de mejora a la cadena productiva de una empresa manufacturera, de este modo, el objetivo general a plantear es evaluar escenarios de reconversión industrial en el sistema productivo de una empresa de manufactura a partir del desarrollo de modelos de simulación de eventos discretos. Esto cumple con los elementos planteados anteriormente y cuenta con una serie de objetivos específicos que detallan el paso a paso de cómo se cumple el general.

4.2 Modelo conceptual para el desarrollo de proyectos de simulación

En esta sección se destacan los aspectos más importantes que se requieren para la construcción de un modelo conceptual de simulación, se describen las etapas que lo comprenden

de manera concisa para especificar todos los detalles de lo que se quiere modelar. Esta sección consta de tres etapas: Caracterización de entidades, de procesos y de recursos.

4.2.1 Caracterización de entidades

En esta etapa se debe realizar una conceptualización del modelo que incluya la definición de elementos como los eventos sean endógenos o exógenos, que demuestran el cambio de estado del sistema, y de las entidades dinámicas y estáticas, para representar los objetos que requiere una definición explícita.

De forma seguida, se establecen las cantidades necesarias de eventos, entidades, atributos y variables del sistema de acuerdo con el sistema productivo que se desee representar y a los procesos que integra, disponiendo de las entidades que ofrece el software de simulación como los procesadores, los combinadores, los *flowitems*, los separadores, entre otros para representar cada una de las operaciones necesarias para la fabricación del producto final.

Una vez llegado a este punto, se debe realizar un análisis exhaustivo del sistema real que se pretende simular determinando los tiempos para cada operación, ya sea mediante un estudio de tiempos realizado por los autores o un histórico proporcionado por la empresa, los requerimientos de recursos y de transporte en cada etapa del proceso, es decir, si un material es procesado en una máquina, se debe definir el tipo de máquina y las operaciones que realizan los operarios, enfatizando en si necesita que algún elemento para ejecutar el transporte para cada acción dentro del sistema productivo.

De este modo, se sintetiza en pocas variables el funcionamiento de un aspecto complejo por medio de las fases de la construcción del modelo identificando las características que

pertenecen a una entidad, la colección de toda la información necesaria para definir lo que sucede en el sistema con detalle en un momento específico.

Para realizar cada uno de los aspectos mencionados anteriormente, es necesario iniciar con recolectar todo tipo de información del sistema real a estudiar, es decir, considerar todos los factores que intervienen en la fabricación del bien de la empresa de manufactura, con el fin de conocer a fondo y poder replicar el comportamiento del sistema real en el software respectivo. En el Apéndice E de la figura 1, se ilustra un ejemplo de una lista de chequeo para conocer qué datos importantes se requieren de la empresa para la construcción del modelo y que permita identificar los factores que tienen mayor relación con el sistema productivo

Así mismo, se debe considerar el diagrama de operaciones para conocer más a detalle cada uno de los eventos asociados al proceso, las entidades que se van a trabajar, los recursos a utilizar, humanos o tecnológicos que necesita para su desarrollo, los atributos y las variables globales que se le asignan a la simulación, las medidas de desempeño que se tendrán en cuenta, las distintas localizaciones por donde se traslada el material y por último, las materias primas necesarias para su elaboración. De esta manera, es importante hacer un tratamiento de todos los datos recolectados, entre ellos el tiempo de operación del proceso para poder representar de manera fidedigna el sistema real, ya sea con distribuciones probabilísticas que simulen su comportamiento o con probabilidades como se realizó en el proyecto.

De igual manera, otra estrategia utilizada para recolectar toda la información completa del proceso productivo y que se pueda acaparar lo más completo, es tener esa conexión constante vía email con el jefe de planta quien es el encargado de coordinar los planes de producción y supervisa el mantenimiento de las áreas productivas, de manera que pueda aclarar cualquier inquietud sobre el proceso en estudio.

Una propuesta como ejemplo de la construcción del modelo conceptual es el que se plasma en este proyecto. A continuación, se presenta algunos diagramas más frecuentes y utilizados en el modelo, una fila, un combinador y un separador.

El diagrama de la figura 6, es una fila que representa un área de almacenamiento que se usa para mantener las entidades cuando el proceso posterior no puede recibirlas hasta completar su capacidad máxima. Entre los elementos que la componen está la entrada para conocer qué *flowitem* recibe, algunas de las propiedades más utilizadas para su configuración se encuentran; máximo contenido, etiquetas, gatillos y por último salida.

Figura 6.

Configuración de una fila en el modelo conceptual



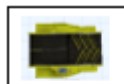
Puerto	Entrada	Cantidad	FILA_2		OUTPUT	
1	FUENTE_2	-	QUEUE		Use Transport	Center Objects
2			Maximum Content	1000	Send To Port	First available
3			INPUT		Código Adicional	
4			Pull Strategy	-		
5			LABEL			
			-			
			-			
			TRIGGERS			
			On Entry	Set Label		
			-	-		
			-	-		

El diagrama de la figura 7, corresponde a un combinador que se emplea para agrupar varias entidades en una sola y recorrer a través del modelo. En este recurso se puede llevar a cabo una unión permanente (*join*) o puede ser empacado para en un momento posterior puedan ser separados (*pack*). A través del primer puerto de entrada, recibe la entidad que va a actuar como el contenedor y por los demás puertos recibe las entidades que van a hacer combinadas.

Además, algunos de sus elementos que la componen son su entrada y dentro de sus propiedades se destaca el tiempo de procesamiento, cual operador va a utilizar, el modo de combinar y así mismo sus etiquetas, gatillos y su salida correspondiente.

Figura 7.

Configuración de un combinador en el modelo conceptual



Puerto	Entrada	Cantidad	COMBINER_1		OUTPUT	
1	CONVEYOR_1	-	PROCESSOR		Use Transport	Center Objects
2	FILA_2	-	Process Time	Distribución normal	Send To Port	First available
3			Use Operator	Center Objects	Código Adicional	
4			COMBINE			
5			Combine Mode	Pack		
			Component List	4		
			LABEL			
			-			
			INPUT			
			Pull Strategy	-		
			TRIGGERS			
			-			

El diagrama de la figura 8, representa la estructura de los elementos a configurar en un separador. Este objeto se usa para separar la entidad en múltiples partes. Puede realizar desempaque (*Unpack*) de un *flowitem* que ha sido previamente empacado por un combinador o realizar diversas copias de la entidad original (*Split*). Los elementos se comportan de manera similar al diagrama anterior, contiene la entrada y dentro de sus propiedades se encuentra el tiempo de procesamiento, cual operador va a utilizar, el modo de separar y así mismo sus etiquetas, gatillos y su salida respectiva.

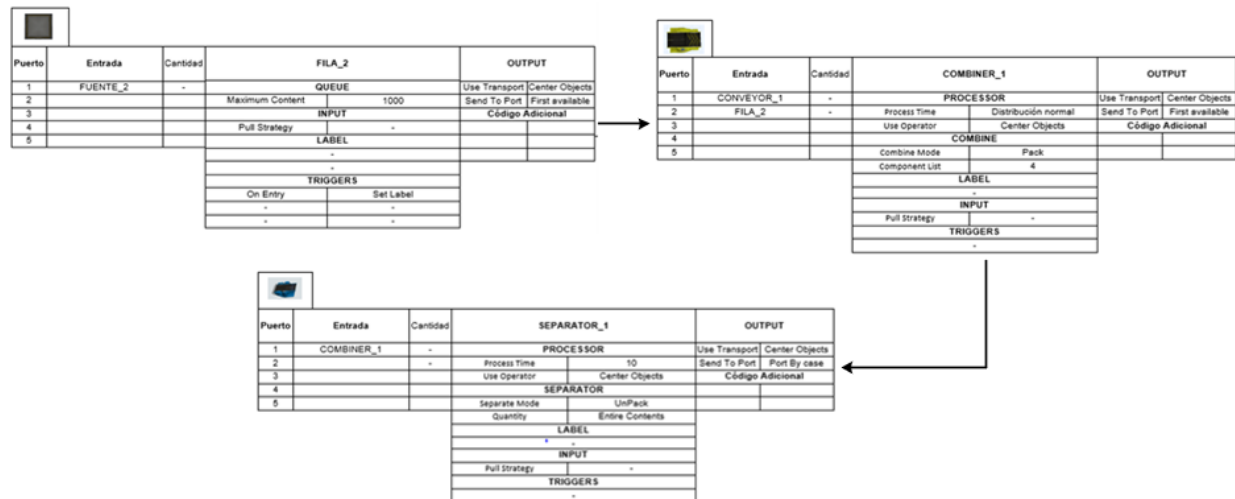
Figura 8.

Configuración de un separador en el modelo conceptual



Puerto	Entrada	Cantidad	SEPARATOR_1		OUTPUT	
1	COMBINER_1	-	PROCESSOR		Use Transport	Center Objects
2		-	Process Time	10	Send To Port	Port By case
3			Use Operator	Center Objects	Código Adicional	
4			SEPARATOR			
5			Separate Mode	UnPack		
			Quantity	Entire Contents		
			LABEL			
			-			
			INPUT			
			Pull Strategy	-		
			TRIGGERS			
			-			

Los diagramas mostrados anteriormente son algunos de los utilizados en el modelo conceptual del caso de estudio propuesto en este proyecto. El modelo conceptual se encuentra detallado en el Apéndice B. Ahora bien, cada uno de estos diagramas puede replicarse tantas veces sea necesario, de acuerdo con la estructura del modelo. En la figura 9 se presenta un ejemplo de la interrelación entre los elementos del modelo conceptual, en este se incluyen las entidades y las relaciones entre los diferentes elementos que más adelante se llevarán a un modelo computacional.

Figura 9.*Interrelación de algunos diagramas del modelo conceptual*

4.2.2 Caracterización de procesos

La caracterización permite una comprensión completa del objetivo de cada proceso y los aspectos claves de cómo llevarse a cabo. Para lo cual, se identifican las actividades de entrada y de salida que generan valor al producto, y se obtiene la información respecto a los requerimientos del proceso, los principales actores que intervienen, los clientes, los productos que se generen, y los mecanismos de control que se manejan.

Así, se deben definir las personas que controlan, hacen seguimiento y son los responsables de cada operación dentro del proceso. Igualmente, se debe tener claridad sobre el propósito en términos de eficacia y eficiencia y su razón de ser, la información sobre insumos, subproductos del proceso, número de personal necesario para la ejecución, equipos y sistemas de información que se manejan, mediciones, seguimientos y controles que garantizan los resultados del proceso,

y las expresiones de las variables del proceso y de las características de calidad que posibilitan en análisis del desarrollo de cada subproceso.

Una forma de caracterizar los procesos para gestionar un proyecto de simulación es a través de los diagramas de recorrido, de flujo de proceso y de operaciones, de estos se pueden obtener las rutas por donde se traslada el material durante su fabricación, puesto que se cuenta con un plano real de la empresa con diagrama de recorrido para observar todos los movimientos.

Sobre la base de lo descrito anteriormente, para caracterizar los procesos de un sistema productivo de una empresa manufacturera, se debe conocer a calidad la descripción del proceso, identificar los actores que tienen mayor relación y seleccionar los criterios de segmentación más adecuados para la correcta definición del sistema. En el Apéndice E, se presenta un pequeño ejemplo donde se simula el proceso de fabricación de dos productos elaborado en el software FlexSim para dar más claridad a cada una de las entradas y salidas que generan valor al producto a través de la configuración de los recursos fijos.

4.2.3 Caracterización de recursos

Toda organización cuenta con un conjunto limitado de recursos para ejecutar todas las acciones que sean necesarias para la fabricación del bien o servicio. De esta forma, para representar de manera correcta la cadena productiva de una empresa en un software de simulación se debe definir todos los elementos que intervienen en ella, tangibles e intangibles, que se relacionen con las rutas y los requerimientos establecidos previamente.

Los recursos humanos, materiales, técnicos y tecnológicos se representan en el software mediante entidades, recursos fijos y ejecutores de tareas, deben estar establecidos con velocidad,

tamaño, capacidad máxima, tiempos de procesamiento y alistamiento, entre otros aspectos. En el Apéndice E, en el mismo ejemplo mencionado anteriormente se aprecia los recursos fijos y ejecutores de tareas utilizados en el software FlexSim para llevar a cabo la fabricación de los dos productos del proceso simulado.

De este modo, la caracterización presenta el sistema productivo de una empresa manufacturera con sus atributos particulares y es la base para crear una herramienta de apoyo para el ejercicio de la validación y la verificación como la expuesta en el Apéndice B.

4.3 Modelo Computacional

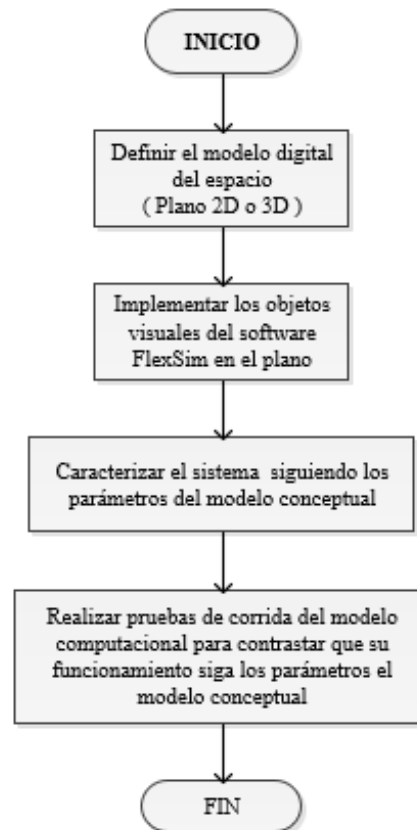
En esta etapa, se utilizan los elementos descritos en el modelo conceptual del sistema y se elabora el modelo computacional en el software FlexSim, que permite modelar y mejorar los sistemas de manufactura existentes y propuestos. Así, se promueve el desarrollo y la evolución de teorías conceptuales, contribuyendo a mejorar la comprensión del sistema real y a evaluar posibles escenarios de mejora sin necesidad de afectar el sistema real.

Para la creación del modelo computacional se utiliza el documento elaborado en Ms. Visio donde se evidencian los elementos de la caracterización como puente para pasar del modelo conceptual al computacional. En el Apéndice E se encuentra la ilustración de un ejemplo del modelo conceptual hecho Ms. Visio que contrasta el modelo simulado en la fabricación de los dos productos.

El presente proyecto de simulación se lleva a cabo en el software FlexSim y para realizar el modelo computacional se tienen en cuenta aspectos que permiten la construcción de este. En la figura 10 se pueden observar las distintas fases correspondientes.

Figura 10.

Diagrama de flujo para la construcción de un modelo computacional



4.3.1 Definir el modelo digital

En esta fase se necesita definir si el modelo usará un modelo digital del espacio – plano 2D o 3D. La configuración dentro del software FlexSim se puede dar de dos formas, como fondo o como un objeto plano de los objetos visuales del mismo. Si se define trabajar con un plano 2D, para la configuración dentro del software se realiza a través de la herramienta *Backgrounds* y el plano 2D trabajado se puede importar a FlexSim a través de su realización en programas como AutoCAD o Ms. Visio. En caso de que se defina trabajar con un plano 3D, para su configuración

dentro del software se realiza a través de uno de los objetos plano de FlexSim y el plano 3D se puede importar a través de su construcción en programas como SketchUp como se utiliza particularmente en este proyecto.

4.3.2 Implementar los objetos visuales del software FlexSim en el plano

El software FlexSim ofrece objetos fundamentales para su desarrollo. Para ello, se dividen entre los recursos fijos o “*Fixed Resources*” que contiene los diferentes objetos que permiten simular las estaciones o localizaciones y los “*Task Executors*” que son los recursos móviles que se encargan de transportar los “*flowitems*” de un lugar a otro. Para ilustrar la apariencia física de los recursos mencionados anteriormente se puede apreciar la tabla 1 del Apéndice E donde también se pueden observar cómo se configuran los recursos fijos y los ejecutores de tarea que permiten de esta manera contribuir al desarrollo y construcción del modelo conceptual.

4.3.3 Caracterizar el sistema siguiendo los parámetros del modelo conceptual

Para caracterizar el sistema, es necesario configurar las etiquetas que permiten almacenar la información necesaria en un elemento de flujo (entidad) o en un objeto 3D. Dichas etiquetas son claves para la funcionalidad del modelo de simulación, pues con ellas se puede rastrear información importante dentro del sistema analizado. Sin embargo, las necesidades de analizar ciertas variables llevan consigo la creación de códigos de programación que permitan crear información de interés para el análisis de resultados. Los códigos establecidos pueden tener

relación con las medidas de desempeño establecidas previamente en el modelo conceptual o con alguna información requerida para el correcto funcionamiento del sistema.

4.3.4 Realizar pruebas de corrida del modelo computacional

Se ejecutan las corridas que sean necesarias para corroborar el funcionamiento del modelo computacional que permita corregir los errores existentes. Es importante observar si el modelo tiene errores antes de pasar a la verificación del modelo con el fin de que esto ayude a facilitar todo el proceso en el desarrollo de las siguientes etapas.

4.4 Verificación

La verificación de los sistemas productivos en empresas manufactureras consiste en determinar si el modelo opera con la misma intención con que fue planeado y creado, es decir, una comprobación de la correcta implementación de las variables que lo conforman, de manera que el mismo se ejecute correctamente de acuerdo con las especificaciones establecidas en el modelo conceptual. Durante la verificación del modelo, se pretende recorrerlo paso a paso, objeto por objeto, o manualmente simular el movimiento de un pequeño número de entidades.

De otro modo, la meta al hacer una verificación del modelo propuesto deberá ser encontrar escenarios que causen que el modelo falle, para que así en el momento de realizar una verificación constante se puedan aislar todos los errores posibles. Así mismo, se deben evitar errores comunes; como los de bloqueo, errores matemáticos y errores de escritura en variables y atributos. También es esencial cuando sea posible, incorporar una persona externa que conozca el sistema y su

operación pero que no esté involucrada en el diseño del modelo, de forma que pueda adoptar una posición crítica y pueda identificar errores, para posteriormente ser notificados la corrección de estos a quienes diseñaron y construyeron el modelo.

La etapa entre tener un modelo conceptual y modelo computacional es lo que exige de una verificación. Para realizar una verificación en el modelo computacional, esta requiere evidenciar y corregir errores que son detectados únicamente por el compilador, errores que pueden ser de sintaxis, de estructura o de lenguaje y suelen solucionarse de manera sencilla ya que el compilador indica donde se encuentra el error.

Los errores de alto riesgo son los que no detecta el compilador, es decir, se ejecuta una corrida sin ningún problema y el hecho que la simulación corra no implica que se esté haciendo bien. La consistencia de los datos debe ser apropiada, pues podría incurrir en entregar unas estadísticas erradas, ya que muchas veces suelen ser errores en los cálculos.

Dentro de las estrategias de verificación del modelo se encuentra el de recorrer paso a paso el modelo, moverse a través del mismo objeto por objeto, o manualmente simular el movimiento de un pequeño número de entidades.

Otra estrategia, es cuando se tiene un modelo probabilístico como debe ser en caso de que se use la simulación, hay que correr la versión determinística y verificar los resultados arrojados con otros que se encuentran establecidos hechos en estudios anteriores, de esta manera se pueden evidenciar que las cifras y los valores están siendo correctos.

También, la animación es otra estrategia fundamental de verificar el modelo. Para fines de verificación no se necesita una animación perfecta, sin embargo, el tiempo que nos puede tomar la animación se recupera con los ahorros en tiempo de verificación del modelo.

De la misma manera se encuentra la verificación por un ente, una persona que haya estado envuelta en el diseño del desarrollo del proyecto, se necesita una persona experta en el proceso y otra persona con la misma capacidad experto en la simulación, es decir, se necesitan las miradas desde las dos perspectivas.

4.5 Validación

Para la validación de los sistemas productivos en empresas manufactureras cuando el modelo de simulación sea crea con un propósito determinado, su validez puede evaluarse en términos de ese propósito. Por esta razón, la validez del modelo indica a si este corresponde al sistema real, o si por lo menos representa con exactitud toda la información recolectada y las hipótesis hechas con relación a la manera en que opera el sistema real, de tal forma que se valida un modelo para formar un nivel aceptable de confianza de que las inferencias de desempeño del modelo son correctas y aplican en todo el proceso de este.

Del mismo modo, durante todo el proceso de validación del modelo se determina que el modelo conceptual rediseñado muestre fielmente el sistema real. Dentro de las estrategias de validación se encuentra, por ejemplo, comparar la medición del indicador de desempeño obtenido de la simulación, con la medición del mismo indicador tomado del sistema real, y ver si estas corresponden.

Para tener una predicción del comportamiento del modelo, se puede probar si el modelo predice el comportamiento del sistema haciendo diversas corridas de campo. Cada corrida es dirigida del sistema que pueden ser simuladas en el modelo con exactamente las mismas características.

Otra estrategia de validación es realizar pruebas estadísticas entre datos reales y los generados con la simulación. Por ejemplo, una prueba t de Student, se realiza en Excel en la opción análisis de datos donde se puede realizar la prueba t suponiendo varianzas iguales o desiguales, se puede considerar la de varianzas desiguales si la dispersión es diferente. Se eligen dos variables, la de la planta y la del recurso experimental y se puede asumir diferencias de medias considerándolas en cero, es decir, para observar si hay diferencia significativa entre las dos poblaciones a partir de la media con un nivel de significancia (α) igual 0,05.

Tal que,

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \neq$$

$$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2$$

De esta manera se obtiene el resultado de la prueba obteniendo valores críticos como el estadístico t y el valor crítico de t (para dos colas). Si el estadístico t se encuentra dentro de la región de aceptación de valor crítico de t, entonces, desde el valor crítico contrastado con el estadístico t no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula y el *Pvalue* si es mayor a nivel de significancia eso permite corroborar lo mencionado anteriormente, es decir, no hay diferencias significativas entre los resultados del modelo y lo que se obtiene de datos en la planta.

La prueba de normalidad también aplica para la validación, se toman los datos obtenidos de la simulación a través de la herramienta *Experimenter*. Esta prueba se puede llevar a cabo en Minitab, en prueba de estadísticas básicas se define la prueba que se desee, por ejemplo, la de kolmogorv-Smirnov y así se puede obtener el *Pvalue* junto con el gráfico. Si de los resultados obtenidos gráficamente se aprecia que se tiene normalidad podemos calcular el tamaño de réplicas de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sigma^2(Z_{\alpha/2})^2}{e^2}$$

La desviación es obtenida de los datos de la simulación y el error es lo máximo que se puede admitir en términos de la diferencia de la media muestral y la media poblacional, es decir, alrededor de que valor se puede admitir tanto por arriba o por debajo de la media de la simulación, utilizando un (α) igual 0,05 y de esta manera se obtiene el número de replicas para dar claridad a la cantidad necesaria para correr en el modelo.

Finalmente, la información de la salida del modelo deber ser examinada para determinar si los resultados son razonables. Si cada análisis es ejecutado sin encontrar ninguna discrepancia entre el sistema real y el modelo, se puede decir que el modelo tiene una precisa representación del sistema.

Además, el desarrollo de la verificación y la validación del modelo representan elementos importantes para el éxito del proyecto de simulación. Cada decisión que se toma se basa en la información obtenida del experimento de simulación y, por esta razón, esto es una evidencia demostrable de la validez del modelo.

4.6 Experimentación

En esta etapa, se debe plasmar lo que los diseñadores del modelo estén interesados en saber. Se plantean diversos escenarios de mejora para poder obtener mediante los experimentos de simulación respuestas de una manera precisa y eficaz dependiendo del software de simulación en donde se llevó a cabo la construcción del modelo computacional.

La cantidad de escenarios propuestos dependen exclusivamente a criterio del evaluador, pero el objetivo del control de experimentos no es encontrar que tan bien opera el sistema, sino tener suficiente conocimiento de cómo mejorar el desempeño del sistema, es decir, estar siempre

en la búsqueda de las mejoras de las medidas de desempeño inmersas en el proceso. El software FlexSim cuenta con una herramienta que se denomina “*Experimenter*” que permite realizar los escenarios que se deseen y a su vez evaluar el funcionamiento del modelo dependiendo del número de replicas que se quiera para su ejecución y análisis.

Para el control de cualquier experimento de simulación, el diseñador debe tener cuidado en la correcta interpretación de la información obtenida de la ejecución de la simulación. Se debe tener a consideración algunos aspectos claves en el diseño del experimento de simulación cómo; ¿Existe un interés preciso en analizar el comportamiento del estado estable del sistema, o existe un tiempo determinado en que se deba medir?, ¿Cuál es el método apropiado para obtener una muestra de observaciones que pueden ser usadas para estimar el comportamiento del modelo?, ¿Cuántas replicas deben ser usadas?, entre otras. Las respuestas dependen exclusivamente del grado de precisión del proyecto de simulación, donde los análisis de resultados van a contribuir al aporte de las de la toma de mejores decisiones dentro de los sistemas de manufactura.

Una vez establecidas las etapas de verificación y validación se prosigue a realizar la experimentación a través del planteamiento de propuestas para mejorar lo que sea necesario, y es aquí donde se cierra el contexto particular del objetivo del proyecto.

Para la realización de una apropiada experimentación, por ejemplo, cuando se habla de un tratamiento de un sistema terminal es diferente de un sistema no terminal, dependiendo del tipo de sistema el tratamiento que se debe asignar es muy particular. Si hablamos de un sistema terminal, se debe definir el tiempo de simulación y si es no terminal, que estrategias se debe utilizar para revisar el tamaño de réplica.

Para el análisis de sistemas terminales se puede tener en consideración una prueba de normalidad de los datos o simplemente hacer una prueba piloto (no tomar la distribución normal

con desviación y varianza) y sí tomar la muestral. En los sistemas terminales se pueden construir un intervalo de confianza para el promedio y para ello se necesitan correr las réplicas en donde es importante estar seguros de que cada uno de los resultados de las réplicas sean independientes para obtener un intervalo de confianza para cada una de las medidas de desempeño y poder experimentar.

El objetivo de cualquier modelo en la experimentación usualmente está relacionado con comparar alternativas de distribución de planta, comparar políticas de itinerarios o control de piso, comparar políticas de transferencia de material, entre otras. En el software de simulación se debe correr el modelo original y a su vez el modelo propuesto con el escenario a evaluar. Del resultado, por ejemplo, se obtiene un diagrama básico como el de caja y bigotes para que en Excel puntualmente en análisis de datos se puede realizar una prueba t para muestras de datos emparejadas, es decir, contiene las mismas condiciones experimentales y corre la misma semilla que permita analizar los resultados arrojados.

En los sistemas no terminales se puede evidenciar el inicio, tiempo atrás, pero no se evidencia ningún estado o evento que determine el fin de la ejecución o funcionamiento del sistema. El comportamiento de las variables de estado ya ha evolucionado de la etapa de transición y se encuentran en estado estable. Un problema es la estimación de la varianza, como no se tiene un principio y un fin, el concepto de réplica en un sistema no terminal no existe, porque el sistema permanece en la línea del tiempo, por lo tanto, la réplica no se puede identificar.

Una opción es llevarlo a estados, producir cualquier cantidad de producto y hasta donde se produzca eso se puede convertir en una réplica. La estrategia es tomar una longitud muy extensa, se ponen los datos en Minitab. La idea es buscar un corte para decir hasta ahí se puede considerar una réplica tomando un lote de datos y el criterio que se utiliza es la independencia. Para realizar

esto, se puede llevar a cabo en Minitab en la parte estadísticas, series de tiempo y autocorrelación donde sus resultados permite observar el lote de la primera réplica, por lo tanto, las réplicas se pueden emular a partir de un análisis de autocorrelación partiendo en pedazos iguales de una réplica larga.

5. Caso de estudio empresa manufacturera en Santander

El presente caso de estudio presenta todo el proceso de análisis del modelado, que comprende la definición de objetivos, modelo conceptual, modelo computacional, verificación y experimentación que se realiza en una empresa manufacturera establecida como referencia de caso de estudio en el departamento de Santander.

5.1 Definición de Objetivos

En el caso de estudio de una empresa manufacturera en el departamento de Santander se realiza la caracterización del sistema productivo actual con ayuda de todos los datos e información recolectada y suministrada por la empresa. Así mismo, se presenta el desarrollo del modelo construido del proceso real en el software FlexSim y posteriormente se muestra la evaluación de escenarios a partir de la experimentación y el análisis de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.

Además, una vez culminadas las etapas de verificación, validación y experimentación, el éxito de la simulación y del caso de estudio se origina en la medida en que se respondan a todas las preguntas formuladas en el marco metodológico, puesto que a partir de la evaluación y observación de resultados de los escenarios planteados entra a jugar un papel fundamental la toma de decisiones de los gerentes para que se empiece procesar toda la implementación necesaria a corto plazo y la empresa tenga como referencia estas bases proporcionadas por el software para mejorar su proceso y productividad a parte de los escenarios suministrados.

5.2. Modelo Conceptual para el desarrollo del proyecto de simulación

El modelo conceptual propuesto para el caso de estudio se puede observar detalladamente en el Apéndice B realizado en Ms.Visio. El modelo conceptual permite observar todas las entidades, los procesos y los recursos utilizados en el modelo. Así mismo, se puede visualizar los atributos, variables globales del sistema, las medidas de efectividad o desempeño que se utilizan en el sistema real, las localizaciones por procesos o áreas, y por último las materias primas requeridas en el proceso.

5.2.1 Caracterización de las entidades

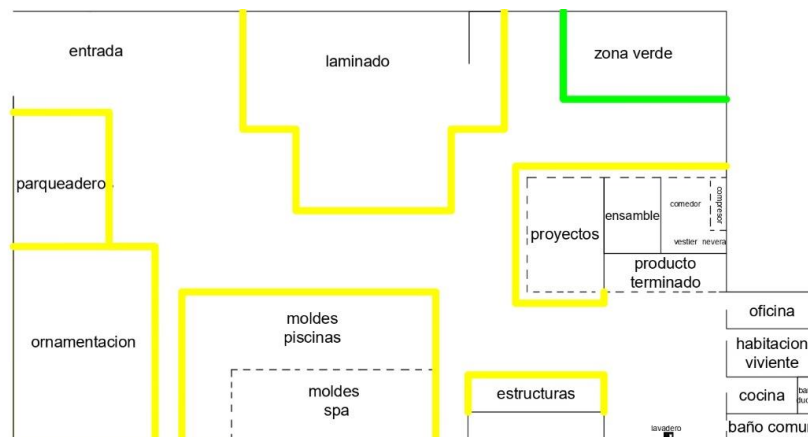
La empresa cuenta con un amplio portafolio de productos entre los que se puede categorizar en piscinas, spas y tinas. Por ello, se denomina entidades dinámicas a cada una de las categorías mencionadas y se definen los estilos de llegada. Por lo cual, se crearon tres nuevas entidades

contenedoras con la apariencia física de las categorías nombradas para que en cualquier momento del proceso sin importar con que se unan mantengan la misma imagen

Para desarrollar el proceso productivo se asigna un “*flowitem*” a cada una de las materias primas que se necesitan durante la fabricación del producto en el respectivo proceso, entre ellas el gel desmoldante, fibra de vidrio, la pintura, la estructura y los accesorios. Es así como, a estas entidades se les asigna una forma básica de aspecto visual para que al combinarse con las referencias de producto siempre tomen la forma de ellas.

Para efectos del modelo se asume que la planta ya cuenta con las materias primas necesarias para la elaboración de las cantidades de referencias que se hagan. En la caracterización de las entidades, se debe agregar que usaremos como criterio de clasificación lo que el modelo requiere que sea definido de manera formal en los que se encuentran descritos posteriormente.

5.2.1.1 Eventos. Es pertinente exponer un plano de la planta manufacturera en Bucaramanga, Santander en donde se representa el sistema a simular, que permita identificar en que puntos de la operación se caracterizan los eventos más importantes desde las estrategias de recolección de datos para los análisis estadísticos (ver figura 11).

Figura 11.*Distribución de la planta actual*

➤ **Eventos identificados en la zona de la cabina.**

El área de la cabina corresponde a lo que en el plano de la planta se denomina laminado.

- Llegada de una referencia de producto (piscina, Spa, Tina) al área de cabina.
- Los empleados finalizan la limpieza del molde.
- Uno de los empleados aplica lubricante al molde.
- Los empleados comienzan aplicación de pintura GELCOAT.
- Inspección del producto para resanar imperfecciones.
- Aplicación de la resina catalizada sobre la pintura gelificada.
- Desmonte del producto para soltar completamente el molde
- Traslado del producto al sitio de recorte de rebaba.

➤ **Eventos identificados en el área de recorte de rebaba.**

El área de recorte de rebaba corresponde a lo que en el plano de la planta se denomina zona verde.

- Eliminación de imperfecciones del borde del producto (rebaba).

- Traslado del producto al área de ensamble.

➤ **Eventos identificados en la zona de instalación de base metálica.**

El área de la instalación de base metálica corresponde a lo que en el plano de la planta se denomina ornamentación.

- Instalación de base metálica en acero inoxidable.
- Traslado del producto al área de moldes

➤ **Eventos identificados en la zona de accesorios**

El área de accesorios corresponde a lo que en el plano de la planta se denomina zona de moldes

- Instalación de sistemas.
- Instalación de almohadas.
- Embalaje del producto.
- Traslado del producto al almacén PT

5.2.1.2 Atributos. Los siguientes atributos son asociados a cada entidad en la medida que van cumpliendo con las actividades requeridas.

- Tipo de producto
- Tiempo de inicio del proceso productivo

5.2.1.3 Variables globales del sistema. Las variables a tener en cuenta para su análisis son las siguientes

- Tiempo medio de flujo para cada referencia
- Sumatoria del tiempo de flujo para cada referencia

5.2.1.4 Medidas de efectividad o desempeño. Se definen las siguientes medidas para corroborar el buen funcionamiento del sistema productivo y de cada proceso que lo conforma.

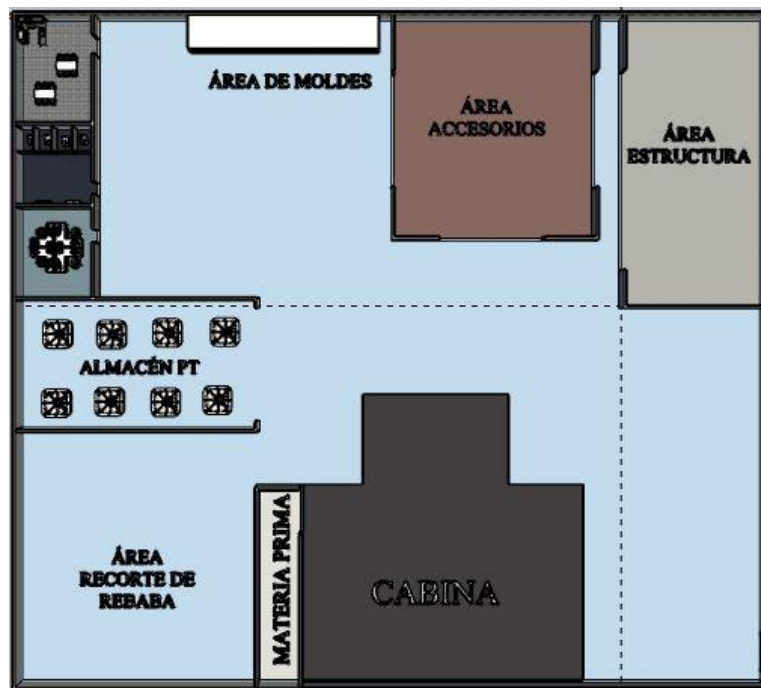
- Tiempo medio de flujo de un producto en el sistema
- Utilización de los Operarios
- Tiempos de operación máximo y mínimo por proceso

5.2.1.5 Localizaciones. Se mencionan las diferentes áreas pertenecientes a la planta de producción para la elaboración de cada una de las referencias de producto y a su vez se ilustra la adaptación hecha para la planta de producción realizado en “*SketchUp*” en la figura 12.

- Área de Cabina
- Área de Instalación de base metálica (estructura)
- Área de accesorios
- Área de recorte de rebaba
- Almacén de producto terminado
- Almacén de Materia Prima

Figura 12.

Adaptación de la planta de producción en SketchUp



5.2.1.6 Principales Materias Primas. Se presenta las principales materias primas utilizadas en la fabricación de cada una de las referencias de producto y se da una breve descripción de cada una.

- **Aerosil 200:** es una sílice pirogénica hidrófila con una superficie específica de 200 m²/g.
- **CRISTALAN® 9 890 GC:** es un gelcoat de poliéster insaturado de alto desempeño, preacelerada, tixotrópico, de color blanco, con excelente resistencia al impacto, al agua y a muchos agentes químicos moderados.
- **CRISTALAN® 4807:** Es una resina de poliéster ortoftálica, tixotrópica y pre acelerada, para embarcaciones

Aplicaciones

1. Cascos, partes y accesorios de embarcaciones con alta productividad.
2. Sistemas reforzados con buen desempeño mecánico y químico y auto-partes.

- **ESTIRENO:** Se trata de un hidrocarburo aromático líquido amarillo e incoloro que se evapora fácilmente y tiene un olor dulce. Se utiliza como materia prima para la producción de numerosos tipos de homopolímeros y copolímeros con propiedades excepcionales empleados en una gran variedad de industrias.

- **TRB 600 y 800:** TRB es un tejido producido a partir de mechas continuas de fibra de vidrio tipo E, con agentes de acoplamiento compatibles con resinas poliéster, vinil éster y epoxi.

Se utilizan en el molde de piezas en plástico reforzado en general y es recomendado para la laminación manual de partes que exigen alta resistencia a la corrosión, como embarcaciones y tanques para industrias químicas.

- **MICROTALC 45:** Es un silicato de magnesio hidratado, con tamaño de partícula controlado, producido a partir de procesos especiales de molienda y clasificación.

- **ESTIRENO MONÓMERO**

- **NOROX® MEKP-925H:** Está específicamente formulado para reducir la generación de gas en aplicaciones críticas de corrosión para resinas de éster de vinilo en gelcoats, barrera revestimientos y estructuras resistentes a la corrosión.

- **PASTAS PIGMENTO CRISTALAN®:** Las pastas pigmento CRISTALAN® son pigmentos sintéticos en polvo de naturaleza orgánica e inorgánica, dispersos en una resina de poliéster insaturada libre de Estireno, la cual se entrecruza con la resina de Gelcoat durante el proceso de curado.

5.2.2 Caracterización de los procesos

Para la caracterización del proceso se detallan varios puntos. El primero es una definición del sistema productivo real, el segundo presenta un diagrama de operaciones del proceso productivo para fabricar los diferentes productos de la empresa y el tercero describe todo el proceso que se lleva a cabo la para su producción.

5.2.2.1 Definición del sistema productivo real. El proceso que se toma como caso de estudio es la fabricación de elementos para el interior y el exterior de zonas húmedas que se utilizan principalmente para la recreación. Para realizar el proyecto el sistema real pertenece a una empresa manufacturera en Bucaramanga, Santander. La información es suministrada por el jefe de la planta de producción encargado de la elaboración y supervisión de cada una de las referencias de producto fabricadas y por la jefe del área, a su vez se obtiene información complementaria de personas encargadas en la parte comercial del funcionamiento de la empresa. A partir de esto, se inicia con la identificación de los actores que tienen mayor relación con el proceso productivo y se seleccionan los criterios de segmentación más adecuados para la correcta definición del sistema en la tabla 2.

Tabla 2.

Criterios de Segmentación

Criterios	Definición del sistema
Límite y frontera	El sistema productivo de una empresa manufacturera ubicada en el departamento de Santander, la cual se dedica a la fabricación e instalación de zonas húmedas.

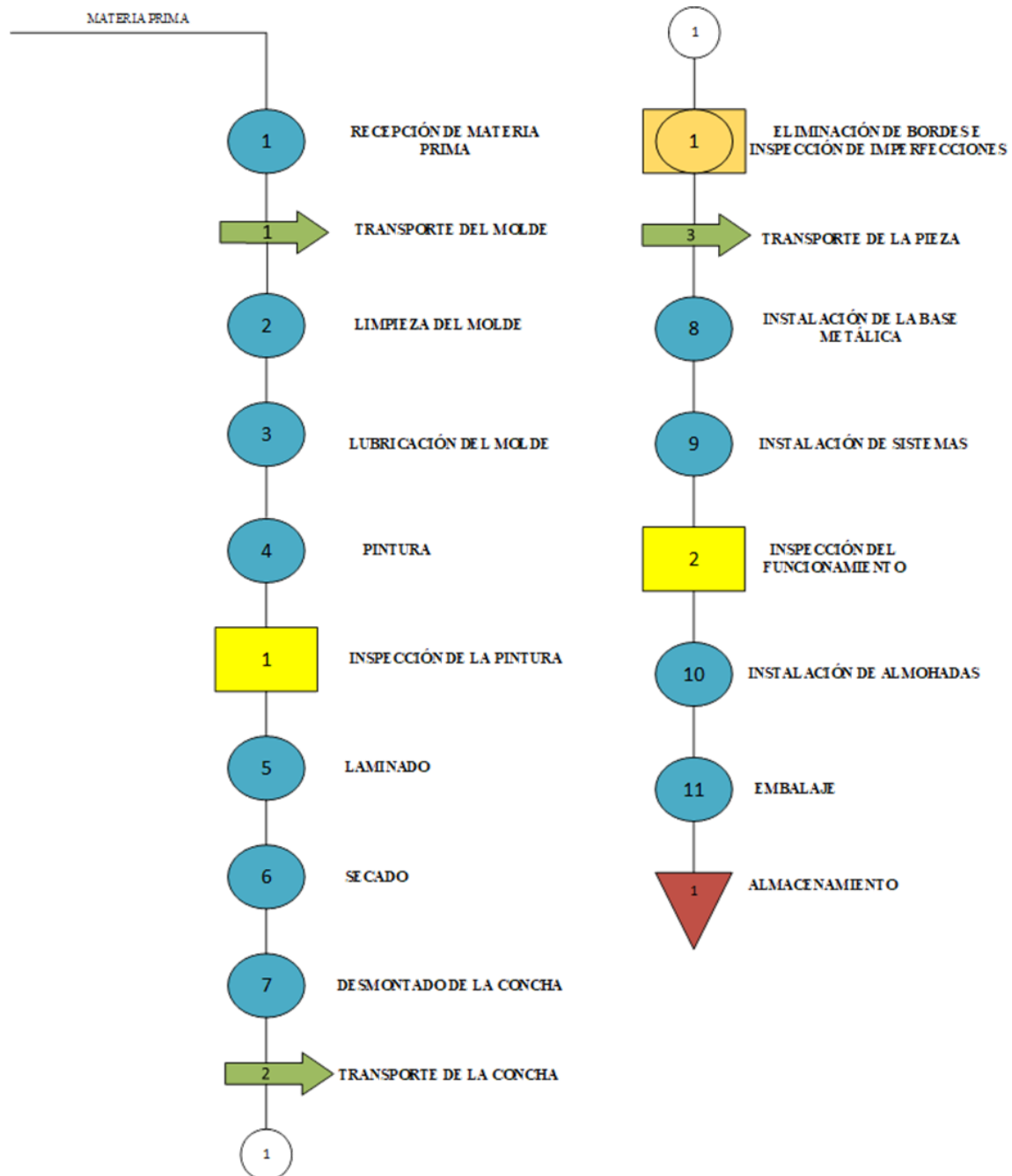
Continuación Tabla 2

Criterios	Definición del sistema
Medio o entorno	Principales proveedores: Unicor S.A, Química Comercial Andina S.A, Stckerl Aceros, Ferretería Aldia, Ferreteria Silva, entre otros. Principales clientes: Población colombiana de estratos altos, constructoras, hoteles y spas.
Procesos	Los procesos que se realizan se dividen en dos áreas, aquellos que se encargan la elaboración de la concha, los cuales son limpieza, lubricación, pintura, laminado, secado, desmontado, eliminación de bordes y los que se encargan de ensamblar los respectivos sistemas elegidos por el cliente y los accesorios finales en la parte de ensamble.
Cartera de productos	Hidropiscinas, Spas, tinas en Fibra de Vidrio, Saunas, turcos, y muebles para el Exterior.
Recursos del sistema	Recursos humanos: Se cuenta con 9 operarios para la elaboración de la concha entre los que se encuentra el jefe de producción y 4 operarios para el área de ensamble. De igual manera, hay un administrativo que se encarga de manejar el papeleo de las órdenes. Recursos físicos: Entre ellos se encuentra maquinaria y herramientas como: un compresor 6.5 caballos, un compresor 2.5 caballos, una pulidora 6000 rpm, 2 pulidora 10.000rpm, 3 taladros 3/8, 2 pistolas de calor, 2 polichadoras de 3000rpm, 2 lijadoras rotor vital, 2 pistolas engelcadoras por gravedad, una engelcadora de tacho de 9 kg, un picador de fibra adaptable a taladro, un picador fibra neumático, una sierra de mano, una tronzadora, un soldador, un computador y herramientas de mano.
Resultados	Elaboración de elementos como Hidropiscinas, Spas, Tinas en Fibra de Vidrio, Saunas, Turcos, y Muebles para el Exterior en alta calidad y según las preferencias del cliente.

5.2.2.2 Diagrama de Operaciones. En la figura 13 se muestra el diagrama de operaciones del proceso productivo para fabricar los diferentes productos de la empresa.

Figura 13.

Diagrama de Operaciones



5.2.2.3 Descripción del proceso productivo. En la tabla 3 se presenta una descripción detallada del proceso productivo que permite conocer cómo se encuentra actualmente el sistema real.

Tabla 3.

Descripción del proceso productivo

Fase	Proceso	Descripción
Elaboración de la concha	1. Recepción de la materia prima.	Se recibe y se estudia la orden de producción, según la referencia, el color, las medidas y los sistemas de masaje deseados y se elige el molde adecuado para su elaboración.
	2. Transporte del molde	Se traslada el molde a la cabina o sitio de pintura, laminado y terminado.
	3. Limpieza del molde	Se limpia cuidadosamente con agua y detergente el molde para quitar suciedad y restos de resina de trabajos anteriores hasta que el molde quede completamente libre de imperfecciones.
	4. Lubricación del molde	Se aplica un lubricante (Gel desmoldeante) que impide que la pintura se adhiera al molde.
	5. Pintura	Se aplica una capa de pintura GELCOAT sobre el molde del color seleccionado por el cliente, cubriendo uniformemente la superficie.
	6. Inspección de la pintura	Inspección a la concha aplicando una masilla en las imperfecciones para resanarlas.
	7. Laminado	Con un rodillo de brocha aplicamos uniformemente una capa de resina catalizada, sobre la pintura gelificada, que tiene un secado entre 10 y 25 minutos una vez realizada la mezcla. Por este motivo, se va catalizando el material cada 5 minutos a medida que se va aplicando para evitar que se seque y se creen grumos dañando la pieza. Después de la capa líquida de resina se pone sobre el molde una capa de tela de fibra de

Continuación Tabla 3

Fase	Proceso	Descripción
Ensamble		vidrio, se eliminan burbujas de aire con un rodillo metálico acanalado y una brocha, para eliminar el aire entre el molde y la fibra de vidrio y acoplar completamente la capa al relieve (piscinas 4 o 5 capas, spas y tinas 3 capas).
	8. Secado	Se ubica la pieza en un lugar abierto y se procede a secarla a temperatura ambiente.
	9. Desmontado de la concha	Se golpea suavemente la concha por los bordes hasta que esta suelte completamente del molde.
	10. Transporte de la concha	Se transporta la pieza al sitio de recorte de rebaba.
	11. Eliminación de bordes e inspección de imperfecciones.	Se elimina las imperfecciones del borde de la concha (rebaba) y los restos de fibra de vidrio hasta obtener un borde redondeado y pulido. También, se inspecciona la pieza por completo para lijar los imperfectos que tenga y se realiza el polichado.
	12. Transporte de la pieza	Se traslada la concha terminada al sitio de ensamble.
	13. Instalación de la base metálica	Se ubica la concha en la base metálica elaborada en acero inoxidable y se asegura con tornillos a la concha. El producto genérico no incluye decoración del exterior del producto.
	14. Instalación de sistemas	Se procede a instalar los sistemas de boquillas y mangueras, el sistema eléctrico de luz, la bomba hidromotor, y de los sistemas de masajes elegidos por el cliente entre el aeromasaaje, el hidromasaaje y la cromoterapia.
	15. Inspección del funcionamiento	Se llena el producto con agua y se pone un funcionamiento para verificar que no haya ninguna fuga o problema con alguna instalación.
	16. Instalación de almohadas	Se instalan los accesorios finales al producto.

Continuación Tabla 3

Fase	Proceso	Descripción
	17. Embalaje	Se cubre con papel cartón y plástico los bordes de la concha para proteger de golpes y se envuelve todo el producto.
	18. Almacenamiento final	Dependiendo del destino del producto se transporta a la bodega de producto terminado, al showroom o directamente a dirección de entrega al cliente.

5.2.3 Caracterización de los recursos

En la caracterización de los recursos se consideran los diferentes empleados y herramientas utilizadas para la realización de las actividades en las entidades.

5.2.3.1 Recursos.

➤ Operarios

- 9 empleados en el área de cabina.
- 2 empleados en el área de ensamble
- 2 empleados en el área de estructura

➤ Máquinas

- Compresor 6.5 Caballos
- Compresor 2.5 Caballos
- Pulidora 6000 rpm
- Pulidora 10000 rpm
- 3 taladros

- 2 lijadoras rotorvital
- 2 pistolas engelcadoras por gravedad
- Engelcadora tacho 9kg
- Picador de fibra adaptable a un taladro
- Picador sobra neumático, una cierra de mano, una tronzadora, un soldador, un computador y herramientas de mano.

5.3 Modelo Computacional

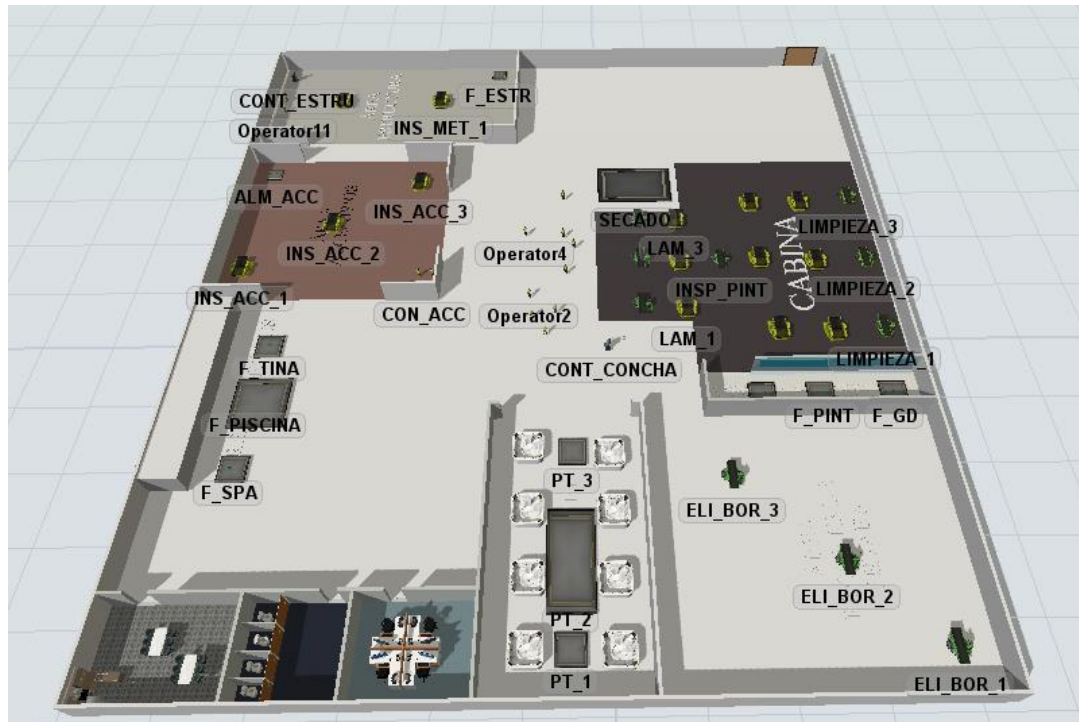
La creación del modelo computacional se realiza en el software FlexSim. El modelo cuenta con todo lo plasmado en el modelo conceptual y a su vez con lo descrito anteriormente en la caracterización de las entidades, procesos y recursos.

5.3.1 Definición del modelo formal en FlexSim

Se ha elegido al software FlexSim para realizar este proyecto, debido a que aporta una gran flexibilidad para simular cualquier tipo de proceso y la construcción de modelos de simulación con la mayor rapidez y con una facilidad de uso extraordinaria, dado que tiene un lenguaje propio llamado “*Flexscript*”. El modelo final se puede observar en el Apéndice A el cual cuenta con una herramienta adicional como lo es la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) como se puede observar figura 14.

Figura 14.

Modelo Computacional en el software FlexSim



Además, para la formulación del modelo se pidió a la empresa la información necesaria sobre llegadas de tiempos de cada uno de los procesos.

5.3.1.1 Determinación de tiempos de procesamiento. Para la representación del proceso en el software FlexSim, es necesario obtener información sobre los tiempos de procesamiento de los diferentes procesos llevados a cabo para la elaboración de cada una de las entidades. Los tiempos son proporcionados por el jefe de producción, tiempos históricos que a través de los años y de la experiencia han sido recolectados en diferentes espacios y estudios realizados solamente sobre las horas directas del proceso, es decir, no se tiene en cuenta los tiempos de descanso de los operarios ni los tiempos de transporte.

Para efectos del proyecto, debido a que la mayoría de los tiempos proporcionados son discretos, escasos y previamente establecidos por el jefe de planta expuestos en el Apéndice H, se decide otorgar probabilidades de ocurrencia a cada uno de ellos, seleccionando cinco tipos de referencia por cada producto. Esto con el fin de no sucumbir en riesgos de que las distribuciones probabilísticas generen escenarios extraños por la mínima cantidad de datos existentes de un proceso no estandarizado. En la tabla 4 se evidencia la probabilidad que se le adjudica a cada tiempo de procesamiento por producto y por proceso.

Tabla 4.

Tiempos de procesamiento para el proceso productivo

Entidades	Proceso	Probabilidad
PISCINA	Programación OP	3
	Limpieza del molde	$P(4) = 0,2 ; P(6) = 0,2 ; P(7) = 0,6$
	Encerado del molde	$P(17) = 0,6 ; P(12) = 0,2 ; P(8) = 0,2$
	Pintura	$P(11) = 0,4 ; P(17) = 0,2 ; P(21) = 0,2 ; P(23) = 0,2$
	Inspección de la pintura	1
	Laminado	$P(32) = 0,2 ; P(45) = 0,2 ; P(64) = 0,2 ; P(66) = 0,2 ; P(72) = 0,2$
	Secado	12
	Desmolde	$P(5) = 0,2 ; P(6) = 0,2 ; P(7) = 0,2 ; P(8) = 0,4$
	Eliminación de Bordes	$P(3) = 0,2 ; P(4) = 0,4 ; P(6) = 0,4$
	Instalación Metálica	NO APLICA
	Instalación de Sistemas	12

Continuación Tabla 4

Entidades	Proceso	Probabilidad
SPA	Programación OP	3
	Limpieza del molde	$P(2) = 0,2 ; P(2,5) = 0,2 ; P(3) = 0,6$
	Encerado del molde	$P(2,5) = 0,2 ; P(3) = 0,8$
	Pintura	$P(5) = 0,2 ; P(5,5) = 0,3 ; P(6) = 0,2 ; P(7) = 0,4$
	Inspección de la pintura	1
	Laminado	$P(12) = 0,2 ; P(13) = 0,2 ; P(14) = 0,2 ; P(16) = 0,2 ; P(17) = 0,2$
	Secado	12
	Desmolde	$P(3) = 0,8 ; P(4) = 0,2$
	Eliminación de Bordes	$P(1,5) = 0,6 ; P(2) = 0,4$
	Instalación Metálica	$P(3) = 0,2 ; P(4) = 0,6 ; P(6) = 0,2$
	Instalación de Sistemas	$P(18) = 0,4 ; P(24) = 0,6$
TINA	Programación OP	3
	Limpieza del molde	1
	Encerado del molde	$P(1,5) = 0,4 ; P(2) = 0,6$
	Pintura	$P(2,5) = 0,4 ; P(3) = 0,3 ; P(3,5) = 0,4$
	Inspección de la pintura	0,5
	Laminado	$P(9) = 0,6 ; P(10) = 0,4$
	Secado	12
	Desmolde	2
	Eliminación de Bordes	1
	Instalación Metálica	$P(2,5) = 0,8 ; P(3) = 0,2$
	Instalación de Sistemas	12

Para el desarrollo y la verificación del modelo, se hace uso del software FlexSim para realizar un modelo del sistema de una empresa manufacturera en Santander, que permita evaluar políticas operativas antes de que sean puestas en funcionamiento, evitando así problemas que son realmente comunes en la puesta en marcha de un nuevo sistema.

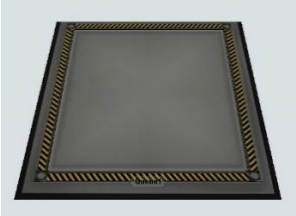
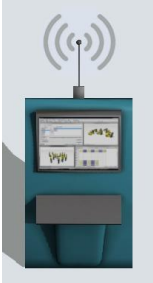
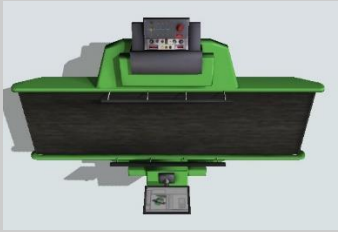
El software nos permite observar y probar cambios en cada una de las operaciones en este proceso de manufactura, de la manera más rápida y sencilla, para evitar riesgos, costos y extensos tiempos que conllevan el experimentar con cambios en el mundo real.

Por lo que se refiere a la construcción del modelo se realiza un estudio detallado para observar cómo funciona el sistema actual en su totalidad, más concretamente la producción de piscinas, spas y tinas para entrar a analizar los diferentes procesos que se encuentran inmersos en el mismo. Esta simulación posibilita la observación y el análisis del comportamiento del sistema, así por medio de los resultados que proporciona se valora el funcionamiento de la planta y se estudia la posibilidad de realizar una mejora que apoye a mejorar su capacidad.

Para ello, se exponen los recursos fijos o “*Fixed Resources*” que contiene los diferentes objetos que permiten simular las estaciones o localizaciones y los “*Task Executors*” que son los recursos móviles que se encargan de transportar los “*flowitems*” de un lugar a otro. Para el desarrollo del modelo en el software FlexSim haremos uso de los recursos mencionados anteriormente que corresponden a los siguientes objetos discretos (ver tabla 5). Simultáneamente, para las definiciones de cada uno de los recursos se tienen en cuenta las establecidas en el instructivo de aprendizaje del software de simulación FlexSim escrito por Edwin Alberto Garavito.

Tabla 5.

Recursos fijos y ejecutores de tarea del modelo

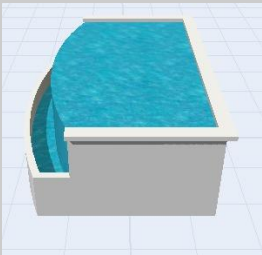
Fixed Resources	TaskExecuters
Source 	Operator 
Queue 	Dispatcher 
Processor 	
Combiner 	

5.3.2 Fixed Resources

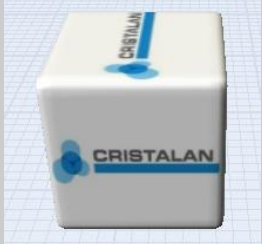
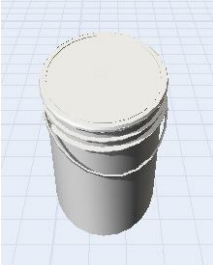
5.3.2.1 Source/Fuente. La fuente se encarga de crear los diferentes “*flowitems*” que se usan a lo largo de todo el proceso productivo. Cada una se encarga de producir un tipo de “*flowitem*” a los que se le pueden asignar diferentes etiquetas.

La mayoría de los modelos empiezan con un “*source*”. Para efectos del modelo de simulación de este proyecto se crean ocho fuentes, tres de ellas corresponden a la creación de los moldes de cada referencia de producto denominados piscina, spa y tina, la cuarta origina el gel desmoldeante necesario para separar el molde del producto, la quinta genera la pintura GelCoat, la siguiente envía la fibra de vidrio que se emplea en el proceso de laminado, la séptima se encarga de elaborar la estructura metálica que se requiere para los spas y las tinas, y la última provee la caja que contiene los accesorios a elección del cliente para la instalación. Todas las fuentes cuentan con una secuencia de llegada “*Arrival Sequence*” que en el instante cero producen una cantidad puntual previamente definida (ver tabla 6).

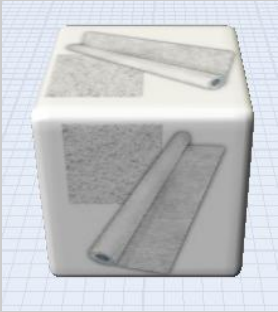
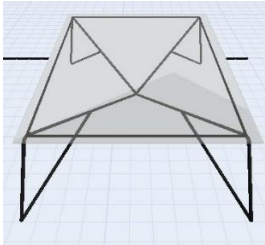
Tabla 6.
Fuentes empleadas en el modelo de simulación

Source	Flowitem	Propiedades						
Piscina		Source FlowItem ClassPISCINA Arrival StyleArrival Sequence Arrivals - F_PISCINA Arrivals1Labels0 <table><tr><td></td><td>ItemName</td><td>Quantity</td></tr><tr><td>Arrival1</td><td>Product</td><td>1</td></tr></table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	1
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	1						

Continuación Tabla 6

Source	Flowitem	Propiedades						
Spa		Source FlowItem Class SPA Arrival Style Arrival Sequence Arrivals - F_SPA Arrivals 1 Labels 0 <table> <tr> <th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr> <tr> <td>Arrival1</td><td>Product</td><td>1</td></tr> </table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	1
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	1						
Tina		Source FlowItem Class TINA Arrival Style Arrival Sequence Arrivals - F_TINA Arrivals 1 Labels 0 <table> <tr> <th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr> <tr> <td>Arrival1</td><td>Product</td><td>1</td></tr> </table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	1
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	1						
Gel Desmoldante		Source FlowItem Class GEL Arrival Style Arrival Sequence Arrivals - F_GD Arrivals 1 Labels 0 <table> <tr> <th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr> <tr> <td>Arrival1</td><td>Product</td><td>3</td></tr> </table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	3
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	3						
Pintura		Source FlowItem Class PINTURA Arrival Style Arrival Sequence Arrivals - F_PINT Arrivals 1 Labels 0 <table> <tr> <th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr> <tr> <td>Arrival1</td><td>Product</td><td>3</td></tr> </table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	3
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	3						

Continuación Tabla 6

Source	Flowitem	Propiedades						
Fibra de Vidrio		Source FlowItem ClassFIBRA Arrival StyleArrival Sequence Arrivals - F_FV Arrivals1Labels0 <table><thead><tr><th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr></thead><tbody><tr><td>Arrival1</td><td>Product</td><td>3</td></tr></tbody></table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	3
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	3						
Estructura Metálica		Source FlowItem ClassESTRUCTURA Arrival StyleArrival Sequence Arrivals - F ESTR Arrivals1Labels0 <table><thead><tr><th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr></thead><tbody><tr><td>Arrival1</td><td>Product</td><td>3</td></tr></tbody></table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	3
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	3						
Accesorios		Source FlowItem ClassACCESORIOS Arrival StyleArrival Sequence Arrivals - F_ACC Arrivals1Labels0 <table><thead><tr><th></th><th>ItemName</th><th>Quantity</th></tr></thead><tbody><tr><td>Arrival1</td><td>Product</td><td>3</td></tr></tbody></table>		ItemName	Quantity	Arrival1	Product	3
	ItemName	Quantity						
Arrival1	Product	3						

5.3.2.2 Queue/Fila. Esta es un área de almacenamiento que se usa para mantener las entidades cuando el proceso posterior no puede recibirla hasta completar su capacidad máxima. Por defecto, trabaja con la disciplina FIFO, es decir, primeras en entrar primeras en salir.

El modelado presenta once filas, las primeras tres se encargan de almacenar los moldes de producto por cada fuente y almacenarlas mientras pasan al proceso de limpieza, también se encargan de etiquetarlas de acuerdo con el tipo cada vez que entra una referencia en ella. De igual

manera, las siguientes cinco funcionan como almacenes de materia prima, pues reciben las cajas llenas con los materiales necesarios para la fabricación y las almacena hasta que el puerto del del próximo proceso esté disponible para iniciar. Por último, se seleccionan tres filas que cumplan la función del almacén de producto terminado por referencia.

Acorde con lo anterior, se programan las filas de almacén de producto terminado para enviar un mensaje y que cada vez que una referencia ingrese les permita a las demás fuentes crear el “*flowitem*” necesario y en la cantidad precisa para dar inicio nuevamente al proceso. Es así como, en la figura 15 se muestra cómo se establece su envío del mensaje y la creación del “*flowitem*”.

Figura 15.

Configuración para envío del mensaje y creación del flowitem

The image shows a configuration window for a message-based event-driven process chain (EPC3) component. The window is divided into two main sections: 'On Message' and 'Create Flow Items'.

On Message Section:

- From:** current
- To:** Model.find("AM_1")
- Delay Time:** 0
- Condition:** true
- Parameter 1:** 1
- Parameter 2:** 15

Create Flow Items Section:

- Quantity to Create:** msgparam1
- Flowitem Bin Rank:** msgparam2
- Destination:** current

Los parámetros de la parte superior de la ilustración indican la configuración adecuada para enviar un mensaje, en la primera casilla se selecciona el recurso que va a enviar el mensaje, en la siguiente el recurso receptor. El tercero corresponde al tiempo de retraso para la llegada del mensaje seguido de la condición para que se cumpla, es decir, cada vez que ocurra el suceso seleccionado envíe el mensaje. Por tanto, en el parámetro uno se debe denotar la cantidad de entidades a crear y en el parámetro dos la posición dentro del rank del “*flowitem bin*”.

Los parámetros de la parte inferior competen al recurso receptor del mensaje, puesto que se creará un gatillo en “*On Message*” que le ordene a la fila crear un “*flowitem*” con la cantidad de parámetro uno y el “*flowitem*” del parámetro dos.

5.3.2.3 Processor/Procesador. Se emplea para simular el funcionamiento de las entidades en el modelo. Este recurso fijo se modela como un retraso debido al tiempo, su tiempo total de procesamiento se divide entre “*setup*” y el tiempo de procesamiento. Por otra parte, permite procesar más de una entidad a la vez.

La simulación que se realiza contiene once procesadores, tres de ellos cumplen la función del proceso de limpieza de las piezas que provienen del área de moldes, solo puede procesar una entidad al tiempo y son los únicos procesadores que cuentan con tiempos de preparación “*setup*” que corresponde a la programación de la orden de pedido y tiempos de procesamiento por cada entidad empleando tres operadores.

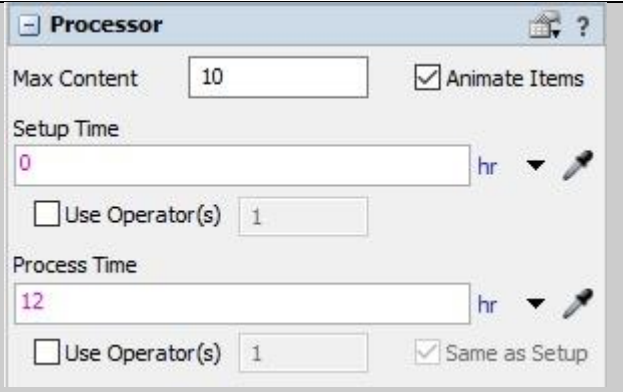
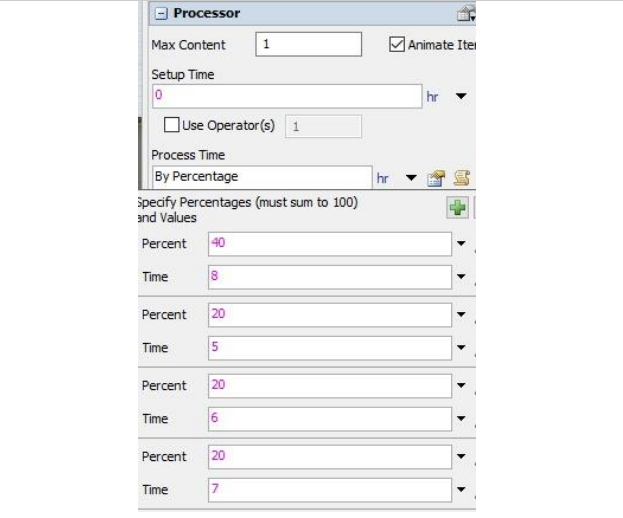
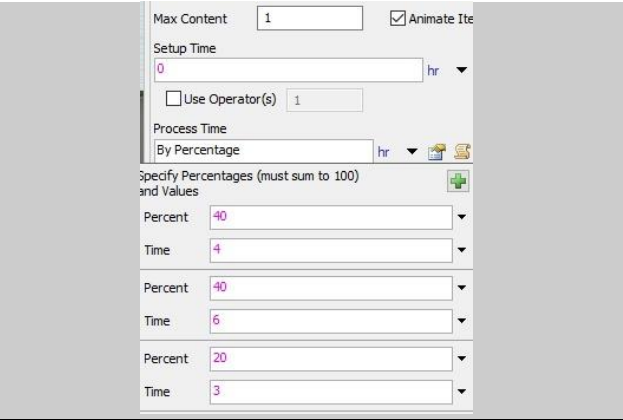
El cuarto corresponde al proceso de inspección de pintura, este recurso tiene tiempos determinísticos y puede procesar tres unidades al mismo tiempo para lo cual necesita tres operarios. De igual manera, el quinto procesa con tiempos determinísticos máximo 10 unidades al tiempo y no necesita ningún operario para su funcionamiento.

Los siguientes seis se dividen entre tres que corresponden al proceso de desmontado y tres al de eliminación de bordes respectivamente, en ambos se encuentran inmersos diferentes tiempos de procesamiento para cada referencia, solo pueden procesar una entidad al tiempo y requieren tres operadores para su uso. En la tabla 7, se muestra la configuración correspondiente de su tiempo de procesamiento de uno de los tres procesadores para cada proceso.

Tabla 7.
Tiempos de procesamiento by percentage en los diferentes procesos

Processor	Propiedades
Limpieza	Processor Max Content 1 ☒ Animate Iter Setup Time 3 hr ☒ Use Operator(s) 1 Process Time By Percentage hr Specify Percentages (must sum to 100) and Values Percent 20 Time 4 Percent 20 Time 6 Percent 60 Time 7 Processor Max Content 3 ☒ Animate Iter Setup Time 0 hr ☐ Use Operator(s) 1 Process Time Values By Case hr Value item.Type Setup Cases Case Default Time 1 Case 1 Time 1 Case 2 Time 1 Case 3 Time 0.5

Continuación Tabla 7

Processor	Propiedades
Secado	 The screenshot shows the 'Processor' properties dialog box for the 'Secado' (Drying) process. It includes fields for 'Max Content' (10), 'Setup Time' (0 hr), 'Process Time' (12 hr), and 'Use Operator(s)' (1). The 'Animate Items' checkbox is checked, and the 'Same as Setup' checkbox is also checked.
Desmontado	 The screenshot shows the 'Processor' properties dialog box for the 'Desmontado' (Disassembly) process. It includes fields for 'Max Content' (1), 'Setup Time' (0 hr), 'Process Time' (By Percentage), and 'Use Operator(s)' (1). The 'Animate Items' checkbox is checked. Below the 'Process Time' field, there is a section titled 'Specify Percentages (must sum to 100) and Values' with four rows of 'Percent' and 'Time' fields. The values are: Row 1: Percent 40, Time 8; Row 2: Percent 20, Time 5; Row 3: Percent 20, Time 6; Row 4: Percent 20, Time 7.
Eliminación de Bordes	 The screenshot shows the 'Processor' properties dialog box for the 'Eliminación de Bordes' (Edge Removal) process. It includes fields for 'Max Content' (1), 'Setup Time' (0 hr), 'Process Time' (By Percentage), and 'Use Operator(s)' (1). The 'Animate Items' checkbox is checked. Below the 'Process Time' field, there is a section titled 'Specify Percentages (must sum to 100) and Values' with four rows of 'Percent' and 'Time' fields. The values are: Row 1: Percent 40, Time 4; Row 2: Percent 40, Time 6; Row 3: Percent 20, Time 3; Row 4: Percent 0, Time 0.

5.3.2.4 Combiner. Se emplea para agrupar varias entidades en una sola y recorrer a través del modelo. En este recurso se puede llevar a cabo una unión permanente “*join*” o puede ser empacado para en un momento posterior puedan ser separados “*pack*”. A través del primer puerto

de entrada, recibe la entidad que va a actuar como el contenedor y por los demás puertos recibe las entidades que van a hacer combinadas.

El modelo muestra catorce “*combiners*”, tres pertenecientes al proceso de lubricación, donde reciben por el primer puerto de entrada el contenedor proveniente del área de limpieza y el segundo puerto de entrada recibe la caja con la materia prima necesaria. A partir de esto, por medio de la función “*join*” las combina tomando el aspecto visual del contenedor, es decir, el molde. El recurso solo puede procesar una entidad al tiempo y necesita tres operadores para su manejo. Al igual que los anteriores, el mismo tiene tiempos de procesamiento diferentes para cada referencia.

Para el proceso de pintura se designan tres “*combiners*”, cada uno encargado de unir por referencia las entidades provenientes del proceso de lubricación y la pintura del almacén de materias primas. Aquí se establecen tiempos de procesamiento para cada referencia y tres operadores para su empleo. Igualmente, se asignan tres “*combiners*” para simular el proceso de laminado que une las entidades provenientes de la inspección de pintura con la materia prima necesaria como la fibra de vidrio.

Algo semejante ocurre con los tres “*combiners*” que se encargan del proceso de la instalación de la estructura metálica a las tinajas y los spas, puesto que solo pueden procesar un “*flowitem*” al tiempo y precisan de dos operadores. De esta manera, reciben por el primer puerto de entrada el contenedor proveniente de la eliminación de bordes y el segundo puerto de entrada recibe la estructura metálica. Del mismo modo, por medio de la función “*join*” las combina tomando nuevamente el aspecto visual del contenedor, es decir, el molde, y se asignan tiempos de procesamiento para las diferentes referencias. Lo mismo ocurre con el proceso de instalación de accesorios, el cual se lleva a cabo de manera similar a los anteriores procesos.

5.3.3 TaskExecuters

5.3.3.1 Operator/Operario. Realiza el transporte de las entidades de un recurso a otro para ejecutar diferentes operaciones en las estaciones o “*FixedResources*”. Cada operador puede recibir múltiples solicitudes por tareas de varios objetos en el modelo, así es posible personalizarlo para llevar grandes cantidades de “*flowitems*”.

Para el desarrollo de la simulación en el software se crean trece operadores, nueve encargados desde el proceso de limpieza hasta el de eliminación de bordes y sus respectivos transportes. En cuanto al proceso de instalación de estructura metálica y de accesorios es necesario crear dos operadores para cada proceso, los cuales se encargan de operar a las máquinas y por ende llevar a cabo los transportes.

5.3.2.2 Dispatcher. Se emplea para controlar un grupo de operadores y de transportes. Las tareas son enviadas al “*dispatcher*” desde el recurso y él se encarga de delegar los operadores que tiene bajo su mando. Así, por ejemplo, si algún objeto le envía o delega una tarea al “*dispatcher*” el cual se encuentra conectado por puerto central con el objeto indicando el número de operarios que exige, este a su vez elige la cantidad indicada de los operadores que están conectados por puerto de entrada para desempeñar la tarea.

El modelado, requiere de tres “*dispatcher*”. El primero correspondiente a los procesos que intervienen para la creación de la concha y tiene bajo su cargo nueve operadores que se trasladan en el área de la cabina, en el área de recorte de rebaba y en el área dispuesta para el secado. El segundo, se localiza en el área de ensamble, donde maneja dos operarios para el proceso de instalación de estructura metálica, el tercero se posiciona en el área de accesorios, donde se

encargan dos operarios para el proceso de la instalación de los accesorios personalizados a gusto del cliente.

5.3.4 Controladores

Los controladores son las reglas que gobiernan el sistema dentro del software, así cuenta con una colección de varios tipos de lógica que representan el comportamiento del sistema para simularlo de forma común y de fácil acceso para el usuario. Dentro de ellos, se encuentran los “*triggers*”, “*Flow Tab*”, entre otros.

5.3.4.1 Triggers/Gatillos. El empleo de ellos causa un comportamiento específico como respuesta a un evento determinado o cuando cumple con la condición programada. Los más comunes son “*On Reset*”, “*On Message*”, “*On Entry*”, “*On Exit*”, se pueden encontrar en la mayoría de los objetos. Por su parte, los gatillos que se relacionan con el procesamiento, carga o descarga aparece en los objetos apropiados.

➤ **On Entry:** Se produce cuando se da la entrada de una entidad al objeto. En el proyecto, se usa para asignar atributos como el tiempo de fin del ciclo y generar etiquetas por referencia para diferenciar los productos entre sí.

➤ **On Message:** Este gatillo se produce cuando es enviado un mensaje al objeto, ya sea desde otro para coordinar la lógica o desde el mismo objeto para crear un retardo. Este comando se implementa para recibir un mensaje que permita crear un nuevo “*flowitem*” cada vez que una entidad ingrese al almacén de producto terminado, y poder volver a iniciar el proceso productivo.

Para esto, cada una de las filas de producto terminado por referencia envía un mensaje a cada fuente de materia prima para que produzca los implementos necesarios para su fabricación.

➤ **On Exit:** Este ocurre cada vez que una entidad deja el objeto. Así, se selecciona este gatillo para dar inicio al proceso productivo en cada uno de los almacenes que guarda los moldes de las piscinas, los spas y las tinas, puesto que, al abandonar la fila, se le designa el atributo de tiempo de inicio, la cual posteriormente será usada para determinar el tiempo de flujo de cada entidad.

➤ **On Reset:** El modelo de simulación es reiniciado. Es el lugar indicado para establecer las condiciones iniciales de las variables y las etiquetas. En el software, se dispuso este gatillo para limpiar todos los datos de tiempo medio de flujo, tiempo de flujo y total producido cada vez que se reinicia el modelo.

5.3.5 Asignación de atributos al modelo

Los atributos dentro del modelo de FlexSim son características propias de un objeto, llamados etiquetas o “*labels*” y permiten mantener información destacada acerca del objeto. Las etiquetas pueden ser encontradas desde el cualquier parte del modelo y en cualquier instancia de su ejecución.

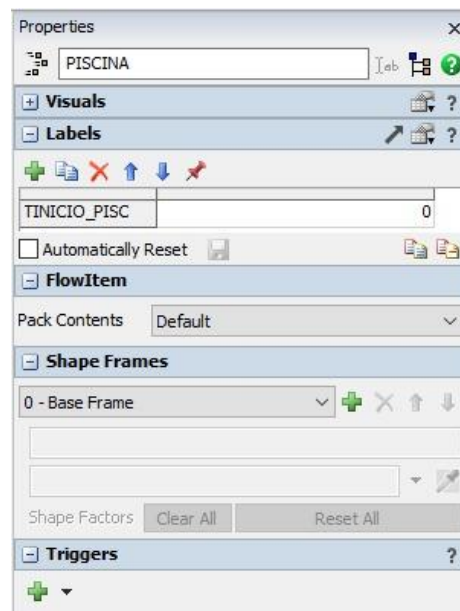
Una vez se origina cada “*flowitem*” en el modelo, para crear las etiquetas numéricas se selecciona la entidad que se desee y en su propiedad “*Label*”, se escoge el símbolo de la adición y se elige “*Add Number Label*” para luego indicar el nombre que requiere la etiqueta. En el modelado se crearon diferentes etiquetas numéricas para cada una de los “*flowitems*”, por lo general se

utilizan para diferenciar el tipo de producto, pieza, materia prima que llegue al sistema o se encuentre inmersa en el proceso,

El atributo que se crea es el tiempo de inicio para cada referencia, puesto que es necesario conocerla para calcular el tiempo de ciclo que es una medida de desempeño que se usa para este proyecto y se agina a los almacenes de moldes como se puede observar en la figura 16.

Figura 16.

Pestaña Labels de un Flowitem

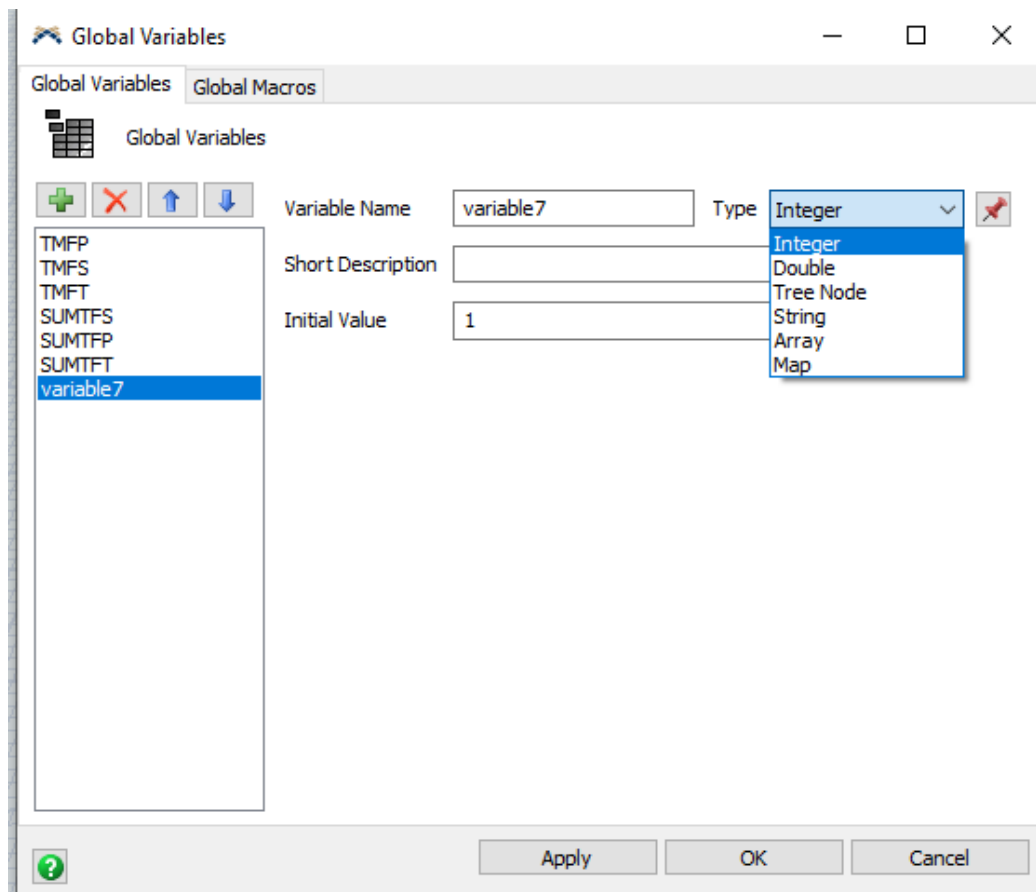


5.3.6 Variables Globales

Las variables globales son estados cuyos valores se establecen y se transforman. El término global se refiere al alcance de la variable dentro del modelo en FlexSim. Para su creación se ingresa en el menú de “Toolbox”, se selecciona el icono de la adición en “Modeling Logic” y elegir “Global Variable”. A continuación, se muestra una ventana y sus respectivas propiedades en la figura 17.

Figura 17.

Configuración de las variables globales



Cuando se crea una variable, es necesario indicar el nombre de la variable, se recomienda introducirlo en letras mayúsculas para diferenciarlas a la hora de programar, luego se debe elegir qué tipo de variable corresponde junto con el valor que inicia, las más comunes son “*Double*”, “*Integer*” y “*Tree Node*”, las cuales corresponden a datos reales, números enteros y datos de nodo de árbol que son de un tipo más avanzado respectivamente e indicar el valor con el cual la variable inicia la simulación. En el modelo, se crearon seis variables globales, establecidas como el tiempo medio de flujo (TMF) y sumatoria del tiempo de flujo (SUMTF) para cada una de las referencias de tipo “*Double*” e iniciando en 0.

5.3.7 Medidas de Desempeño

La importancia de poder medir el desempeño de los procesos radica en el conocimiento de la calidad con la que se desarrollan las actividades dentro de la empresa, con la intención de mejorar la eficacia y eficiencia implementando distintas estrategias que mejoren la competitividad. Un supervisor se debe encargar de vigilar las medidas planteadas para verificar las áreas en donde se cumple con las expectativas y las áreas que se deben reforzar a partir de mediciones cuantitativas, lo cual es esencial para un trabajo que se orienta a la producción.

En cuanto al modelo, al analizar el proceso productivo para la elaboración de spas, piscinas y tinas se pretende estudiar los resultados de la simulación para obtener indicadores de desempeño, a través de los cuales se evalúa si el sistema en cuestión está de acuerdo con los resultados esperados o si es necesario implementar alguna mejora que permita reducir tiempos y costos del proceso.

Con el propósito de valorar el rendimiento del sistema definido en el software, se crea la variable global TMF (Tiempo medio de flujo) para determinar el tiempo que demora cada referencia en pasar por el sistema completo. Dado que, al ser una medida de desempeño global del sistema, que integra cada parte del proceso, se puede emplear para determinar si los escenarios que se proponen optimizan la ejecución del proceso. En seguida, se presenta la formula con la cual se define este indicador, donde se resalta que se fija un tiempo medio de ciclo para cada uno de los productos que se fabrican en el sistema mencionados al comienzo del numeral.

$$TMF = \frac{\sum TF_i}{N}$$

TMF - Tiempo medio de flujo

TF_i – Diferencia entre el tiempo final del proceso y el tiempo de inicio

N – Cantidad de unidades producidas

Igualmente, se define otra herramienta visual como apoyo para distinguir el tiempo medio de flujo por referencia en una tabla que expone tres valores para cada uno, el mínimo, el máximo y promedio.

Por otro lado, no se debe enfocar solo en el proceso si no en todos los factores que intervienen en él, entre ellos se encuentran los operarios, identificar si existe alguna limitación en el comportamiento y así evitar demoras. Por ello, se define como medida de desempeño el factor de utilización de cada uno de los catorce operarios para establecer si el trabajo se recarga a más a unos que a otros, si el número de operarios es el necesario para la realización del proceso y a qué se deben las demoras o los tiempos libres de cada uno. Por consiguiente, se utiliza la herramienta del software FlexSim especializada en proveer las estadísticas denominada “*Dashboard*”, para generar catorce distintos diagramas de torta para cada operario que indique el estado durante toda la simulación, en otras palabras, que el gráfico muestre el porcentaje del tiempo que el operario esté siendo utilizado o vacío.

Otro rasgo para considerar como medida de desempeño es el tiempo de procesamiento de cada estación, para determinar cuál de ellas causa que se extienda el tiempo esperado y se disminuya la productividad, siendo lo que en teoría de restricciones se conoce como los procesos “cuellos de botella”, que se convierten en el eslabón más débil del sistema evitando que se aproveche la capacidad a su totalidad. En general, todas las empresas buscan el incremento de la efectividad y la productividad en todos sus procesos, a la par del desarrollo de ventajas competitivas que le permitan el crecimiento, reconocimiento y posicionamiento en el mercado por esto, se considera de suma importancia identificar este recurso cuello de botella como medida del rendimiento (Carvajal Zambrano, 2018).

Del mismo modo, es preciso explicar la manera en la que se define este factor, en el “*Dashboard*” se establecen diez tablas, una por cada estación, la cual muestra el valor mínimo, máximo y promedio de cada tiempo de procesamiento dependiendo del tipo de referencia, siendo el valor “1” para los spas, el “2” para las piscinas y el “3” para las tinas. Esto permite detectar cual es el recurso que actúa como cuello de botella en cada referencia, descubrir cuales son las posibles razones que ocasionan esta demora y establecer alguna medida de mejora para aumentar la capacidad del recurso y del sistema en general.

5.3.8 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

Como recurso experimental adicional se establece una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI), con el objetivo de proveer una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para disminuir la incertidumbre y la variabilidad puesto que, permite modificar los valores de la simulación sin tener que conocer sobre la programación del software, evaluando diferentes escenarios dentro del sistema y observando el comportamiento probable si se aplica el escenario propuesto.

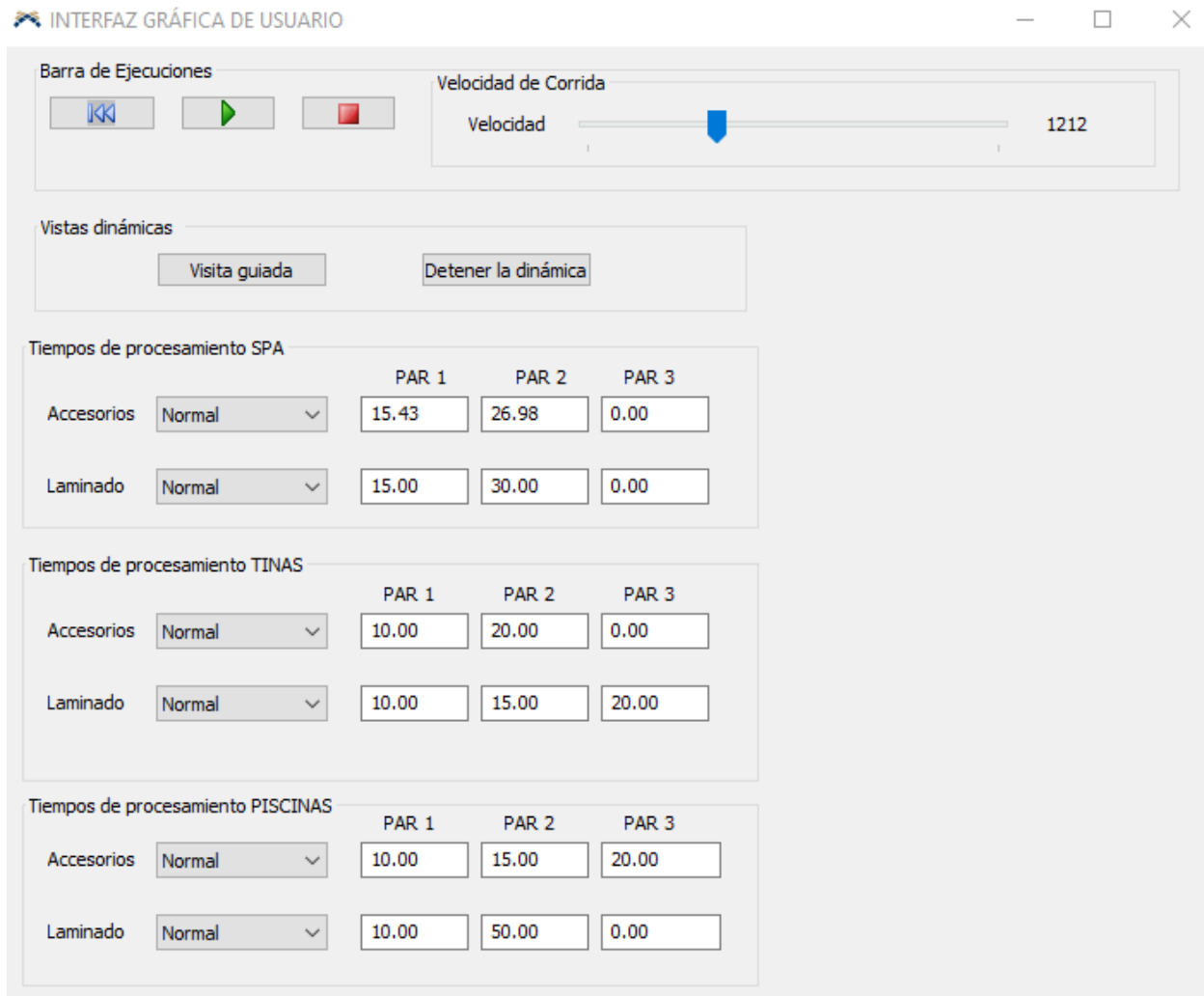
En este sentido, se procede a crear a través de la pestaña “*Toolbox*”, “*Modeling Logic*”, la herramienta propuesta. Una vez se selecciona “*Graphical User Interface*”, se despliega dos ventanas, una responde a las propiedades y controles de la interfaz y otra donde se programa la apariencia visual del “*Model Control GUI*”.

Para la construcción del GUI, se establece una interfaz principal que contiene cinco subgrupos dentro del mismo. El primero es una barra encargada de las ejecuciones del modelo, el segundo una vista dinámica del mismo, el tercero, cuarto y quinto se asocian a los tiempos de

procesamiento de los cuellos de botella identificados en el proceso para cada referencia de producto (ver figura 18).

Figura 18.

Interfaz Gráfica de Usuario



Para la barra de ejecuciones, se designan cinco botones. Tres de ellos se encargan de ejecutar el modelo, detenerlo y de reestablecer las variables en el modelo antes de ejecutar. Para ello, se añade el código que contiene los botones originales del software. Los otros dos botones,

hacen parte de poder duplicar la velocidad de ejecución actual del modelo y a su vez disminuirlo cuando se prefiera.

En la barra de vistas dinámicas, primero se crea un “*Presentation Builder*” para desarrollar una presentación rápida del modelo, que al ejecutarla ofrece la vista 3D secuencial del modelo. Para lo cual, se construye un “*Flypath*” que instaura una ruta de vuelo que permite mover y girar la vista en las posiciones de preferencia por los programadores. Una vez realizado, es posible poder configurar los botones de visita guiada y detener la dinámica, a través de un código del editor.

Además, para las barras de tiempos de procesamiento por referencia, en su configuración se crean cuatro etiquetas en cada una de las máquinas correspondientes al proceso de accesorios y laminado, una que define la distribución de probabilidad a elegir dentro de las tres opciones presentadas como distribución normal, distribución uniforme discreta y distribución triangular, y las demás pertenecen a la definición de cada parámetro necesario para la distribución.

Asimismo, se configura el tiempo de cada proceso para que pueda variar según la elección del usuario y pueda definir los parámetros acordes a las nuevas necesidades que se requieren. En este sentido, se asignan códigos para que cuando el usuario seleccione la distribución deseada, emerja una nueva ventana que le solicite los nuevos parámetros. Esta ventana es un nuevo GUI, que se conecta a la interfaz principal a través de un código en el “*Combobox*”.

Posteriormente, se crean tres interfaces de usuario pertenecientes a cada una de las distribuciones mencionadas. Para la distribución normal, se requiere introducir los valores correspondientes a la media y la desviación, quienes a su vez se asignan a los parámetros definidos a cada proceso. De la misma manera se designan dos botones, el primero es denotado cancelar que se le otorga el control de atributo “*close*” y el segundo, aplicar que allí se adjudica el control de atributo “*apply*” y “*close*”.

De manera análoga, se construye un GUI para la distribución uniforme discreta donde se solicitan los valores para los parámetros de mínimo, máximo y otro para la distribución triangular para los valores de mínimo, moda y máximo. Del mismo modo, se le atribuyen los botones de cancelar y aplicar para que desarrollen las mismas funciones.

Este procedimiento se realiza para cada tiempo de procesamiento por referencia, dando como resultado la creación de dieciocho Interfaz de Usuario auxiliares para la introducción de los parámetros y una interfaz principal con la que puede interactuar el usuario.

Con base a lo anterior, se le ofrece al usuario la posibilidad de manejar la ejecución del modelo desde la interfaz principal, conocer la planta y cada uno de los procesos que intervienen en la fabricación y realizar modificaciones a los tiempos de procesamiento de los cuellos de botella de cada referencia como se aprecia en el Apéndice A.

5.4 Verificación del modelo

El desarrollo del modelo lleva consigo una verificación constante. Lo que se busca a través de ella es remover errores no intencionales en la lógica del modelo, teniendo en cuenta que la complejidad del modelo aumenta dependiendo de su tamaño. El modelado se desarrolla por etapas para que la verificación de este sea más accesible. La verificación del modelo se define como "asegurar que el programa de computadora del modelo computarizado y su implementación sean correctos" (Sargent, 2013).

Para ello, esta se lleva a cabo paso a paso en los diferentes procesos en el que se encuentra estructurado el sistema. Inicialmente se crean todas las fuentes de materia prima necesarias en el proceso junto con las fuentes de las entidades principales. Del mismo modo, se generan las filas

requeridas para cada fuente que permita verificar su ejecución corriendo el modelo por primera vez y observar que las entidades lleguen en el tiempo determinado. Esto nos permite dar el paso para la creación de los diferentes procesadores correspondientes al proceso de limpieza y los “*combiners*” del proceso de lubricación y pintura, verificado posteriormente con la creación de filas parciales para cada proceso y así examinar la ejecución del modelo durante su desarrollo.

Así mismo, se procede a dar un tercer paso continuando con los demás procesos. Se crean un procesador que hace la función de inspección de la pintura, “*combiners*” para el laminado, un procesador para secado y otros procesadores para la desmontada del molde y la eliminación de los bordes, creando nuevamente filas parciales con el objetivo de garantizar una verificación constante del modelo, corriéndolo para que todos los conectores de flujo y actividades que se vayan a hacer en cada proceso vayan siendo realizadas con un proceso lógico acorde al modelo conceptual.

También, se realiza a un cuarto paso con la creación de “*combiners*” pertenecientes a los procesos de instalación metálica e instalación de accesorios junto con las filas de producto terminado de spa, piscina y tina que permita confirmar que el modelo cumple con las características del sistema real y se refleje la producción una vez se corra el modelo. Posteriormente, se inserta el plano de la planta elaborado en “*SketchUp*” y operadores involucrados en las distintas etapas del proceso para construir el modelo final.

Una vez construido el modelo final, se ejecuta la prueba de tres corridas en el software con diferentes límites de tiempos, para verificar que al transcurrir las unidades de tiempo no se vaya a presentar ningún error de compilación del modelado y constatar que se ejecuten todas las actividades adecuadas del sistema, reflejando que no existe errores de control de flujo, errores en unidades de medidas y errores de inicialización.

Otra alternativa de verificación empleada para el proyecto es la revisión de los valores de las etiquetas y las tablas de datos, para constatar que el comportamiento es acorde al necesario y que los cambios que se realicen en el instante sean ejecutados correctamente. También, se recurre a una revisión por parte de una persona ajena al proyecto para verificar su buen funcionamiento.

5.5 Validación del modelo

El objetivo de esta sección es validar que el funcionamiento del sistema en FlexSim se asemeje al del sistema real de la empresa de manufactura, es decir, si los resultados o el comportamiento del modelo representan de manera fidedigna el real. Para esto, se contrasta el modelo computacional y el sistema real. La validación es una validación estadística, es decir, datos del modelo computacional contra datos del sistema real. En este sentido, se tiene en cuenta los siguientes factores:

- La elección de una medida de desempeño denominada tiempo medio de flujo por referencia para realizar las comparaciones entre el modelo computacional y el sistema real.
- La información proporcionada por el jefe de producción sobre los tiempos de operación y las desviaciones por referencia según la experiencia y datos históricos de la empresa.
- La elaboración de intervalos de confianza a un nivel de significación del 0.05%.

En consecuencia, se inicia con el tratamiento de datos del sistema real para construir los intervalos de confianza que correspondan.

5.5.1 Intervalo de confianza para el sistema real

Se toman los valores definidos por el jefe de producción encontrados en el Apéndice H de cada uno de los cinco tipos de producto por referencia para construir los intervalos de confianza, teniendo en cuenta una desviación estándar es de 10 horas para las piscinas, 6 horas para los spas y 3 horas para las tinas, valores proporcionados por la empresa a partir de su experiencia y su labor diaria, utilizando un valor de significancia (α) igual a 0.05. Así, se definen tres distintos intervalos para el tiempo medio de flujo, uno para cada referencia con el propósito de entender dentro de que valores se aprecia y poder comparar con el modelo en el software partiendo de la formula general que se expresa enseguida:

$$\bar{X} - Z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- **Intervalo de confianza para las piscinas**

$$132,2 - 1,96 * \frac{10}{\sqrt{5}} \leq \mu \leq 132,2 + 1,96 * \frac{10}{\sqrt{5}}$$

$$123.43 \leq \mu \leq 140.97$$

- **Intervalo de confianza para los spas**

$$72,8 - 1,96 * \frac{6}{\sqrt{5}} \leq \mu \leq 72,8 + 1,96 * \frac{6}{\sqrt{5}}$$

$$67.54 \leq \mu \leq 78.06$$

- **Intervalo de confianza para las tinas**

$$48,3 - 1,96 * \frac{3}{\sqrt{5}} \leq \mu \leq 48,3 + 1,96 * \frac{3}{\sqrt{5}}$$

$$45,67 \leq \mu \leq 50,93$$

5.5.2 Intervalos de confianza para el modelo computacional

Para la validación del modelo computacional, se utiliza una herramienta adicional de llamada “*Experimenter*”, que se encuentra en la parte superior en el menú de estadísticas.

Esta herramienta, permite realizar diseños experimentales del modelo a través de múltiples escenarios de ejecución. Se realiza la respectiva corrida del “*Experimenter*” para observar el comportamiento del tiempo medio de flujo de cada una de las referencias de producto, utilizando un escenario y diez replicas, con longitud de corrida de 1000 horas.

En muchas ocasiones, una estimación puntual de un parámetro de interés no proporciona suficiente información, considerando la necesidad de estimar un intervalo que sea más útil sobre el parámetro desconocido, puede que el intervalo contenga el verdadero valor con un nivel de confianza del 95%, permitiendo aproximar un rango de valores donde se encuentra el valor real de la variable en la población. A partir de esto, en la Figura 19 , Figura 20, Figura 21 se utiliza un nivel de significancia de (α) igual 0,05 para crear un intervalo de confianza que permita estructurar entre que valores se encuentra la media del tiempo de flujo de cada una de las entidades principales, y a su vez que gráficamente presente a través de un diagrama de caja y bigote los grupos de datos numéricos (replicas) generadas, indicando la variabilidad de cada uno de los valores entre extremos superior e inferior.

Figura 19.

Tiempo medio de Flujo Spa

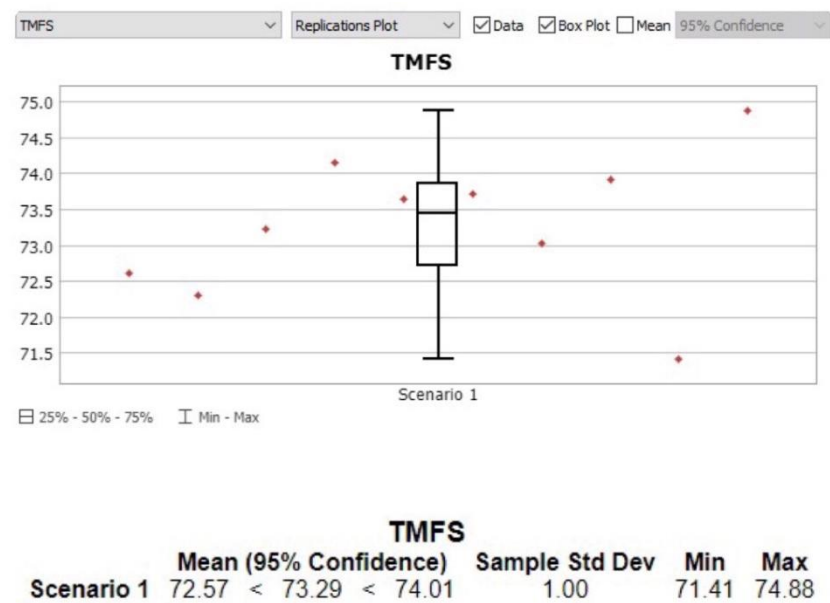


Figura 20.

Tiempo medio de flujo Piscina

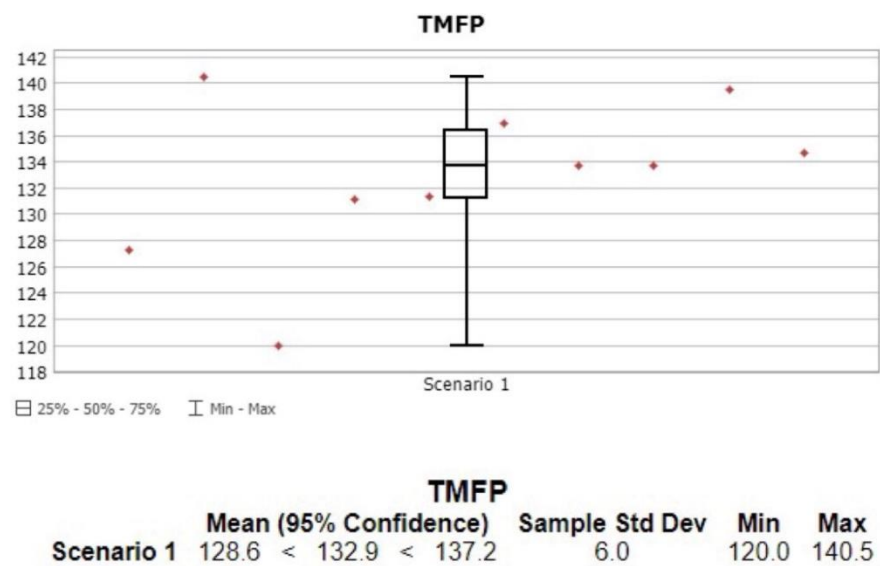
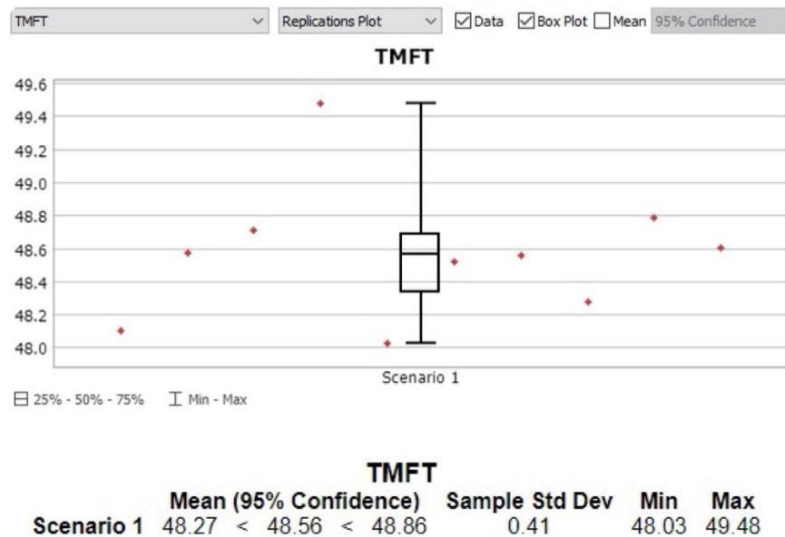


Figura 21.*Tiempo medio de flujo Tina*

Todo esto parece confirmar la validación del modelo computacional, considerando que los intervalos de confianza obtenidos a través del “*Experimenter*” de cada referencia, se localizan dentro de los intervalos creados para el sistema real, esto quiere decir que el modelo en el software representa de manera veraz, precisa y creíble el proceso real, al proporcionar el mismo comportamiento. Por lo tanto, el modelo es válido para la variable del tiempo medio de flujo.

5.6 Experimentación y análisis de las medidas de desempeño

A medida que se realizan ensayos de prueba y error con el sistema real estos tienden a ser costosos, demandan tiempo y pueden resultar peligrosos. Por esta razón, la simulación se enfoca directamente a la reducción de costos, tiempo y riesgos.

Existen algunas características que permiten ver la simulación desde otra perspectiva, convirtiéndola en una herramienta útil para la planeación y toma de decisiones dentro de las organizaciones, teniendo en cuenta que:

- Se puede modelar cualquier sistema.
- Es menos costosa, demorada y peligrosa que el experimentar con el sistema real.
- Proporciona información sobre las medidas de desempeño
- Muestra el comportamiento de sistema a través del tiempo.

Por otra parte, la simulación enfoca su aplicabilidad en varias áreas de la industria, y por supuesto a la rama de la ingeniería industrial, para describir:

- Flujo de trabajo
- Planeación de la capacidad
- Reducción del tiempo de ciclo de trabajo
- Planeación del uso de recursos de materia prima
- Análisis de cuellos de botella
- Análisis de distribución de planta

De este modo, se definen los diferentes escenarios de reconversión industrial que permiten analizar el comportamiento de las medidas de desempeño y examinar si los resultados propuestos en cada uno de ellos revelan alguna mejora que se pueda implementar en el sistema productivo para disminuir los tiempos asociados al proceso.

5.6.1 Escenarios de Reconversión Industrial

En el proyecto se pretende dar a conocer que, por medio de la utilización del software de simulación en las empresas manufactureras, se contribuye extensamente en la labor de la mejora continua de las mismas; pero más específicamente se quiere mostrar que en una empresa manufacturera en Bucaramanga, Santander dedicada a la fabricación de elementos para el interior y el exterior de zonas húmedas, es posible mejorar las medidas de desempeño como el tiempo medio de flujo, la utilización de los operarios y el tiempo de procesamiento de cada máquina, de acuerdo a los resultados proporcionados en el modelo creado en el software FlexSim.

Dicho de otra manera, el modelo desarrollado ofrece grandes beneficios, entre ellos están el ahorro de costos para la organización, pues no deberá hacerse ningún cambio a menos que se demuestre lo contrario en la simulación, el ahorro de tiempo para los analistas y por último, la posibilidad de generar distintos escenarios con el modelo creado y hacer cambios dentro de una actividad o proceso, obteniendo resultados con cada una de las situaciones que puedan ser llevadas a la práctica en realidad.

De manera puntual, los escenarios se refieren al ámbito de reconversión empresarial, identificando las diferentes áreas y componentes en las que se puede llevar a cabo una modernización en este ambiente de globalización económica (ver figura 22).

Figura 22.

Componentes de la reconversión industrial



Ahora bien, el área de interés para este proyecto es la producción, modernizar la tecnología utilizada, mejorar la estructura y los procesos administrativos que conlleva. Así, debe centrarse en consolidar procesos de investigación y desarrollo que garantice tanto la innovación permanente en productos y procesos, como la diversificación de productos y la calidad internacional de estos. De igual modo, se debe manejar el recurso humano hacia la búsqueda de la capacitación y estabilidad en función de la productividad. (Jaramillo Jaramillo, 2012)

Llegados a este punto, se plantean tres diferentes escenarios de reconversión que permitirá a la empresa mejorar su productividad, reajustando la capacidad productiva con la incursión de nuevas tecnologías y en la estructura de sus procesos productivos. El primero es un planteamiento de una nueva distribución de la planta de producción, pues implica un cambio global de procedimientos y procesos técnicos. El segundo y el tercero, es la adquisición de una nueva maquinaria que permita mejorar la eficiencia del proceso y disminuir tiempos de procesamientos.

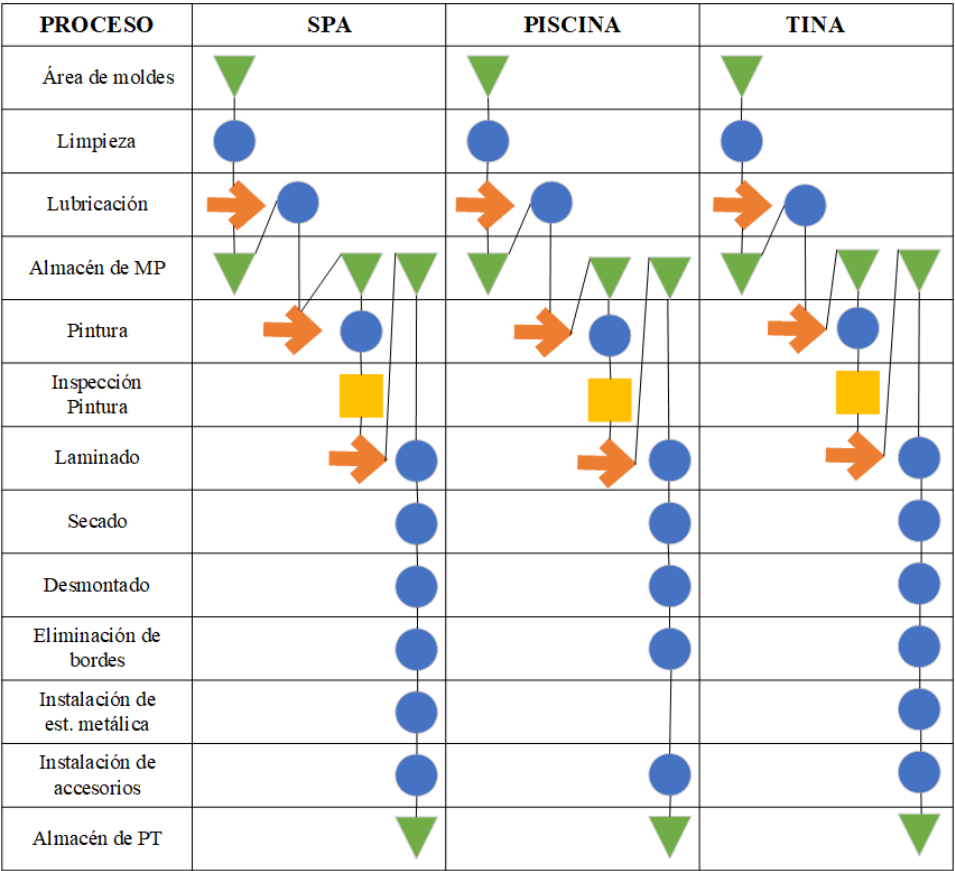
5.6.1.1 Redistribución de planta. Actualmente la planta cuenta con 4 zonas delimitadas para realizar todos los procesos para la elaboración de cada producto. De esta manera, en la primera, en el área de la cabina se realiza la limpieza del molde, la lubricación, la pintura y el laminado, congestionando la producción al solo poder fabricar un producto al tiempo, mientras que, si se encuentran divididos por procesos, facilitaría la circulación y aumentaría la eficiencia de la producción al permitir realizar los procesos al tiempo de diferentes productos sin centralizar toda la zona en uno mismo.

Por esta razón, se evidencia la necesidad de proponer una nueva distribución de la planta de producción que les permita dividir cada zona en los procesos que se llevan a cabo y evitar la monopolización de toda el área por la elaboración de un único producto. Para esto se planea aplicar una adaptación de la metodología planificación sistemática de diseño (SLP) teniendo en cuenta algunos de sus pasos, el cual se plasma en el Apendice I.

En primer lugar, en la figura 23 se elabora la matriz multiproducto, que brinda información valiosa de la forma como se distribuyen las operaciones de cada producto siguiendo una secuencia preliminar, de acuerdo con como se establezcan los procesos, para revisar si existe similitud en la secuencia de los diagramas. Este diagrama muestra los movimientos que se generan entre los centros de actividad, convirtiéndose en el pilar fundamental para el desarrollo del análisis de proximidad del proyecto, donde se plasma el recorrido entre los procesos por cada referencia.

Figura 23.

Diagrama Multiproducto



A continuación, en la figura 24 se realiza una revisión de transferencias entre estaciones para desarrollar el análisis de flujos, en la matriz de doble entrada denominada origen-destino, para este caso en particular se describen los movimientos independientes de cada referencia entre los procesos sin tener en cuenta los volúmenes totales.

Figura 24.*Matriz Origen Destino*

	Limpieza	Lubricación	Almacén de MP	Pintura	Inspección Pintura	Laminado	Secado	Desmontado	Eliminación de bordes	Instalación de est. metálica	Instalación de accesorios	Almacén de PT
Área de moldes	SPT											
Limpieza		SPT										
Lubricación			SPT	SPT								
Almacén de MP		SPT		SPT		SPT						
Pintura			SPT		SPT							
Inspección Pintura						SPT						
Laminado			SPT				SPT					
Secado								SPT				
Desmontado									SPT			
Eliminación de bordes										ST	P	
Instalación de est. metálica											ST	
Instalación de accesorios												SPT

Acto seguido, en figura 25 se evalúa los movimientos en total de manera independiente que tiene cada producto, es decir, se determina la cantidad de veces que aparece la referencia en la matriz origen destino.

Figura 25.*Análisis de movimientos*

S	P	T
17	16	17

Adicionalmente, en la figura 26 se lleva a cabo el análisis por pares donde se evalúan los movimientos conjuntos. Por ejemplo, para verificar el producto S con el producto P, se busca en

la matriz el total de movimientos que realizan juntos y se procede de la misma forma para todos los pares de producto hasta completar la matriz de transferencia por pares.

Figura 26.

Análisis de transferencia por pares

	P	T
S	15	17
	P	15
		T

En la figura 27, a través del índice de similitud, podemos comprobar que las tres referencias se comportan como una familia de productos debido a que disponen de un valor que se considera alto.

Figura 27.

Índice de similitud

	P	T
S	0,88	1
	P	0,88
		T

Más adelante, se realiza la relación de flujo entre estaciones, empleando cuatro niveles de intensidad entre las relaciones, "A" siendo absolutamente necesaria, "E" para especial, "I" para

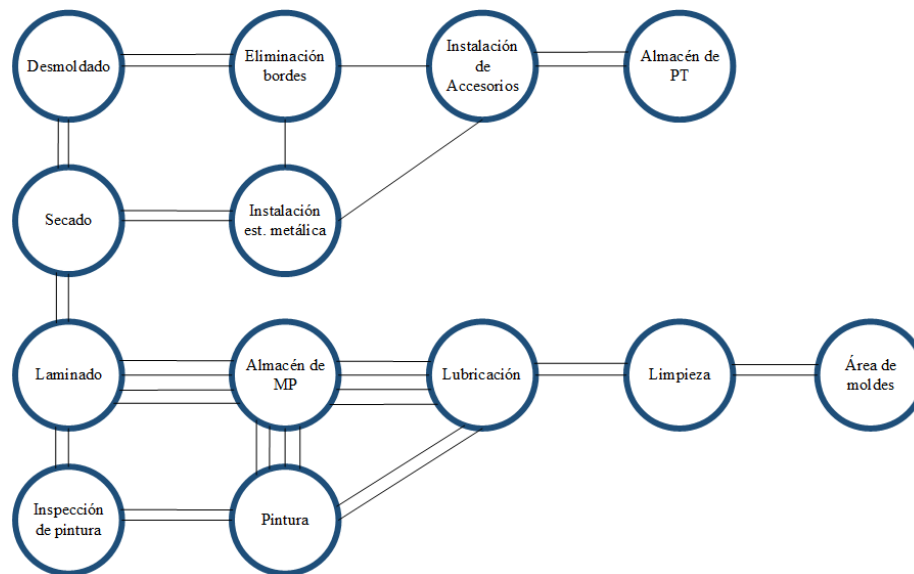
importante y "O" para ordinaria. A partir de esto, se definen la cantidad de movimientos que se realizan entre procesos por cada referencia. Así, se toma el valor superior e inferior para determinar los intervalos para cada nivel y se asignan las respectivas letras como se muestra en la figura 28.

Figura 28.

Matriz Relación de Actividades

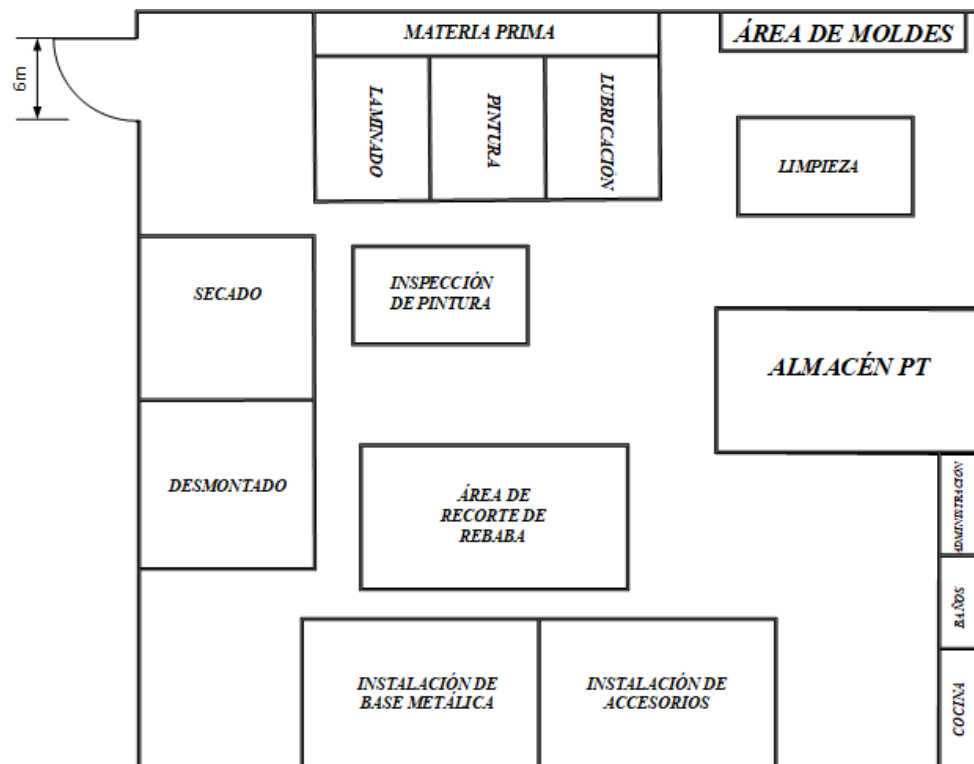
	Limpieza	Lubricación	Almacén de MP	Pintura	Inspección Pintura	Laminado	Secado	Desmontado	Eliminación de bordes	Instalación de est. metálica	Instalación de accesorios	Almacén de PT
Área de moldes	I											
	Limpieza	I										
		Lubricación	A	I								
			Almacén de MP	A		A						
				Pintura	I							
					Inspección Pintura	I						
						Laminado	I					
							Secado	I				
								Desmontado	I			
									Eliminación de bordes	O	O	
										Instalación de est. metálica	O	
											Instalación de accesorios	I

Con base a lo anterior, la figura 29 muestra el diagrama de relaciones de actividad, iniciando su elaboración con las relaciones que cuentan con una categoría más alta hacia la más baja. Este diagrama es la primera versión gráfica de la ubicación de las actividades siguiendo el criterio de análisis de flujos que permiten definir intensidades en el análisis de proximidad. Cabe resaltar, que aún no existe ningún tipo de relación espacial-dimensional, simplemente se presenta una ubicación relativa.

Figura 29.*Diagrama relación de actividad*

El diagrama de relación de actividad brinda una alternativa que permite construir el plano de la nueva distribución de planta, en él se tiene en cuenta la distribución espacial dimensional para cada proceso (ver Figura 30). Para la nueva distribución de planta se tiene en cuenta factores especiales, como la entrada a la planta para la ubicación del almacén de materia prima. Además, se tiene en cuenta la localización de producto terminado, el baño, la cocina y la oficina administrativa siendo construcciones definidas para ello y que no es posible realizar cambio alguno.

Teniendo en cuenta la nueva propuesta de la distribución de planta, se ofrece a la empresa manufacturera utilizada como caso de estudio este escenario, que le permite brindar un mejor incentivo al trabajador, establecer mínimos tiempos de fabricación, incrementar la productividad y disminuir los costos, del mismo modo disminuir las distancias a recorrer por los materiales herramientas y trabajadores.

Figura 30.*Propuesta para la nueva distribución de planta*

5.6.1.2 Compra de sistema para reforzar el proceso de laminado. Para el segundo escenario planteado en el Apéndice J, se considera examinar el tiempo medio de flujo y el tiempo de procesamiento de cada operación en el modelo computacional original. En función de esto, se detecta un cuello de botella en el área de laminado para las referencias de las piscinas.

Adicionalmente, los procesos relacionados a la elaboración de la concha se realizan de forma manual, los operarios se encargan de mezclar las resinas con la fibra de vidrio y aplicarla al molde de manera uniforme con ayuda de rodillos y otras herramientas, esto ocasiona que este procedimiento tome un mayor tiempo para realizarse y se puedan presentar desperdicios de materia prima como la fibra de vidrio, la cual es el componente principal y no se puede reutilizar. Para esto, se propone la compra de un sistema compuesto de bomba y pistola diseñadas para aplicar

resinas con fibra de vidrio para reforzar las estructuras, que permite cambiar en cuestión de segundos las cuchillas encargadas de aplicar la mezcla correcta, siendo una pistola ergonómica y duradera para los trabajos más exigentes que permitirá minimizar tiempos y reducir costos al evitar desperdicios de material (ver figura 31).

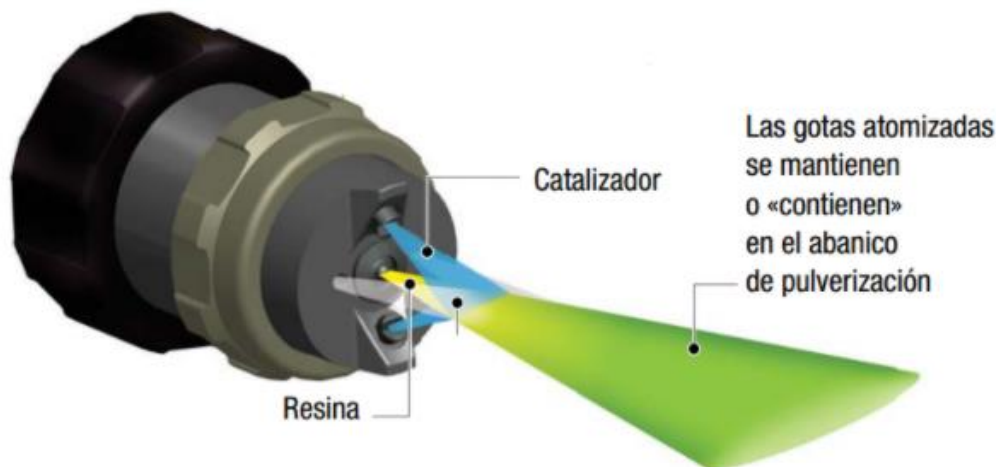
Esta pistola de pulverización de resina permite obtener la cantidad de fibra que necesita con menos giros de hebra. Con menos hebras, las probabilidades de enredos son menores, el tiempo de funcionamiento aumenta y se mejora el manejo. El producto que se escapa y cae al suelo o sobre la pared o en la ropa del operario, supone dinero desaprovechado, así que esta herramienta cuenta con una tecnología avanzada para controlar y contener el abanico de pulverización que evita que se escapen sustancias volátiles. Además, su baja velocidad crea muy pocas turbulencias o alteraciones en la resina cuando entra en contacto con el molde reduciendo el riesgo de inclusiones de aire y porosidad.

Entre sus características técnicas se pueden mencionar:

- Caudal mínimo de aire: 6,8 bar (a 100 psi)
- Gel de mezcla interna: 0,354 m³/min (12,5 scfm)
- Corte de mezcla interna: 0,064 m³/min (2,25 scfm)
- Mezcla externa: 0,06 m³/min (2,0 scfm)
- Cortadora: 0,467 m³/min (16,5 scfm)
- Presión máxima del aire: 8,7 bar, 0,87 MPa (125 psi)

Figura 31.

Pistola de pulverización de resina



Con la adquisición de esta nueva herramienta, el tiempo de proceso de laminado se disminuiría un 30%, en vista de que los operadores no deben aplicar la resina catalizada con la brocha e ir fabricando la mezcla conforme la necesidad, si no que la herramienta se encarga de realizar todo este proceso por el operador, ahorrando tiempo y mejorando la calidad del producto. Al mismo tiempo, se potencia la velocidad de aplicación de la fibra de vidrio promoviendo la disminución del tiempo de procesamiento en esta etapa, que a su vez influye en el tiempo medio de flujo total de cada referencia.

5.6.1.3 Compra de centro de mecanizado para reforzar el área de accesorios. En el análisis realizado en el ítem anterior se identifica un cuello de botella en el área de accesorios para las referencias de tinas y spas, esto se debe a que la aplicación y la instalación de los accesorios se realiza de forma manual. Este proceso se inicia con la instalación de los sistemas de boquillas y mangueras, el sistema eléctrico de luz, la bomba hidromotor, y de los sistemas de masajes elegidos

por el cliente entre el aeromasaaje, el hidromasaaje y la cromoterapia con su respectiva inspección y se finaliza con la instalación de almohadas, para esto se utilizan herramientas de uso manual empleadas por los operadores en su totalidad ocasionando una demora en el tiempo de la operación.

En este sentido, se realiza una vigilancia tecnológica sobre que tecnologías se emplean en el exterior para la fabricación de accesorios para zonas húmedas. En virtud de esto, se encuentra una empresa ubicada en Barcelona, que dispone de un centro de mecanizado de última generación que hace todos los agujeros necesarios para instalar todos los accesorios y a la vez, asegura la estanquidad del vaso (ver figura 32).

Para la mejora de los tiempos en el proceso de instalación de accesorios en la empresa del caso de estudio, se propone la adquisición de un centro de mecanizado, una maquina automatizada que realiza operaciones de maquinado como cortes y brocas a gran velocidad, aumentando la producción industrial debido a que la intervención humana es mínima. Además, cuenta con una gran flexibilidad y precisión de trabajo, al permitir cambiar rápidamente la configuración y realizar diferentes tareas de mecanizado sobre una misma pieza, ofreciendo uniformidad en la producción y un acabado superficial impecable.

Figura 32.*Centro de mecanizado CNC*

Con esta adquisición se busca disminuir los tiempos asignados a la instalación de los sistemas de boquillas y mangueras, el sistema eléctrico de luz, la bomba hidromotor, y de los sistemas de masajes. En la medida en que se incorpore el equipo ahorra tiempo al hacer un cambio automático de herramientas, reduce los accidentes debido a que la manipulación del operario disminuye, el centro de mecanizado puede funcionar 24 horas al día y producir un gran volumen de piezas uniformes, dado que otorga un alto grado de automatización realizando diversas operaciones de mecanizado de una pieza.

El centro de mecanizado propuesto corresponde al que posee husillo vertical debido a que son los más adecuados para realizar operaciones en superficies planas con cavidades hondas como las referencias fabricadas en la empresa que se toma para el caso de estudio. En este mismo sentido, esta herramienta permite disminuir el tiempo de procesamiento en el área de accesorios en un 45%

aproximadamente como se evidencia en la investigación de Joaquín Wevar Oller, donde las tareas que eran desarrolladas por el operario de manera convencional son ejecutadas ahora por el control numérico computarizado, el cual conlleva también una reducción en los movimientos de traslado del operario.

5.6.2 Análisis de medidas de desempeño

Por lo que se refiere a la experimentación y el análisis de escenarios de reconversión industrial, es importante evaluar la variación en el comportamiento que tienen las medidas de desempeño como el tiempo medio de ciclo, el tiempo de duración de cada proceso y la utilización de los operarios al comparar el escenario actual de la fábrica con los planteados anteriormente para determinar si proporcionan mejoras para la empresa.

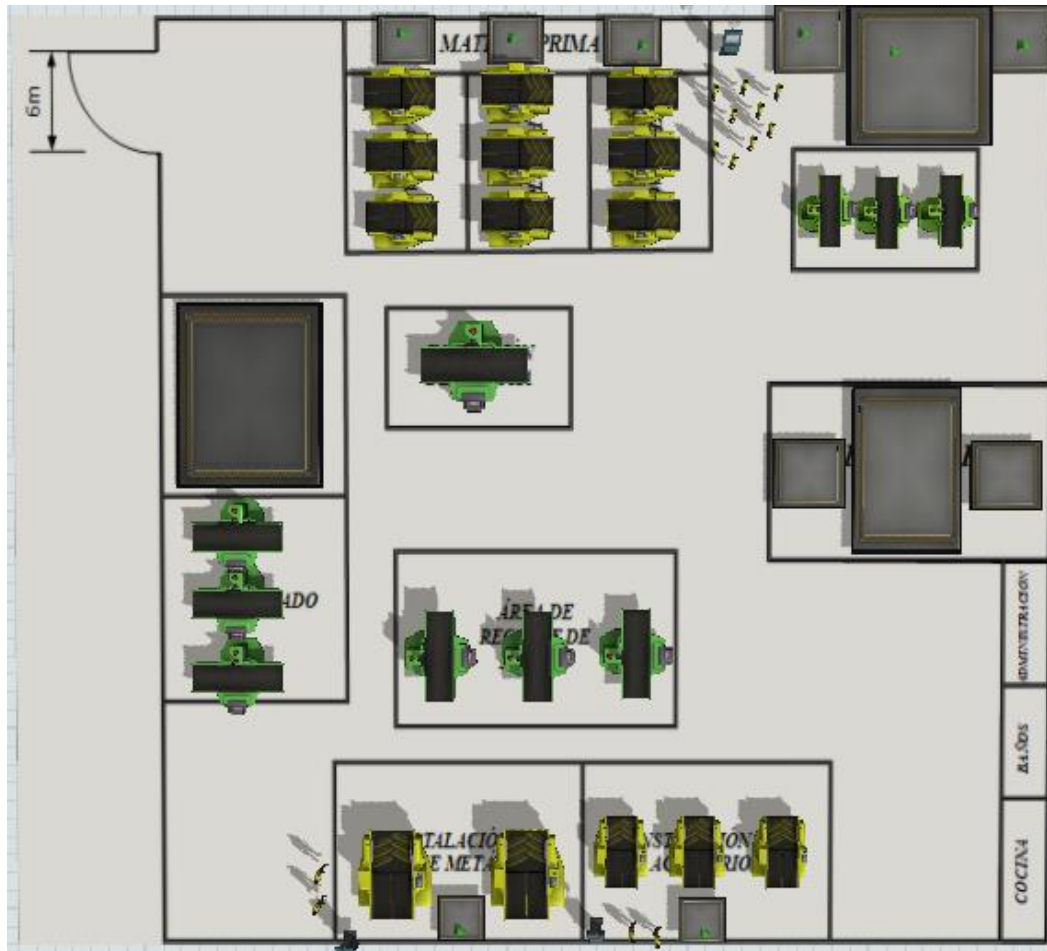
5.6.2.1 Análisis redistribución de planta. Las operaciones en las plantas de producción de hoy en día evolucionan constantemente, el objetivo de este escenario propuesto radica en que la empresa tomada como caso de estudio pueda encontrar una forma más adecuada de distribución para las áreas de trabajo y lograr una producción más ahorrativa y eficiente, a la par de una manera segura y satisfactoria para los operarios inmersos en los procesos al momento de realizar su trabajo.

Así mismo, para establecer de manera más precisa el alcance de este escenario podríamos decir que se encuentra acompañado de eventos como disminución en los cuellos de botella, ya sea para lo spas y las tinas en el área de accesorios junto con las piscinas en al área de laminado. También mayor y mejor utilización de la mano de obra, maquinaria y los servicios, mayor facilidad y flexibilidad a los cambios de las condiciones de trabajo y por último una mejora en la supervisión

y seguimiento de todas las áreas de trabajo. Con este fin, se ilustra en la figura 33 la nueva distribución de planta realizada en el software Flexsim.

Figura 33.

Nueva distribución de planta en el software Flexsim



Esta propuesta de una nueva distribución de planta obtiene un ahorro de espacio, al reducir las distancias de recorrido. Al mismo tiempo, reduce los riesgos de deterioro de material aumentando la calidad del producto y los riesgos de enfermedades profesionales y de accidentes de trabajo, dado que los operarios no tendrán que cargar las pesadas referencias por largas

distancias como en el anterior proceso, si no, que en este escenario los recorridos son más cortos porque los puestos de trabajo son adyacentes.

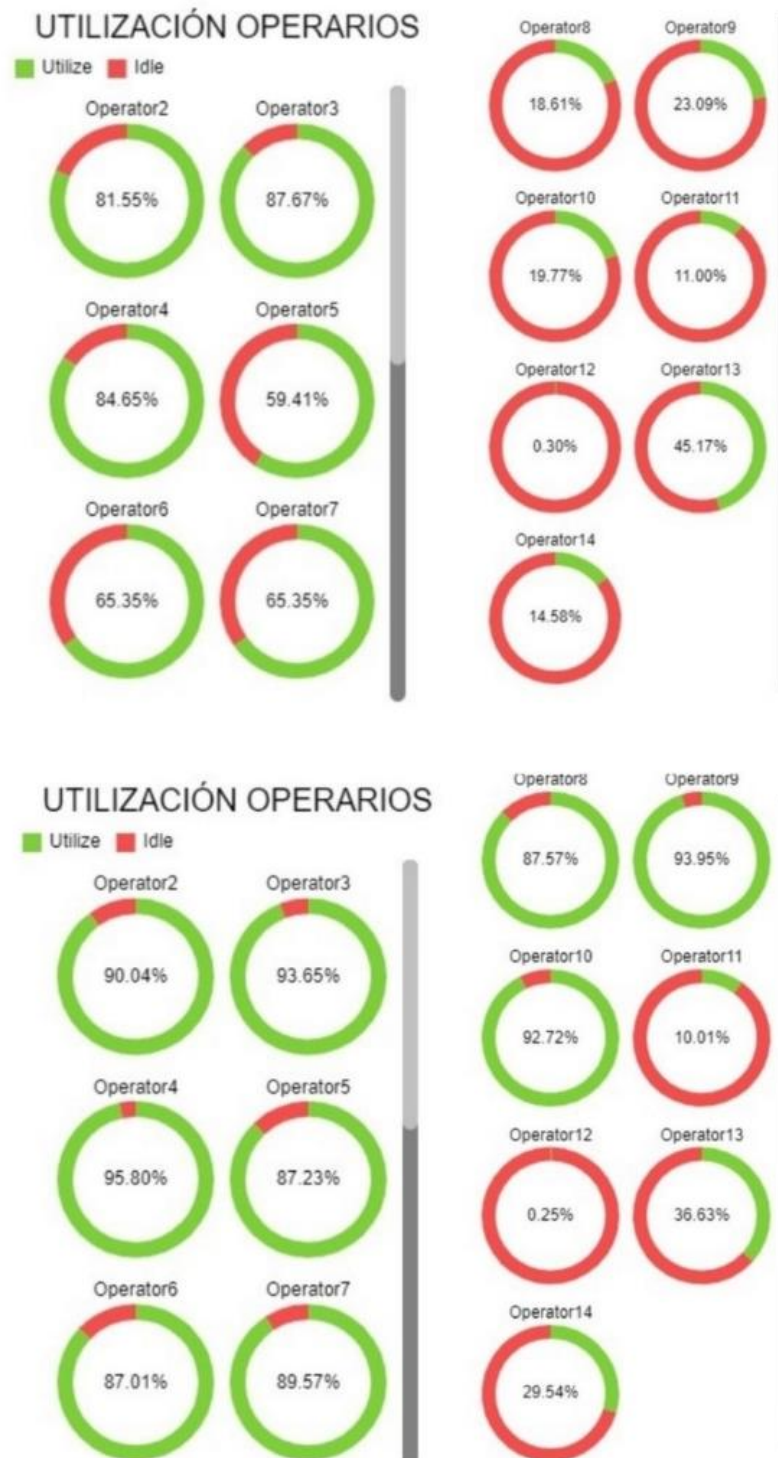
Este tipo de mejoras locativas, son reacomodaciones simples que no representarían grandes costos para la empresa, puesto que la planta actualmente está delimitada por espacios donde se trabaja de forma manual y no se someten a grandes traslados de maquinaria pesada, o modificaciones en la construcción de los espacios dentro de la planta, sencillamente al traslado de las locaciones destinadas a cada proceso y a los materiales que se emplean para el desarrollo de este.

En este escenario en particular, la medida de desempeño que se ve afectada es la utilización de los operarios, en la medida en que se evita la congestión de la producción que existe al solo fabricar un producto al tiempo debido a la monopolización del área de la cabina por la elaboración de un único producto, al dividir cada zona en los procesos facilitando la circulación y la realización de estos en paralelo. Por este motivo, el porcentaje de utilización de los operarios aumenta, al poder efectuar trabajos en varias referencias en simultaneo en vez de trabajar en la misma referencia como se puede observar en la

Figura 34, donde se plasma el porcentaje antes y después de la redistribución de planta demostrando el incremento.

Figura 34.

Utilización de los operarios del sistema real y nueva distribución de planta

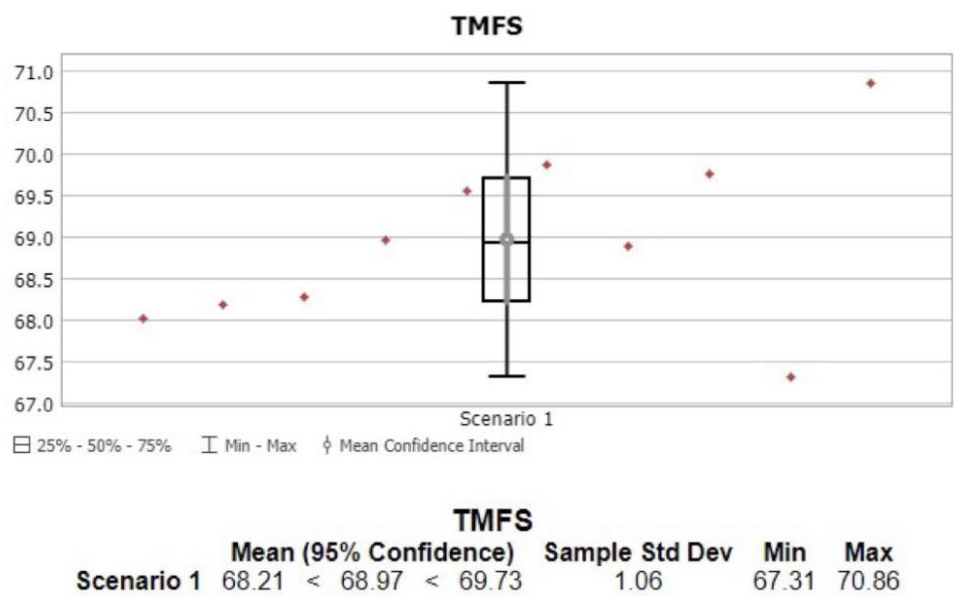


5.6.2.2 Análisis compra de sistema para refuerzo del proceso de laminado. Para el escenario propuesto de la compra de sistema para reforzar el proceso de laminado se realiza una modificación en las tres máquinas que se encargan de simular este proceso para cada referencia al disminuir el tiempo de procesamiento en un 30% por la optimización que provee la compra de la pistola de pulverización.

Hecha esta salvedad, se inicia el tratamiento de datos por medio de la herramienta “Experimenter”, para recrear diez corridas al modelo actualizado y observar el comportamiento de las medidas de desempeño. En la figura 35, se estudia la referencia de los spas, en donde se puede observar que el valor promedio para el tiempo de ciclo de su producción toma un valor de 68,97 horas al implementar la utilización de la pistola para aplicar la fibra de vidrio mientras que al llevarlo a cabo manualmente tomaba 73,29 horas, presentando una disminución evidente la duración del ciclo y, por ende, en el intervalo de confianza que representa su comportamiento.

Figura 35.

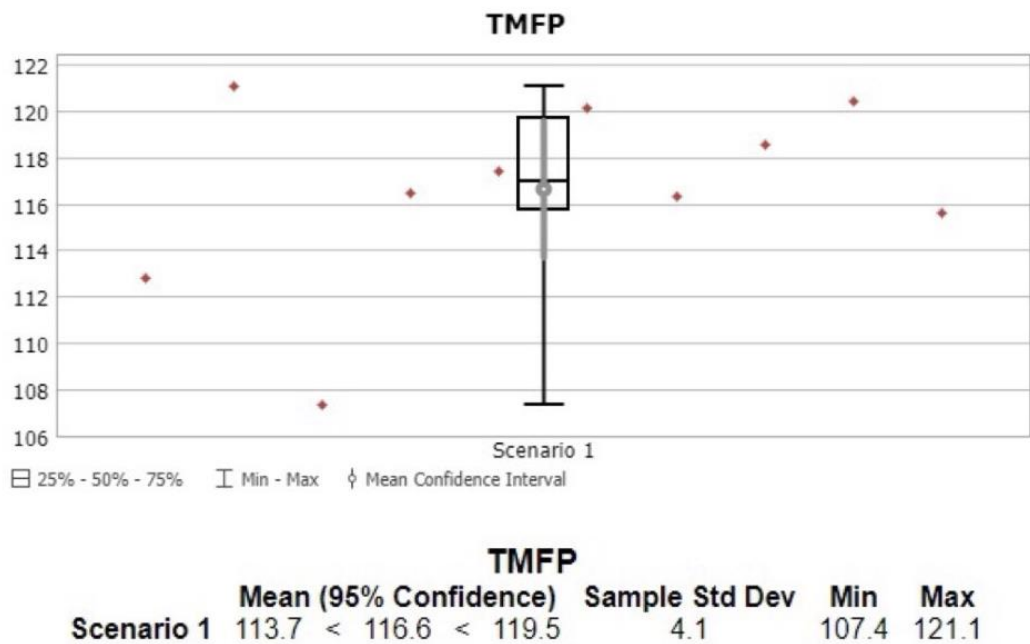
Tiempo medio de flujo spa



En el caso de las piscinas, al realizar las corridas se identifica nuevamente una disminución en el tiempo de ciclo para fabricar la referencia, tomando el valor promedio de 116,6 horas mientras en el estado actual toma 132,9 horas, una diferencia de 12,26% en el valor gracias a la automatización del proceso como se evidencia en la figura 36. A continuación, se presenta un ajuste en el intervalo de confianza del proceso al disminuir sus límites. Esta referencia presenta una respuesta positiva a la compra de la pistola debido a que se aumenta la capacidad del proceso de laminado, el cual es el cuello de botella dentro de su proceso productivo.

Figura 36.

Tiempo medio de flujo piscina

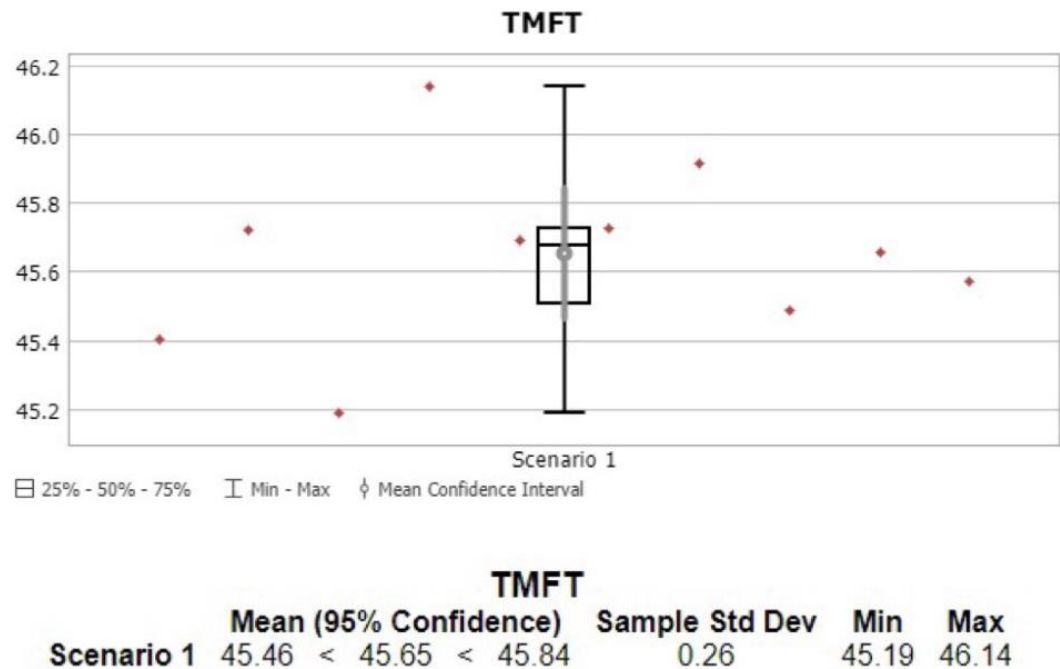


En concordancia con el comportamiento de las referencias anteriores, en la figura 37 se muestra el tiempo medio de flujo en las tinas, el cual cambia su valor a 45,65 horas de 48,56 horas. Por lo tanto, se puede afirmar indiscutiblemente que la compra de la pistola de pulverización para

apoyar el proceso de laminado en las tres referencias causa un impacto positivo dentro del tiempo medio de flujo del proceso completo.

Figura 37.

Tiempo medio de flujo tina



Por lo que se refiere al tiempo de duración de cada proceso, se efectúa una corrida al modelo con un tiempo total de 1000 horas para constatar los valores que toma esta medida de desempeño antes y después de la modificación, dando como resultado una reducción en el tiempo que dura el proceso por referencia siendo la primera los spas, la segunda las piscinas y la tercera las tinas como se observa en la figura 38. Esto se puede deducir de lo anterior, puesto que al disminuir el tiempo del proceso de laminado en cada referencia afecta de manera positiva el tiempo total del proceso logrando que baje su valor.

Figura 38.

Tiempos de operación proceso laminado del sistema real y escenario propuesto

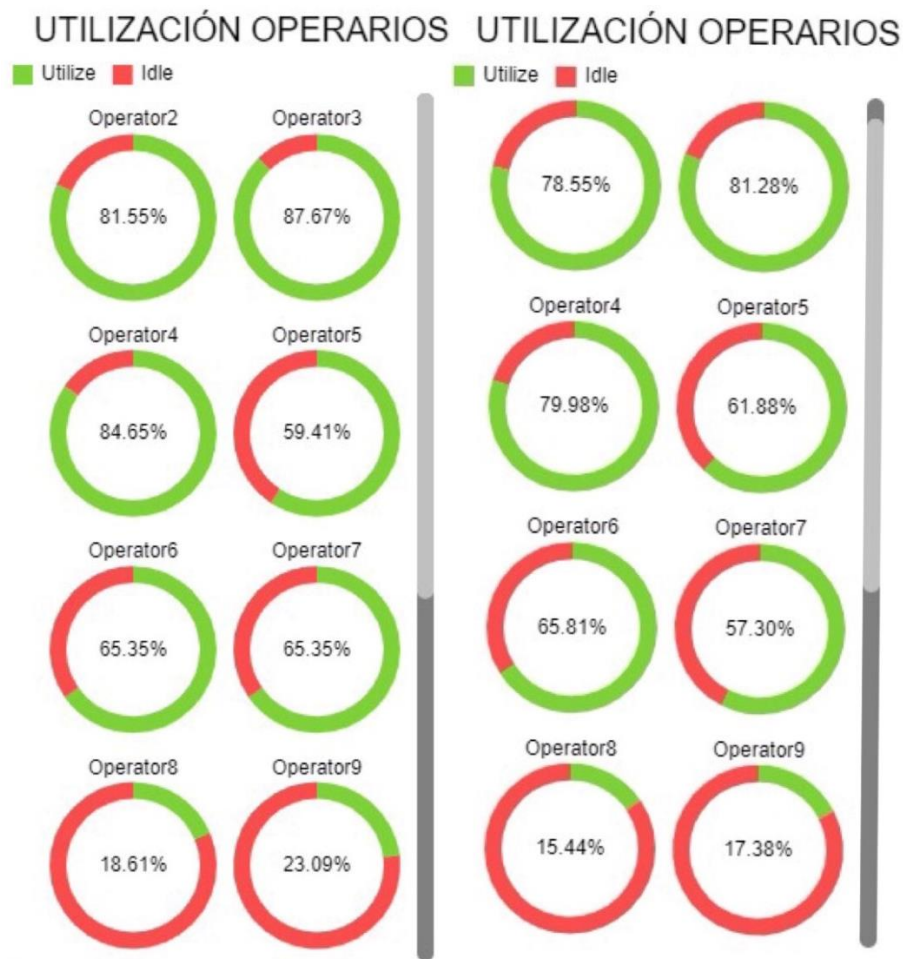
LAMINADO			
Type	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
1	15.44	13.01	17.01
2	52.76	32.01	72.01
3	9.20	9.01	10.01

LAMINADO			
Type	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
1	10.84	9.11	11.91
2	36.33	22.41	50.41
3	6.47	6.31	7.01

Para terminar, se examina la utilización de los nuevos operarios que están encargados de llevar a cabo las operaciones correspondientes a la fabricación de la concha, entre las cuales se encuentra el laminado como muestra la figura 39. A partir de esto, se detecta un declive en el valor del porcentaje para la mayoría de los operarios visto que, tiene un menor tiempo medio de flujo y duración del tiempo de procesamiento, dando como resultado una mayor cantidad de horas libres para trabajar en una nueva referencia.

Figura 39.

Utilización de los operarios proceso laminado del sistema real y escenario propuesto

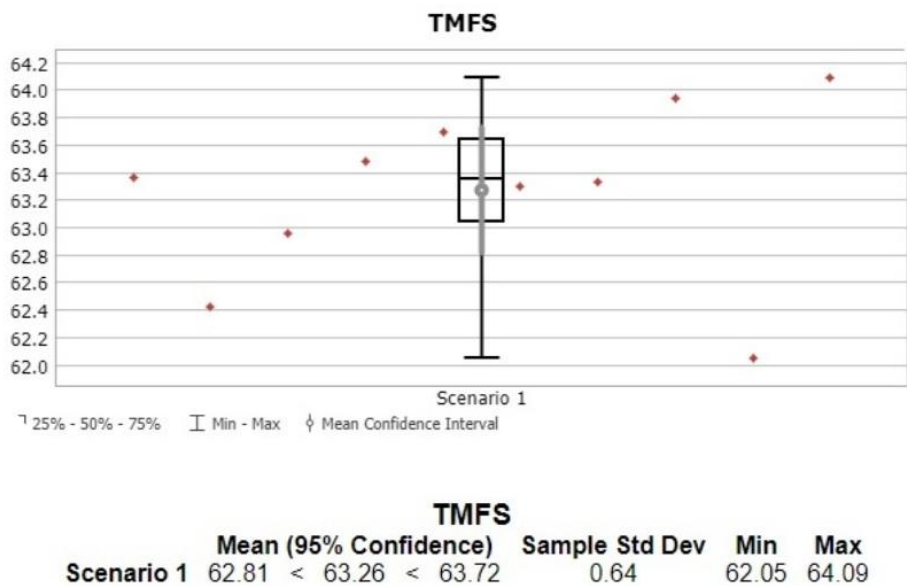


5.6.2.3 Análisis compra de centro de mecanizado para reforzar el área de accesorios.

Para el escenario propuesto de la compra de centro de mecanizado para reforzar el área de accesorios se realiza una modificación en las tres máquinas que se encargan de simular este proceso para cada referencia al disminuir el tiempo de procesamiento en un 45% por la modernización que provee la implementación de este centro de mecanizado de husillo vertical como se evidencia en el Apéndice K.

Avanzando en el razonamiento, se inicia el tratamiento de datos de un nuevo escenario a través de la herramienta “Experimenter”, para examinar el comportamiento de las medidas de desempeño mediante la ejecución de diez corridas del modelo después de la actualización de los tiempos de procesamiento. En la figura 40, se estudia la referencia de los spas, donde se visualiza el valor promedio para el tiempo de ciclo de su producción tomando un valor de 63,26 horas al implementar el centro de mecanizado de husillo vertical, en tanto es de 73,29 horas con las operaciones manuales comprobando que el cambio de labores ordinarias a códigos computarizados agiliza el sistema.

Figura 40.
Tiempo medio de flujo spa

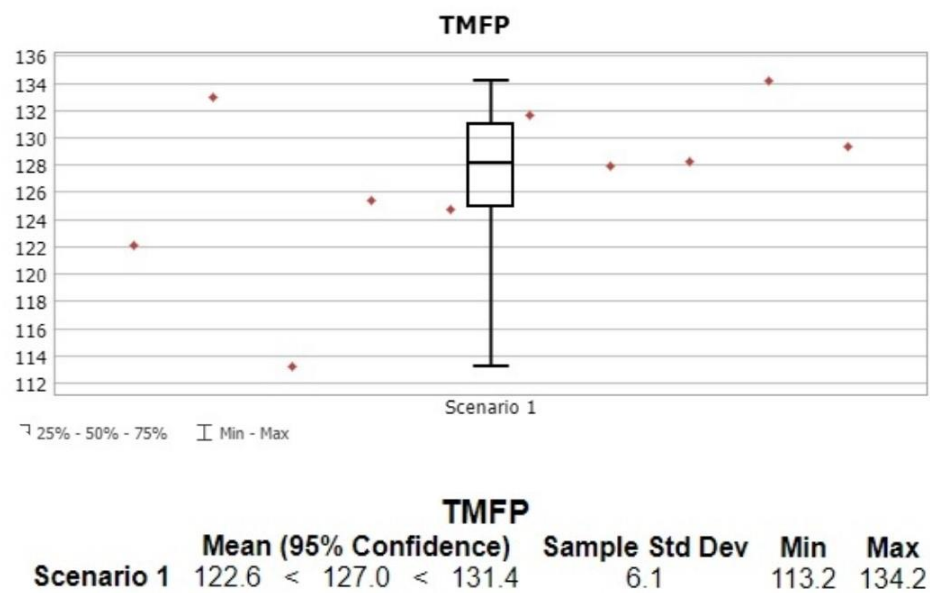


En el caso de las piscinas, la actualización demuestra que el tiempo medio de flujo sufre una influencia positiva al presentar una reducción del 5%, siendo 132.9 horas el valor anterior y

127 horas el actualizado. Este porcentaje no es tan alto como el de caso anterior puesto que, el área de accesorios es el cuello de botella de las referencias de spas y tinas, mientras que el laminado es el de las piscinas, afectando en menor parte el tiempo total del proceso a esta referencia pues este proceso no restringe la capacidad (Ver figura 41).

Figura 41.

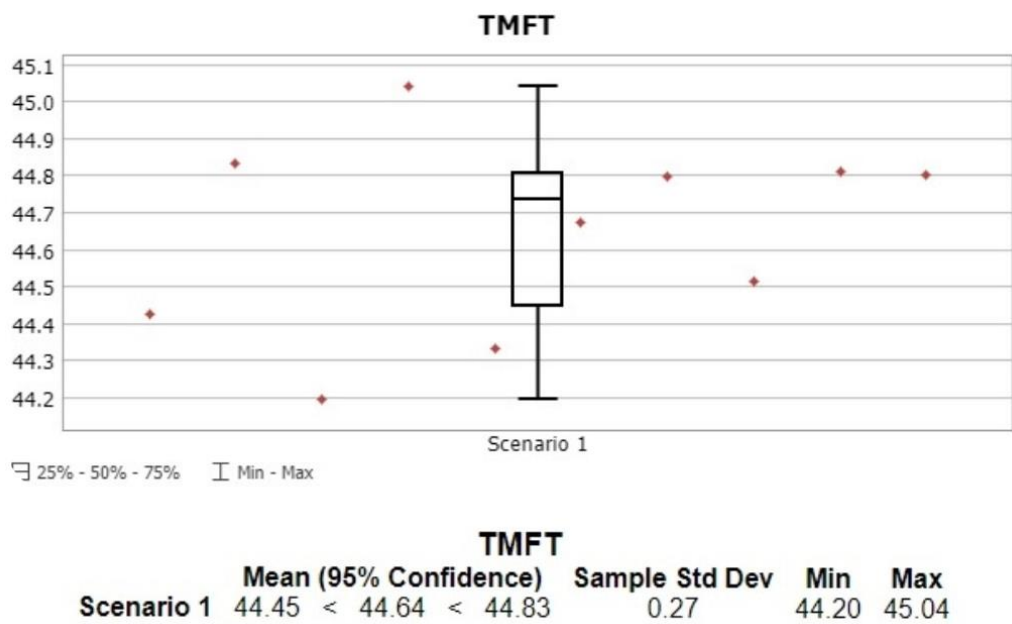
Tiempo medio de flujo piscina



Seguidamente, el comportamiento de las tinas se observa en la figura 42, donde se plasma el tiempo medio de flujo de estas, cambiando su valor de 48,56 horas a 44,64 horas, reduciendo a su vez el intervalo de confianza que lo representa. La disminución presenta un ahorro del 8% del tiempo total del proceso, un porcentaje mayor al obtenido con el escenario planteado anteriormente, debido a que se interviene directamente el recurso que restringe su capacidad de producción.

Figura 42.

Tiempo medio de flujo tina



Por otra parte, en cuanto a la duración de cada proceso se realiza una corrida del modelo con un tiempo total de 1000 horas para verificar los valores que toma esta medida de desempeño antes y después de la mejora, otorgando como resultado una reducción en el tiempo que dura el proceso para cada una de las referencias de producto spa, piscina y tina respectivamente. En la figura 43, se evidencia que los cambios afectan el tiempo de todas las tareas que corresponden a la operación de instalación de accesorios, a partir de la identificación del punto crítico que reduce la eficiencia y la eficacia en ciertas referencias y generar un proceso de cambio como oportunidad de mejora tecnológica.

Figura 43.

Tiempos de operación proceso accesorios del sistema real y escenario propuesto

INSTALACIÓN ACCESORIOS

Type	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
1	20.32	18.01	24.01
2	12.01	12.01	12.02
3	12.02	12.01	12.03

INSTALACIÓN ACCESORIOS

Type	Avg Staytime	Min Staytime	Max Staytime
1	11.23	9.91	13.21
2	6.61	6.61	6.61
3	8.27	8.26	8.27

Consecuentemente, se evalúa la utilización de los operarios que están encargados de llevar a cabo las operaciones manuales que se realizan para instalar los accesorios. En la figura 44, el operario número trece y catorce manifiestan un cambio en el porcentaje de utilización que se expresa de forma positiva, al reducir el valor del porcentaje, representando un mayor tiempo libre en el operario, debido a que el centro de mecanizado disminuye los desplazamientos del personal y asegura una precisión en el trabajo, al realizar los procesos de una manera más rápida y confiable.

Figura 44.

Utilización de los operarios proceso accesorios del sistema real y escenario propuesto



6. Conclusiones

El presente trabajo presenta una metodología para el desarrollo de proyectos de simulación en sistemas de manufactura. Lo anterior, buscando aprovechar a la simulación de eventos discretos como recurso experimental con el fin de apoyar la toma de decisiones en las empresas manufactureras consiguiendo que, a partir de la evaluación de escenarios e implementación de soluciones, se dé una mejora en los indicadores de eficiencia del sistema de fabricación, la competitividad y, en ese mismo sentido, se logren los objetivos propuestos.

En el diseño e implementación de un modelo de simulación del sistema productivo actual para la empresa del caso de estudio, es clave la recolección de la información necesaria para comprender el proceso productivo y caracterizarlo a partir del análisis de datos recopilados para

cada uno de los componentes para poder simular de una forma análoga el sistema real y evidenciar los puntos críticos del modelo como los cuellos de botella y las posibilidades de mejoras concretas.

Por tanto, gracias a la simulación en FlexSim, se puede observar el bosquejo de los tres escenarios propuestos y bajo los tiempos estimados, conocer el comportamiento que tendría en el proceso productivo una vez sea implementado.

De esta manera, con el modelo de simulación se propone una nueva distribución de planta más eficiente, que facilita la buena circulación de las referencias al reducir las distancias de recorrido de una operación a otra, puesto que son puestos de trabajo adyacentes, contribuyendo a cambiar de la monopolización del área de la cabina por un único producto a un trabajo en paralelo que repercute en el porcentaje de utilización de los operarios de forma positiva al poder trabajar en varios productos al tiempo.

También, se evalúa el impacto que tiene la compra de una pistola de pulverización de resina para apoyar las operaciones del proceso de laminado, cuello de botella de las referencias de piscinas, donde se muestra que una disminución del 30% del tiempo de duración de la operación ocasiona una respuesta positiva en las medidas de desempeño seleccionadas, al exponer una reducción evidente en el tiempo total del ciclo para todas las referencias, aumentando la eficiencia y otorgando a los operarios mayor tiempo para dedicarse a la elaboración de nuevas referencias. Al mismo tiempo, la compra de este sistema reduce los desperdicios de materia prima y mejora la calidad de terminado al mitigar el riesgo de inclusiones de aire y porosidad.

De manera similar, se examina la repercusión de la compra del centro de mecanizado CNC para el proceso de instalación de accesorios, considerando las medidas de desempeño seleccionadas, que aumentan la flexibilidad y la precisión del trabajo, ofreciendo uniformidad en la producción y un acabado superficial impecable, resultado en la disminución de tiempos de

operación y tiempos de traslado, que tiene un efecto directo en el tiempo medio de flujo reduciéndolo y ofreciendo a los trabajadores un ahorro de tiempo que pueden utilizar para fabricar nuevos pedidos.

Con este análisis y resultados, los directivos de la empresa tienen un mejor panorama de las áreas que se requieren mejorar y se proporciona un instrumento como soporte para apoyar la toma de decisiones. A su vez, cuentan con un recurso experimental que les permite reducir la incertidumbre y conocer los resultados que tendrán los escenarios de mejora planteados en este proyecto o cualquier proceso de mejora que sea considerado por ella.

Finalmente, se demuestra que, la herramienta de simulación de eventos discretos es de gran utilidad para analizar los procesos productivos de una empresa, y estudiar el comportamiento de cada una de las variables que intervienen en él. Así, con el análisis de escenarios teóricos se pueden comparar ventajas y desventajas respecto a los escenarios planteados y decidir cuál es el mejor. Del mismo modo, tiene la facilidad de replicar múltiples veces el sistema para evaluar diferentes opciones sin necesidad de modelar todo nuevamente y aprovechando los sub-modelos estándar ya simulados.

7. Recomendaciones

De acuerdo con el desarrollo del presente proyecto, se presentan las siguientes recomendaciones que van a contribuir al fortalecimiento del sector industrial y al mejoramiento continuo de las organizaciones.

Las empresas del sector manufacturero deben ejecutar un análisis a sus procesos para determinar las problemáticas existentes y fortalecer las operaciones asociadas a la producción. Así, perfeccionar metodologías ya implementadas y trabajar en nuevas herramientas como la simulación de eventos discretos que se caracterizan por la mejora continua y la optimización del sistema.

Realizar un seguimiento a esta propuesta metodológica como refuerzo a los proyectos de mejoramiento de procesos para intervenir un sistema productivo y comprender los puntos críticos de los procesos de producción a fin de proponer mejoras que aumenten la productividad mediante herramientas de simulación.

Utilizar el software de simulación FlexSim como herramienta para contribuir a la toma de decisiones operativas, tácticas y estratégicas, al permitir la evaluación rápida de escenarios que posibilite cambiar diferentes condiciones y observar los resultados en el modelo, al mismo tiempo examinar los resultados para tener una perspectiva inicial si las mejoras a realizar son más beneficiosas en comparación a los costos de la ejecución.

En caso de que la empresa empleada para el caso de estudio considere la implementación de uno de los escenarios de mejora propuestos en este proyecto, se recomienda la definición de este y realizar las adecuaciones necesarias para su instalación, ya sean físicas en el caso de la distribución de la planta y la compra del centro de mecanizado que conllevan transformaciones en las instalaciones, como capacitaciones en la compra de los dos sistemas para el buen uso por parte de los operarios.

Llevar a cabo otros estudios que otorguen una adaptación, por sectores específicos, modelos generales en el software que se ajusten a las necesidades básicas de las empresas para promover procesos de transformación, el fortalecimiento de la capacidad industrial y el desarrollo

del sector local, al poder comparar el comportamiento entre empresas y detectar variables comunes.

Finalmente, se recomienda una mayor profundización en el estudio del desarrollo de la interfaz de usuario gráfica (GUI), debido a que es un recurso experimental importante que le facilita a otras partes interesadas que, aunque no estén familiarizadas con el software puedan manejarlo y realizar diferentes modificaciones sin estar capacitados completamente en el manejo de este, ya que no existe suficiente información sobre la elaboración de este.

Referencias Bibliográficas

- Baraka, J., Naicker, A. K., & R.Singh. (2012). Discrete event simulation modeling to improve productivity on an automotive production line. CIE42 Proceedings, 16-18 July 2012, Cape Town, South Africa © 2012 CIE & SAIIE, July.
- Campos Valencia, J. J. (2020). Propuesta de optimización de la distribución en planta, mediante la aplicación de la metodología planificación sistemática de diseño (SLP) en la empresa Tosthachul. UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.
- Caterino, M., Greco, A., D'Ambra, S., Manco, P., Fera, M., Macchiaroli, R., & Caputo, F. (2020). Simulation techniques for production lines performance control. *Procedia Manufacturing*, 42(2019), 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.027>
- Feldkamp, N., Bergmann, S., Strassburger, S., Schulze, T., Akondi, P., & Lemessi, M. (2019). Knowledge discovery in simulation data – a case study for a backhoe assembly line. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Holst, L., & Bolmsjö, G. (2001). Simulation integration in manufacturing system development: A study of Japanese industry. *Industrial Management and Data Systems*, 101(7), 339–356. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005822>
- Huynh, B. H., Akhtar, H., & Li, W. (2020). Discrete Event Simulation for Manufacturing Performance Management and Optimization: A Case Study for Model Factory. ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management, 16–20. <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080394>
- Ingemansson, A., & Bolmsjö, G. S. (2004). Improved efficiency with production disturbance

- reduction in manufacturing systems based on discrete-event simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(3), 267–279.
<https://doi.org/10.1108/17410380410523498>
- Ingemansson, A., Ylipää, T., & Bolmsjö, G. S. (2005). Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(6), 615–628.
<https://doi.org/10.1108/17410380510609474>
- Jaramillo Jaramillo, A. (2012). ¿Reconversión Industrial o Reconversión Empresarial? *Revista Universidad Eafit*, 96, 55–64.
- Julka, N., Lendermann, P., Chong, C. S., & Liow, L. F. (2004). Analysis and enhancement of planning and scheduling applications in a distributed simulation testbed. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 2(January), 1799–1805. <https://doi.org/10.1109/wsc.2004.1371532>
- Kassu Jilcha, E. B. and H. S. (2015). Workers and Machine Performance Modeling in Manufacturing System Using Arena Simulation. *Journal of Computer Science & Systems Biology*, 8(4), 185–190. <https://doi.org/10.4172/jcsb.1000187>
- Korhonen, H. M. E., Heikkilä, J., & Törnwall, J. M. (2001). A simulation case study of production planning and control in printed wiring board manufacturing. *Winter Simulation Conference Proceedings*, 2(January), 844–847. <https://doi.org/10.1109/wsc.2001.977382>
- Lee, K., Shin, J. G., & Ryu, C. (2009). Development of simulation-based production execution system in a shipyard: A case study for a panel block assembly shop. *Production Planning and Control*, 20(8), 750–768. <https://doi.org/10.1080/09537280903164128>
- Martínez Ferreras, D. (2009). Los tesauros.
[http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/239/8/Fundamentos de lenguajes](http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/239/8/Fundamentos_de_lenguajes)

documentales_Módulo5_Los tesauros.pdf

- Michaloski, J., Proctor, F., Arinez, J., & Berglund, J. (2013). Toward the ideal of automating production optimization. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2 A. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63546>
- Muther, R. (1968). Planificación y proyección de la empresa industrial.
- Pandian, A., & Ali, A. (2016). Manufacturing cell layout improvement using Simulation Modeling and Group Technology. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 8-10 March, 103–114.
- Paula, A., Vargas, E., Ernesto, L., Lesage, J., Paula, A., Vargas, E., & Ernesto, L. (2014). Input-output identification of controlled discrete manufacturing systems To cite this version : HAL Id : hal-00954589. International Journal of Systems Science, Taylor & Francis: STM, Behavioural Science and Public Health Titles, September 2015, 458–471. <https://doi.org/10.1080/00207721.2012.724098>
- Peña, D. M. (1991). La gestión tecnológica y la reconversión industrial. CIENCIAY SOCIEDAD, XVI, 203–208.
- Pfeffer, M., & Verdonck, P. (2008). Performance Optimization of Semiconductor Manufacturing.
- Planeación, D. N. de. (2013). GUÍA DE ELABORACIÓN DE MODELOS CONCEPTUALES.
- Sánchez, P. A., Ceballos, F., & Sánchez Torres, G. (2015). Análisis del proceso productivo de una empresa de confecciones: Modelación y simulación. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 25(2), 137. <https://doi.org/10.18359/rcin.1436>
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. Journal of Simulation, 7(1), 12–24. <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
- Sheng, L. W., Basri, E. I., & Kamaruddin, S. (2017). Analysis on the effect of shop floor

parameters on the effectiveness of preventive maintenance through discrete event simulation.

Pertanika Journal of Science and Technology, 25(1), 1–16.

Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). PRISMA declaration: A proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses. *Medicina Clinica*, 135(11), 507–511.
<https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>

Zahraee, S. M., Golroudbary, S. R., Hashemi, A., Afshar, J., & Haghighi, M. (2014). Simulation of manufacturing production line based on Arena. *Advanced Materials Research*, 933(February), 744–748. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.933.744>