



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
OPCIÓN I.-TESIS**

TRABAJO PROFESIONAL

**“MEJORA DE LA EFICACIA GLOBAL DEL EQUIPO (OEE) DEL
PROCESO DE RECTIFICADO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN
DE LIMA TRIANGULAR EN UNA FÁBRICA DE HERRAMIENTAS
MANUALES EN [REDACTED] VERACRUZ”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE GRADO DE:
MAESTRO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA:

Ing. Sergio Daniel Mayoral Hernández

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Fernando Ortiz Flores

ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

FEBRERO 2021



Avenida Oriente 9 No. 852
Col. Emiliano Zapata, C.P.
94320

Orizaba, Veracruz, México.
Teléfono: 272-110-53-60

Email: cyd_orizaba@tecnm.mx

www.orizaba.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Ver., 11/05/2021

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCIÓN: I

SERGIO DANIEL MAYORAL HERNANDEZ
Candidato a Grado de Maestro en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"MEJORA DE LA EFICACIA GLOBAL DEL EQUIPO (OEE) DEL PROCESO DE RECTIFICADO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LIMA TRIANGULAR EN UNA FÁBRICA DE HERRAMIENTAS MANUALES [REDACTED] VERACRUZ"

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

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

DR. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MLAR/magh



FTI-TI-017



Avenida Oriente 9 No. 852
Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz, México.
Teléfono: 272-110-53-60
Email: mii@orizaba.tecnm.mx
www.orizaba.tecnm.mx





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **Marzo 30, de 2021.**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

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

MAYORAL HERNANDEZ SERGIO DANIEL

La cual lleva el título de:

MEJORA DE LA EFICACIA GLOBAL DEL EQUIPO (OEE) DEL PROCESO DE RECTIFICADO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LIMA TRIANGULAR EN UNA FÁBRICA DE HERRAMIENTAS MANUALES EN [REDACTED] VERACRUZ

y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. FERNANDO ORTIZ FLORES

SECRETARIO: DR. MARIO ARRIOJA RODRÍGUEZ

VOCAL: DRA. MARIA ELOISA GURRUCHAGA RODRÍGUEZ

VOCAL SUP.: DR. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ

[Firma]
FIRMA
[Firma]
FIRMA
Cuahtémoc Sánchez R.
FIRMA

EGRESADO (A) DE LA **MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL.**

FTI-TI-013



Avenida Oriente 9 No. 852
Col. Emiliano Zapata, C.P.
94320
Orizaba, Veracruz, México.
Teléfono: 272-110-53-60
Email: cyd_orizaba@tecnm.mx
www.orizaba.tecnm.mx



Agradecimientos

A Dios: por mostrarme su infinito amor y misericordia, porque me ha acompañado en todas las etapas de mi vida, por permitirme vivir en medio de una gran familia y colocar las personas correctas en mi camino.

A mi madre María Fidelina: por tu incondicional apoyo y amor en cada momento, por tus consejos y enseñanzas, porque cuando había momentos en los que quería desistir, tus palabras de aliento y abrazos me daban las fuerzas para seguir adelante, porque cuando tenía días malos y llenos de cansancio, tú simplemente me esperaba con un plato de comida y hacías que todos mis problemas desaparecieran.

A mi padre José Luis: por ser un ejemplo a seguir para mi hermano y para mí, por ser un padre cariñoso, responsable, trabajador e inculcarme todos esos valores que me han servido a lo largo de mi vida, porque siempre me has apoyado en mis planes y decisiones. Por todas tus enseñanzas y conocimientos.

A mi hermano José Eduardo: por siempre brindarme tu apoyo moral y académico, por tus consejos y amistad, por ser un ejemplo de dedicación y nobleza, porque a pesar de la distancia siempre te preocupabas por mí.

A mi novia Carolina: por ser mi compañera en esta aventura, por motivarme y apoyarme cuando más lo necesité, por compartir momentos de alegría y tristeza, por acompañarme en aquellas noches de desvelo. Gracias por todo el cariño que me has brindado, por escucharme, por darme palabras de aliento y por sacarme una sonrisa todos los días.

A mi asesor el Dr. Fernando: por sus enseñanzas, su conocimiento, consejos, por ser un gran maestro y sobre todo un gran amigo. Gracias por su tiempo, paciencia y apoyo cada que tenía dificultades. Por enseñarme que cualquier problema tiene una solución.

A mi familia: a mis tías Lulú, Reina y Tere; a mis tíos Chucho y Tele; a mis primas Miriam, Sara, Lupe, Chayo y Leti, y a mis primos Isaac, Chen, Chucho, Luis y Joel; por su apoyo en cada momento.

A mis amigos: David, Oscar (Conejo), Mauricio, Jemima, Gaby, Nadia, Montalvo, Armando, por brindarme su amistad, apoyo y por los grandes momentos que compartimos.

Resumen

El sector metalmecánico es una de las actividades manufactureras más importantes para el desarrollo económico en México, utiliza los productos obtenidos en los procesos siderúrgicos para fabricar: artículos agropecuarios, de oficina, para el hogar, herramientas metálicas, maquinaria, muebles entre otros.

Según cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), durante 2014 Veracruz ocupó el 16° lugar por el valor de sus exportaciones que alcanzaron un monto de 7,292.9 MDD, lo que representó el 2.1% a nivel nacional. Destacó como principal actividad la industria manufacturera, con un valor en sus exportaciones de 5,500.1 MDD. Los sectores con mayor participación fueron: químico (26.9%) y metalmecánico (22.1%).

La fábrica de herramientas “██████████”¹, donde se desarrolló el presente trabajo de tesis, forma parte del sector metalmecánico. Esta fábrica se encuentra localizada en ██████████ ██████████ Veracruz y se enfoca principalmente en la fabricación de herramientas metálicas manuales: limas, palas, cucharas y carretillas. Sin embargo, la falta de disponibilidad de las máquinas, pérdidas de rendimiento y defectos de calidad en algunos procesos de la producción de lima ocasionan que la eficacia global (OEE) no alcance los valores planeados en la fábrica.

El presente trabajo tiene como finalidad mejorar el indicador de eficacia global en un proceso crítico de una línea de lima triangular. Para lograrlo se obtuvo un panorama general de la fábrica, se realizó un diagnóstico de las líneas de herramientas manuales, se calculó y analizó la eficacia global (OEE), se aplicaron técnicas y herramientas de ingeniería industrial tales como: VSM, diagrama de pescado, diagrama de Pareto, matriz de priorización, método por puntos, CAD, pruebas de hipótesis mediante el *software Expertfit*, simulación mediante el *software Flexsim* y cálculos estadísticos para la validación de datos.

¹ Por cuestiones de privacidad y seguridad el nombre de la fábrica se modificó, durante este proyecto se utilizará el nombre de ██████████.

Abstract

The metalworking sector is one of the most significant manufacturing activities for economic development in Mexico. It uses the products obtained in the iron and steel processes to manufacture: agricultural, office, and household items, metal tools, machinery, furniture, among others.

According to figures from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), during 2014, Veracruz ranked 16th for the value of its exports, which reached an amount of 7292.9 million USD, which represented 2.1% at the national level. The manufacturing industry stood out as the main activity, with an export value of 5,500.1 million dollars. The sectors with the highest participation were chemical (26.9%) and metalworking (22.1%).

“El [REDACTED]” tool factory, where was developed this thesis work, is part of the metalworking sector. This factory is in [REDACTED] Veracruz and focuses primarily on the manufacture of manual metal tools: files, shovels, buckets, and wheelbarrows. However, machine unavailability, yield losses, and quality defects in some processes in file production mean that the overall efficiency (OEE) does not reach the values planned at the factory.

This work aims to improve the global efficiency indicator in a critical process of a triangular file line. To improve the OEE, a general overview of the factory was obtained, a diagnosis of the hand tool lines was made, the overall efficiency (OEE) was calculated and analyzed, industrial engineering techniques and tools such as VSM, CAD, were applied. hypothesis testing using Expertfit software, simulation using Flexsim software and statistical calculations for data validation.

Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
Contenido	iii
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xi
Introducción	xiii
Objetivo general y específicos	xiv
Planteamiento del problema	xiv
Objetivo general	xv
Objetivos específicos	xv
Justificación	xvi
Hipótesis	xvii
Capítulo 1 Generalidades de la fábrica	1
1.1 La industria metalmecánica	1
1.2 Descripción de la fábrica de herramientas manuales	3
1.2.1 Nacimiento de la fábrica	3
1.2.2 Giro de la fábrica	3
1.2.3 Marco geográfico	3
1.2.4 Misión	4
1.2.5 Visión	4
1.2.6 Valores	4
1.2.7 Políticas de calidad	5
1.2.8 Organización de la fábrica	5
1.2.9 Productos de la fábrica	9
1.2.10 Descripción del proceso de lima	10
1.2.11 Descripción del proceso de lima triangular 6	12
1.3 Conclusión	15
Capítulo 2 Marco teórico	16
2.1 Mantenimiento Productivo Total	16
2.1.1 Difusión del TPM	17

2.1.2	Definición del TPM	17
2.1.3	Pilares del TPM	18
2.1.4	Indicadores de evaluación de TPM	20
2.2	Mapa de la cadena de valor (VSM).....	27
2.2.1	Generalidades de VSM	27
2.2.2	Símbolos de VSM.....	29
2.2.3	Metodología de VSM	32
2.2.3.1	Crear y capacitar un grupo de trabajo VSM.....	33
2.2.3.2	Definir el producto o familia de productos	34
2.2.3.3	Elaboración del VSM de estado presente	35
2.2.3.4	Elaboración del VSM de estado futuro	38
2.2.3.5	Identificar los bucles <i>pull</i> del VSM de estado futuro.....	40
2.2.3.6	Planificar y aplicar mejora en la corriente de valor	41
2.3	Herramientas de calidad	42
2.3.1	Diagrama de Pareto.....	43
2.3.1.1	Aplicaciones del diagrama de Pareto	45
2.3.1.2	Metodología del diagrama de Pareto	46
2.3.2	Diagrama de pescado	49
2.4	Simulación	50
2.4.1	Definición de simulación	51
2.4.2	Clasificación de la simulación	52
2.4.3	Metodología para un modelo de simulación	52
2.4.3.1	Definir problema y planear estudio.....	53
2.4.3.2	Recolectar datos y definir el modelo.....	54
2.4.3.3	Verificar que los supuestos del modelo sean validos.....	55
2.4.3.4	Construir y verificar un programa de cómputo	55
2.4.3.5	Realizar corridas piloto.....	56
2.4.3.6	Validar el modelo programado	56
2.4.3.7	Realizar diseño de experimentos	57
2.4.3.8	Realizar corridas del modelo	57
2.4.3.9	Analizar los datos de salida	57
2.4.3.10	Documentar, presentar y usar resultados	58
2.4.4	Factores a considerar en el desarrollo del modelo de simulación	58
2.4.5	Errores comunes al realizar un estudio de simulación	60
2.4.6	Pruebas estadísticas para un estudio de simulación	60
2.4.6.1	Determinar las distribuciones de probabilidad de los datos de entrada.....	61
2.4.6.2	Determinar del número de corridas óptimo del modelo de simulación.....	64
2.4.6.3	Realizar la validación del modelo de simulación.....	65
2.5	Software de simulación <i>Flexsim</i>	65
2.5.1	Requerimientos mínimos de <i>hardware</i>	66

2.5.2	Objetos 3D en <i>Flexsim</i>	67
2.5.3	Etiquetas en <i>Flexsim</i>	72
2.5.4	Puertos en <i>Flexsim</i>	73
2.5.5	Construir un modelo 3D en <i>Flexsim</i>	75
2.5.5.1	Agregar <i>objects</i> al modelo 3D.....	75
2.5.5.2	Editar <i>objects</i> del modelo 3D.....	76
2.5.5.3	Cambiar apariencia de los <i>objects</i> 3D.....	77
2.5.5.4	Conectar los <i>objects</i> 3D.....	78
2.5.5.5	Ejecutar un modelo por primera vez.....	80
2.5.6	Expertfit.....	81
2.5.6.1	Características de <i>Expertfit</i>	81
2.5.6.2	Distribuciones de probabilidad de <i>Expertfit</i>	82
2.5.6.3	Pruebas de bondad de <i>Expertfit</i>	85
2.5.6.4	Uso de <i>Expertfit</i>	86
2.6	Diseño Asistido por Computadora (CAD).....	93
2.6.1	Etapas del CAD.....	93
2.6.2	Ventajas del CAD.....	94
2.6.3	<i>Mastercam</i>	94
2.6.3.1	Tipos de archivos compatibles con <i>Mastercam</i>	95
2.6.3.2	Módulos de <i>Mastercam</i>	96
2.6.3.3	Requerimientos mínimos de hardware.....	97
2.7	Prueba de hipótesis.....	98
2.7.1	Hipótesis nula y alternativa.....	100
2.7.2	Errores tipo I y tipo II en una prueba de hipótesis.....	100
2.7.3	Prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas.....	101
2.8	Eficacia global del equipo (OEE).....	104
2.8.1	Disponibilidad.....	105
2.8.2	Tasa de rendimiento.....	105
2.8.3	Tasa de calidad.....	106
2.8.4	Principales pérdidas para no alcanzar la eficiencia global.....	106
2.8.5	Clasificación de la OEE.....	109
2.8.6	Ventajas de la OEE.....	109
2.9	Conclusión.....	110
Capítulo 3	Mejora de la eficacia global (OEE).....	111
3.1	Metodología.....	111
3.2	Obtener un panorama general de la fábrica de herramientas manuales “ XXXXXXXXXX ”.....	112
3.2.1	Conocer los aspectos generales de la fábrica.....	112
3.2.2	Conocer las áreas que integran la fábrica.....	113
3.3	Realizar diagnóstico de las líneas de herramientas manuales.....	113

3.3.1	Seleccionar familia de productos con mayor tiempo producción.....	114
3.3.2	Identificar necesidades de la fábrica	115
3.3.3	Identificar problemáticas de la fábrica.....	116
3.4	Crear mapa de cadena de valor (VSM) del estado presente de la línea de lima triangular 6.....	117
3.4.1	Crear grupo de trabajo para elaborar VSM.....	119
3.4.2	Realizar pláticas y reuniones de trabajo con el grupo de trabajo	119
3.4.3	Seleccionar línea de producto objetivo	120
3.4.3.1	Elaborar matriz de priorización	121
3.4.3.2	Seleccionar producto objetivo	123
3.4.4	Determinar los procesos a mapear en el VSM del estado presente	123
3.4.5	Seleccionar y calcular de indicadores para el VSM del estado presente	124
3.4.6	Elaborar mapa de estado presente del procesamiento de lima triangular 6	128
3.4.7	Analizar VSM del estado presente del procesamiento de lima triangular 6.....	134
3.5	Descripción del proceso de rectificado	136
3.6	Calcular la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado.....	137
3.6.1	Cálculo del factor disponibilidad	141
3.6.2	Cálculo del factor tasa de rendimiento.....	142
3.6.3	Cálculo del factor tasa de calidad	143
3.6.4	Cálculo de OEE	145
3.7	Realizar análisis del OEE y sus factores	146
3.7.1	Analizar factor disponibilidad.....	146
3.7.2	Analizar factor tasa de rendimiento	148
3.7.3	Analizar factor tasa de calidad.....	150
3.7.4	Analizar OEE.....	151
3.7.5	Proponer soluciones de mejora	153
3.7.6	Seleccionar la solución de mejora con mayor impacto	154
3.8	Definir técnicas y herramientas a implementar	157
3.9	Construir modelo de simulación para evaluar la solución.....	158
3.9.1	Formular problema	158
3.9.2	Planear desarrollo del modelo de simulación.....	159
3.9.3	Recolectar datos para el modelo de simulación	161
3.9.3.1	Definir los tipos de datos para el modelo de simulación.....	161
3.9.3.2	Recolectar datos para el modelo de simulación	162
3.9.3.3	Analizar estadísticos de los datos recolectados.....	163
3.9.4	Construir modelo de simulación	164
3.9.4.1	Definir el sistema a simular	164
3.9.4.2	Definir los supuestos del modelo.....	167
3.9.4.3	Verificar el modelo conceptual	168
3.9.4.4	Construir el <i>layout</i> y máquinas en 3D involucrados en el proceso a simular.....	168
3.9.4.5	Construir el modelo de simulación	171
3.9.4.6	Verificar el modelo de simulación.....	182

3.9.5 Realizar corridas piloto del modelo de simulación	183
3.9.6 Validar modelo de simulación	185
3.9.6.1 Determinar si los datos son normales	185
3.9.6.2 Validar modelo de simulación con la prueba <i>t-student</i>	188
3.9.7 Experimentar en el modelo de simulación con la solución de mejora	192
3.9.7.1 Experimentación con un mecanismo de volteo automático de limas	192
3.9.7.2 Experimentación eliminando generación de punto de referencia.....	195
3.9.7.3 Experimentación combinando las propuestas C y D.....	196
3.9.9 Documentar y presentar resultados	198
3.10 Comparar los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos de la propuesta de mejora	200
3.11 Analizar resultados.....	204
3.12 Conclusión	207
Conclusiones generales	208
Recomendaciones.....	210
Fuentes de información	211
Anexo 1 Formato de recolección de datos para el VSM	214
Anexo 2 Formato de recolección de tiempos para el modelo de simulación.....	215
Anexo 3 Modelo de simulación del sistema actual.....	216
Anexo 4 Tabla de valores t de la distribución de <i>t-student</i>	217
Anexo 5 Formato para la recolección de tiempos de la propuesta C	218
Anexo 6 Modelo de simulación de la propuesta C	219
Anexo 7 Modelo de simulación de la propuesta D.....	220
Anexo 8 Modelo de simulación de la combinación.....	221

Índice de figuras

Figura 1. 1 Comparativo de la Industria Metalmeccánica respecto al Sector Manufacturero (CANACINTRA, 2017).....	2
Figura 1. 2 Organigrama de la presidencia de la fábrica Roble.....	6
Figura 1. 3 Organigrama del personal a cargo del director de operaciones.....	6
Figura 1. 4 Organigrama del personal a cargo del gerente de administración y finanzas.....	7
Figura 1. 5 Organigrama del personal a cargo del gerente de recursos humanos.....	7
Figura 1. 6 Organigrama del personal a cargo del gerente de cadena de suministros.....	9
Figura 1. 7 Organigrama del personal a cargo del director comercial y marketing.....	9
Figura 1. 8 Productos de la fábrica "██████".....	10
Figura 1. 9 Etapas del proceso de lima.....	11
Figura 1. 10 Lima triangular 6.....	12
Figura 1. 11 Proceso de fabricación de la lima triangular 6.....	12
Figura 2. 1 Metodología para el desarrollo de VSM (Cabrera Calva, 2011).....	33
Figura 2. 2 Matriz para la priorización de producto (Cabrera Calva, 2011).....	35
Figura 2. 3 Proceso de elaboración de VSM, estado presente (pasos 1-7), modificado de Lee y Snyder (2006).....	36
Figura 2. 4 Proceso de elaboración de VSM, estado presente (pasos 8-16), modificado de Lee y Snyder (2006).....	37
Figura 2. 5 Proceso de elaboración de VSM de estado futuro, modificado de Madariaga (2013).....	38
Figura 2. 6 VSM del estado futuro (Madariaga, 2013).....	40
Figura 2. 7 VSM del estado futuro con bucles pull e ideas de mejora (Madariaga, 2013).....	40
Figura 2. 8 Mejora en la corriente de valor (Madariaga, 2013).....	41
Figura 2. 9 Ordenar datos decrecientemente (Camisón et al., 2006).....	47
Figura 2. 10 Representación gráfica de los datos (Camisón et al., 2006).....	48
Figura 2. 11 Diagrama de Pareto (Camisón et al., 2006).....	48
Figura 2. 12 Metodología para elaborar un modelo de simulación (Law y Associates, 2007).....	53
Figura 2. 13 Elementos de flujo (Flow ítems).....	68
Figura 2. 14 Recursos fijos (Fixed resources).....	68
Figura 2. 15 Ejecutores de tareas (Task executers).....	70
Figura 2. 16 Conexiones de puertos.....	73
Figura 2. 17 Puertos de entrada/salida.....	74
Figura 2. 18 Puertos centrales.....	74
Figura 2. 19 Arrastrar objetos en el modelo de simulación.....	76
Figura 2. 20 Ventana de General properties.....	77

Figura 2. 21 Ventana de propiedades para cambiar apariencia.	78
Figura 2. 22 Seleccionar Connect objects A.....	78
Figura 2. 23 Conectar fixed resources.	79
Figura 2. 24 Seleccionar Connect center ports S.	80
Figura 2. 25 Conectar fixed resources y task executers.....	80
Figura 2. 26 Ejecutar modelo por primera vez.	81
Figura 2. 27 Abrir el software Expertfit.	86
Figura 2. 28 Crear nuevo proyecto Expertfit.	87
Figura 2. 29 Ventana de Project-Element Editing de Expertfit.	87
Figura 2. 30 Ventana de Project Directory y de Data Analysis.	88
Figura 2. 31 Ventana de Enter-Data Options.....	88
Figura 2. 32 Hoja de cálculo con los datos a analizar.....	89
Figura 2. 33 Ventana de Data Editor.	89
Figura 2. 34 Ventana de Data-Summary Table.	90
Figura 2. 35 Ventana de Data Analyses, pestaña de Models.....	90
Figura 2. 36 Ventana de Automated-Fitting Results.	91
Figura 2. 37 Ventana de Simulation-Representation Options.	92
Figura 2. 38 Ventana de Simulation-Software Representation.....	92
Figura 2. 39 Zona de aceptación y rechazo, comparación de medias con varianzas desconocidas (Elaboración propia).....	103
Figura 2. 40 Cálculo de la eficacia global del equipo (OEE) y sus factores (Nakajima, 1989).....	108
Figura 3. 1 Diagrama de Pareto de las familias de productos de la fábrica “ XXXXXXXXXX ”.....	115
Figura 3. 2 Matriz de priorización de productos líneas de limas.	122
Figura 3. 3 Diagrama de proceso de la línea de lima triangular 6.	124
Figura 3. 4 Paso 1 de la elaboración del VSM del estado presente.	129
Figura 3. 5 Paso 2 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).	129
Figura 3. 6 Paso 3 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).	130
Figura 3. 7 Paso 4 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).	130
Figura 3. 8 Pasos 5-6 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).	131
Figura 3. 9 Pasos 7-8 de la elaboración del VSM del estado presente parcial (inspección a embalaje).	132
Figura 3. 10 VSM del estado presente: línea de lima triangular 6 (recepción a tratamiento térmico).....	133
Figura 3. 11 VSM del estado presente: línea de lima triangular 6 (sand blast a embalaje).	133
Figura 3. 12 Proceso de rectificado de lima triangular 6.	136
Figura 3. 13 Fluctuación del factor disponibilidad.	141
Figura 3. 14 Fluctuación del factor tasa de rendimiento.....	143
Figura 3. 15 Fluctuación del factor tasa de calidad.	145
Figura 3. 16 Fluctuación de OEE.	145

Figura 3. 17 Diagrama de pescado de las causas de pérdida por paradas.....	147
Figura 3. 18 Diagrama de pescado de las causas de pérdida de velocidad.....	149
Figura 3. 19 Diagrama de pescado de las causas de pérdida de calidad.....	151
Figura 3. 20 Comparación del cálculo real contra lo estándar.....	152
Figura 3. 21 Diagrama del recorrido del proceso de rectificado.....	167
Figura 3. 22 Layout del proceso de rectificado.....	169
Figura 3. 23 Importación del Layout del proceso de rectificado a Flexsim.....	172
Figura 3. 24 Objects agregados y editados en el modelo de simulación.....	174
Figura 3. 25 Conexiones de puertos entre los Objects.....	175
Figura 3. 26 Programación de los Source.....	177
Figura 3. 27 Programación del Combiner corte.....	177
Figura 3. 28 Programación del Multi processor (rectificadoras).....	178
Figura 3. 29 Programación del Queue.....	179
Figura 3. 30 Programación del Operator.....	179
Figura 3. 31 Programación del Time Table.....	180
Figura 3. 32 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Members).....	181
Figura 3. 33 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Functions).....	181
Figura 3. 34 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Breakdowns).....	182
Figura 3. 35 Datos en la hoja de trabajo de Minitab.....	186
Figura 3. 36 Prueba de normalidad de Minitab.....	186
Figura 3. 37 Ventana de prueba de normalidad.....	187
Figura 3. 38 Gráfica de probabilidad de la Simulación.....	187
Figura 3. 39 Gráfica de probabilidad del Sistema Real.....	188
Figura 3. 40 Comparación de medias del modelo de simulación y el sistema real.....	191
Figura 3. 41 Comparación de medias de tasa de rendimiento entre la modelación del sistema actual contra el mecanismo.....	194
Figura 3. 42 Comparación de medias entre la modelación del sistema actual vs eliminando generación de punto de referencia.....	196
Figura 3. 43 Comparación de medias de tasa de rendimiento entre la modelación del sistema actual contra la combinación.....	198
Figura 3. 44 Grafico de los valores obtenidos en los modelos de simulación.....	199
Figura 3. 45 Comparación de la media de la tasa de rendimiento del Sistema actual y las Propuestas.....	199
Figura 3. 46 Incremento de la tasa de rendimiento de las propuestas C y D.....	200
Figura 3. 47 Comparación de medias del sistema actual y la propuesta C.....	203
Figura A3. 1 Modelo de simulación del sistema actual del proceso de rectificado.....	216

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Indicadores de gestión (Morales, 2004).....	21
Tabla 2. 2 Indicadores de calidad (Morales, 2004).....	22
Tabla 2. 3 Indicadores de ahorro de energía (Morales, 2004).	23
Tabla 2. 4 Indicadores de mantenimiento: Fiabilidad y mantenibilidad (Morales, 2004).	23
Tabla 2. 5 Indicadores de mantenimiento: Eficiencia del mantenimiento (Morales, 2004).	24
Tabla 2. 6 Indicadores de mantenimiento: Costos del mantenimiento (Morales, 2004).....	24
Tabla 2. 7 Indicadores de salud, seguridad y entorno (Morales, 2004).	25
Tabla 2. 8 Indicadores de formación y clima laboral (Morales, 2004).	25
Tabla 2. 9 Indicadores de eficacia de la planta (Morales, 2004).	26
Tabla 2. 10 Factores a considerar para la aplicación del VSM (Lee y Snyder, 2006).	28
Tabla 2. 11 Símbolos de materiales (Lee y Snyder, 2006).	30
Tabla 2. 12 Símbolos de proceso (Lee y Snyder, 2006).	31
Tabla 2. 13 Símbolos de información (Lee y Snyder, 2006).	31
Tabla 2. 14 Símbolos varios (Lee y Snyder, 2006).	32
Tabla 2. 15 Criterios para establecer macro familia (Cabrera Calva, 2011).	34
Tabla 2. 16 Obtención de datos (Camisón et al., 2006).	47
Tabla 2. 17 Requerimientos mínimos recomendados por Flexsim (FlexSim, 2020).	66
Tabla 2. 18 Biblioteca de Flexsim de Fixed resources.	68
Tabla 2. 19 Biblioteca de Flexsim de Fixed resources (continuación).	69
Tabla 2. 20 Biblioteca de Flexsim de Task executers.....	70
Tabla 2. 21 Biblioteca de Flexsim de Task executers (continuación).	71
Tabla 2. 22 Distribuciones discretas de Expertfit.	83
Tabla 2. 23 Distribuciones continuas acotadas de Expertfit.	84
Tabla 2. 24 Distribuciones continuas no negativas de Expertfit.	84
Tabla 2. 25 Distribuciones continuas ilimitadas de Expertfit.	85
Tabla 2. 26 Requerimientos mínimos de Mastercam (CNC Software, 2020)	98
Tabla 2. 27 Situaciones posibles al probar una hipótesis (Walpole et al., 1999).	101
Tabla 2. 28 Seis grandes pérdidas del OEE (Vijayakumar y Gajendran, 2014).	108
Tabla 2. 29 Clasificación de la OEE (Ruiz, 2009).....	109
Tabla 3. 1 Horas trabajadas del año 2019 de cada familia de productos de la fábrica “ XXXXXXXXXX ”.....	114
Tabla 3. 2 Horas de fabricación e información de problemas de las líneas de limas.	121
Tabla 3. 3 Tabla resumen de información de indicadores para procesamiento de lima triangular 6.	128
Tabla 3. 4 Tiempo de calendario del proceso de rectificado.	138
Tabla 3. 5 Tiempo disponible del proceso de rectificado.	138

Tabla 3. 6 Tiempo de operación del proceso de rectificado.	139
Tabla 3. 7 Tiempo productivo del proceso de rectificado.	140
Tabla 3. 8 Tiempo efectivo del proceso de rectificado.	140
Tabla 3. 9 Cálculo de factor disponibilidad.	141
Tabla 3. 10 Cálculo del factor tasa de rendimiento en términos de tiempo.	142
Tabla 3. 11 Cálculo de factor tasa de rendimiento en términos de limas.	143
Tabla 3. 12 Cálculo de factor tasa de calidad en términos de tiempo.	144
Tabla 3. 13 Cálculo de factor tasa de calidad en términos de limas.	144
Tabla 3. 14 Cálculo de OEE.	145
Tabla 3. 15 Soluciones para eliminar las principales causas que generan pérdidas de velocidad.	153
Tabla 3. 16 Peso asignado para cada factor a evaluar.	155
Tabla 3. 17 Escala de evaluación de las soluciones propuestas.	155
Tabla 3. 18 Método por puntos para la selección de la solución con mayor impacto.	156
Tabla 3. 19 Distribuciones obtenidas del análisis de los datos del proceso de rectificado.	164
Tabla 3. 20 Diagrama de flujo del proceso de rectificado.	166
Tabla 3. 21 Listado de objetos 3D del modelo de simulación.	170
Tabla 3. 22 Listado de Fixed resources utilizados en el modelo de simulación.	172
Tabla 3. 23 Listado de Flow ítems del modelo de simulación.	173
Tabla 3. 24 Nombre de los Objects del modelo de simulación.	176
Tabla 3. 25 Resultados de los indicadores de las corridas piloto.	183
Tabla 3. 26 Estadísticos de la tasa de rendimiento del modelo de simulación.	184
Tabla 3. 27 Cálculo del número de corridas óptimas.	185
Tabla 3. 28 Comparación de los estadísticos del sistema real contra el modelo de simulación.	189
Tabla 3. 29 Distribuciones obtenidas del análisis de los datos del volteo de limas.	193
Tabla 3. 30 Resultados de los indicadores de las corridas con el mecanismo de volteo automático.	194
Tabla 3. 31 Estadísticos de la tasa de rendimiento con el mecanismo de volteo automático.	194
Tabla 3. 32 Resultados de los indicadores de las corridas eliminando generación de punto de referencia. ...	195
Tabla 3. 33 Estadísticos de la tasa de rendimiento eliminando generación de punto de referencia.	196
Tabla 3. 34 Resultados de los indicadores de las corridas combinando las propuestas C y D.	197
Tabla 3. 35 Estadísticos de la tasa de rendimiento combinando las propuestas C y D.	198
Tabla 3. 36 Comparación de los estadísticos del sistema actual contra la propuesta C.	201
Tabla A1. 1 Formato de recolección de datos para el VSM.	214
Tabla A2. 1 Recolección de tiempos del modelo de simulación.	215
Tabla A4. 1 Tabla de valores t de student (Lomax, 2001).	217
Tabla A5. 1 Recolección de tiempos de la propuesta C.	218

Introducción

De acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), las industrias manufactureras están conformadas por las unidades económicas dedicadas principalmente a la transformación mecánica, física o química de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos (INEGI, 2014). Uno de los sectores dentro de la industria manufacturera es el de metalmecánico. El sector metalmecánico en México se concentra principalmente en fábricas dedicadas al maquinado de piezas mecánicas y a la fabricación de productos metálicos forjados y troquelados (CANACINTRA, 2017).

De acuerdo con la CANACINTRA (2017), el sector metalmecánico nacional se enfrenta a importantes retos en su productividad y competitividad. Tal es el caso de la fábrica de herramientas manuales “██████████”, enfocada principalmente en la fabricación de herramientas manuales: limas, palas, cucharas y carretillas, donde surge la necesidad de aumentar el indicador de eficacia global para comparar sus objetivos productivos estimados con lo realmente alcanzado, evaluar su desempeño en períodos a corto plazo y controlar su proceso productivo para estandarizar la calidad de sus productos permitiéndole mantenerse vigente en el mercado competitivo, incrementar su productividad y aportar recursos a la organización a la que pertenece, así mismo lograr la permanencia como fábrica generadora de empleo en el estado de Veracruz.

El presente trabajo de tesis muestra una forma de mejorar el indicador de eficacia global en un proceso crítico de una línea de lima triangular, esperando que pueda ayudar a fábricas similares con la misma necesidad. Sin embargo, es necesario hacer hincapié que cada fábrica es única y puede presentar diferentes problemas a los que se encuentran en la fábrica “██████████”, lo que podría implicar en modificar la metodología utilizada en este trabajo, utilizando herramientas y técnicas diferentes.

En los siguientes puntos se describe la problemática que originó el presente trabajo de tesis, los objetivos que se pretenden lograr, la justificación e hipótesis.

La línea de lima triangular de 6" genera el 83% de la producción anual de lima. Por esta razón, la fábrica enfoca sus esfuerzos en este producto; sin embargo, la falta de disponibilidad de las máquinas, pérdidas de rendimiento y defectos de calidad en algunos procesos de la producción de lima ocasionan que la eficiencia global no alcance los valores planeados en la fábrica de herramientas manuales "██████████".

Ante ello, se ha planteado la posibilidad de realizar un proyecto a través de la aplicación de técnicas de ingeniería industrial para el mejoramiento de la eficiencia global en la línea de limas.

Objetivo general

El objetivo general, el cual, resume la idea central y finalidad de este proyecto, es el siguiente:

Mejorar la eficacia global (OEE) en un proceso crítico de producción de limas de la fábrica de herramientas manuales "██████████", mediante el desarrollo e implementación de una estrategia basada en la aplicación de técnicas de ingeniería industrial.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto, definidos con base en la metodología propuesta para el trabajo, que permitirán lograr el objetivo general del proyecto son los siguientes:

- Conocer la fábrica de herramientas manuales.
- Seleccionar línea con mayor tiempo de producción en la fábrica de herramientas manuales.
- Conocer el funcionamiento y los elementos que integran la línea seleccionada.
- Diagnosticar la línea seleccionada.
- Identificar el proceso crítico de la línea seleccionada.
- Calcular el indicador OEE del proceso crítico.
- Identificar las pérdidas que disminuyen el indicador OEE del proceso crítico.

- Determinar las herramientas de ingeniería industrial que eliminen las pérdidas que afectan el indicador OEE.
- Calcular el indicador OEE posterior a la implementación de las mejoras.
- Validar los resultados de la implementación de las mejoras.

Justificación

Actualmente las fábricas están optando por el mejoramiento continuo, debido a las exigencias del mercado y la difícil competencia, por ello la adopción de nuevas estrategias para continuar con altos niveles competitivos se hace imprescindible, y una de ellas es el indicador de la eficacia global, que permite alcanzar las metas productivas propuestas por las industrias, brindando la información necesaria para la toma de decisiones en la fábrica.

Esta investigación se justifica por la necesidad de la fábrica de aumentar el indicador de eficacia global para comparar sus objetivos productivos estimados con lo realmente alcanzado, evaluar su desempeño en períodos a corto plazo y controlar su proceso productivo para estandarizar la calidad de sus productos permitiéndole mantenerse vigente en el mercado competitivo, incrementar sus ingresos y aportar recursos a la organización a la que pertenece, así mismo lograr la permanencia como fábrica generadora de empleo en el estado de Veracruz.

El procedimiento desarrollado en esta tesis servirá como programa piloto, el cual buscará ser implementado en otras áreas de la fábrica y se espera que los resultados y la metodología utilizada en la solución de la problemática de una fábrica de herramientas manuales, propuesta en este trabajo, dé pauta para futuros trabajos destinados a aumentar los indicadores globales de fábricas manufactureras.

Adicionalmente el desarrollo del trabajo permitirá al tesista emplear los conocimientos adquiridos durante los estudios de posgrado en el Instituto Tecnológico de Orizaba, mediante la aplicación de técnicas de ingeniería industrial para la solución de problemas reales en el ámbito de la industria.

Hipótesis

El supuesto del presente proyecto será el siguiente:

La eficacia global en un proceso crítico de producción de limas de la fábrica de herramientas manuales “██████████” se incrementará al menos 20% con la implementación de las técnicas de ingeniería industrial.

Capítulo 1

Generalidades de la fábrica

Para entender el tipo de industria en la cual se desarrolló este proyecto, en este capítulo se muestran generalidades sobre la industria metalmecánica en México y de un producto fabricado en una línea de producción de limas de la fábrica de herramientas manuales “**■** **■**”. De esta fábrica se da una descripción de sus antecedentes, giro, misión, misión, valores, política de calidad, organización y productos.

1.1 La industria metalmecánica

La lima es una herramienta metálica muy importante por el uso que tiene en el sector agropecuario y de construcción; la definición de una lima, proporcionada por la Real Academia Española, es:

“Instrumento de acero templado, con la superficie finamente estriada en uno o en dos sentidos, para desgastar y alisar los metales y otras materias duras” (RAE, 2020).

El sector metalmecánico utiliza, entre sus insumos, los productos obtenidos en los procesos siderúrgicos y sus derivados para fabricar herramientas metálicas, artículos agropecuarios, artículos para oficina, artículos para el hogar, artículos de aluminio, envases metálicos, muebles metálicos, maquinaria para otras industrias, máquinas primarias y maquinaria para el sector alimenticio, minero, agropecuario, petroquímico, metalúrgico, comercial y de construcción (DNP, 2004).

En 2017, la industria metalmecánica representaba aproximadamente el 16% del Producto Interno Bruto (PIB) industrial en América Latina, generando empleo a 4.1 millones de personas en forma directa y 19.7 millones de forma indirecta (CANACINTRA, 2017).

En México, el sector metalmecánico representa una parte fundamental en el entramado productivo, no sólo por su contenido tecnológico y valor agregado, sino también por su relación con distintos sectores industriales. En otras palabras, el sector metalmecánico es una industria formada por otras industrias, provee de maquinaria e insumos a la mayoría de los sectores industriales, entre ellos, el sector manufacturero, de construcción, automotriz y de minería. La mayoría de sus insumos son elaborados con una esencial participación de insumos nacionales, siendo así, una industria clave para otros sectores industriales.

Además, el sector metalmecánico tiene una importancia crítica en la generación de empleo industrial, requiriendo el uso de diversas especialidades de profesionales, operarios, técnicos, mecánicos, ingenieros, herreros, soldadores, electricistas, torneros, entre otros. Además, promueve la producción de otras industrias, tanto aquellas que son de mano de obra intensivas como aquellas que no lo son; como es el caso de la industria siderúrgica (CANACINTRA, 2017).

Conforme al Censo Económico 2014, el sector metalmecánico aporta el 2% de las unidades económicas totales del sector manufacturero, con un total de 10,110 unidades económicas, esto se puede observar en la Figura 1. 1.



Figura 1. 1 Comparativo de la Industria Metalmecánica respecto al Sector Manufacturero (CANACINTRA, 2017).

1.2 Descripción de la fábrica de herramientas manuales

En este apartado se incluyen temas concernientes a la descripción de la fábrica de herramientas manuales “██████████”, para tener un panorama claro del lugar en donde se realizará el presente proyecto: nacimiento, giro, marco geográfico, misión, visión, valores, política de calidad, estructura organizacional, productos y la descripción del proceso de lima.

1.2.1 Nacimiento de la fábrica

La corporación Echeverría, inició sus actividades en el año 1908, en la localidad ██████████ en el norte de España. Aquí se fabricaron las primeras herramientas forjadas con una gran calidad, logrando el reconocimiento en el mercado nacional y luego internacional.

La fábrica “██████████” fue constituida el 17 de septiembre de 1992 en México. Su actividad principal es la fabricación de limas y herramientas de mano, de uso agrícola e industrial, y la comercialización de éstas. ██████████
██████████

En la actualidad el grupo dispone de fábricas en España, Dinamarca, Venezuela, Colombia, México, Francia, Estados Unidos y Brasil; todas ellas centran su actividad en la fabricación y comercialización de herramientas manuales de uso agrícola e industrial y de recambios agrícolas.

1.2.2 Giro de la fábrica

La fábrica “██████████” es una empresa de giro manufacturero dedicada a fabricar herramientas manuales para el sector agrícola y de construcción: limas agrícolas, machetes, tijeras de poda, azadones, cuchara para albañilería, llanas para acabados y limas mecánicas.

1.2.3 Marco geográfico

La fábrica se encuentra localizada en ██████████ Veracruz, específicamente en la región de las Altas montañas. Por cuestiones de privacidad y seguridad su ubicación no puede ser divulgada en el presente proyecto.

1.2.4 Misión

La fábrica de herramientas “████████”, como cualquier otra fábrica, trabaja incansablemente por satisfacer a sus clientes cumpliendo siempre con lo estipulado en su misión:

“Satisfacer las necesidades y expectativas de los usuarios y distribuidores con rentabilidad, contribuyendo al crecimiento sostenido del valor de nuestra Corporación y a la satisfacción de todas las personas que la integran.”

1.2.5 Visión

La fábrica “████████” cuenta con una visión a futuro de lo que planean ser; su visión como corporativo es la siguiente:

“Ser reconocida como marca referente fabricante de herramientas manuales para el agricultor y el albañil, facilitándoles el trabajo a través de una gama de productos completa, competitiva y relevante, logrando un crecimiento rentable y sostenible.”

1.2.6 Valores

El recurso más importante, dentro de la fábrica “████████”, son sus trabajadores, quienes están comprometidos con los siguientes valores:

- *“Orientación al cliente: Alinear todas las áreas y recursos de la compañía a conocer, entender y satisfacer las necesidades del mercado y cliente interno y/o externo.*
- *Trabajo en equipo: Sinergia efectiva a realizar entre los integrantes de la cadena de valor para el logro de objetivos de la organización.*
- *Compromiso: Ejercer de forma responsable la gestión de los objetivos para el logro de los resultados.*
- *Dinamismo y creatividad: Hacer que las cosas sucedan. Búsqueda continua de soluciones.*
- *Ética: Adecuado comportamiento de las personas. No vale todo.*

- *Transparencia: Compartir información relevante y generar confianza con todo el equipo para conseguir los objetivos de la organización.”*

1.2.7 Políticas de calidad

En la fábrica “██████████” la calidad es todo aquello que responde a cumplir los requisitos aplicables del cliente y de las partes interesadas, para las herramientas que se diseñan, fabrican y comercializan, orientados al logro de los objetivos de gestión de la organización y teniendo como prioridad las siguientes políticas de calidad:

- *“Lograr objetivos SAFETY.*
- *Lograr objetivos Lean*
- *Lograr objetivos de Gestión*
- *Cumplir los estándares de calidad de producto”.*

El logro de las políticas permitirá mejorar continuamente el sistema de gestión de calidad a través de las personas que integran esta fábrica.

1.2.8 Organización de la fábrica

La fábrica “██████████” cuenta con una presidencia, la cual tiene a su cargo dos directores y tres gerentes (Figura 1. 2):

El director de operaciones se encarga de:

- Establecer la estrategia de desarrollo de los productos.
- Gestionar los recursos internos de los procesos.
- Garantizar la viabilidad y sostenibilidad de los procesos.
- Integrar todos los procesos internos del negocio.
- Trabajar en coordinación y con buena comunicación con el personal que está a su cargo (Figura 1. 3).

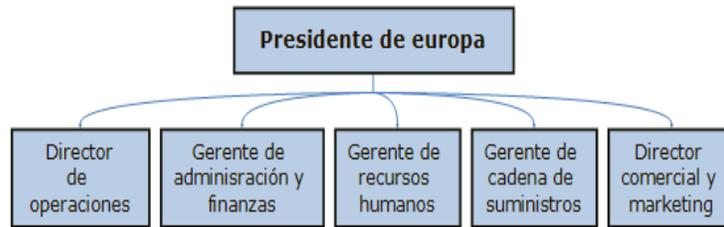


Figura 1. 2 Organigrama de la presidencia de la fábrica

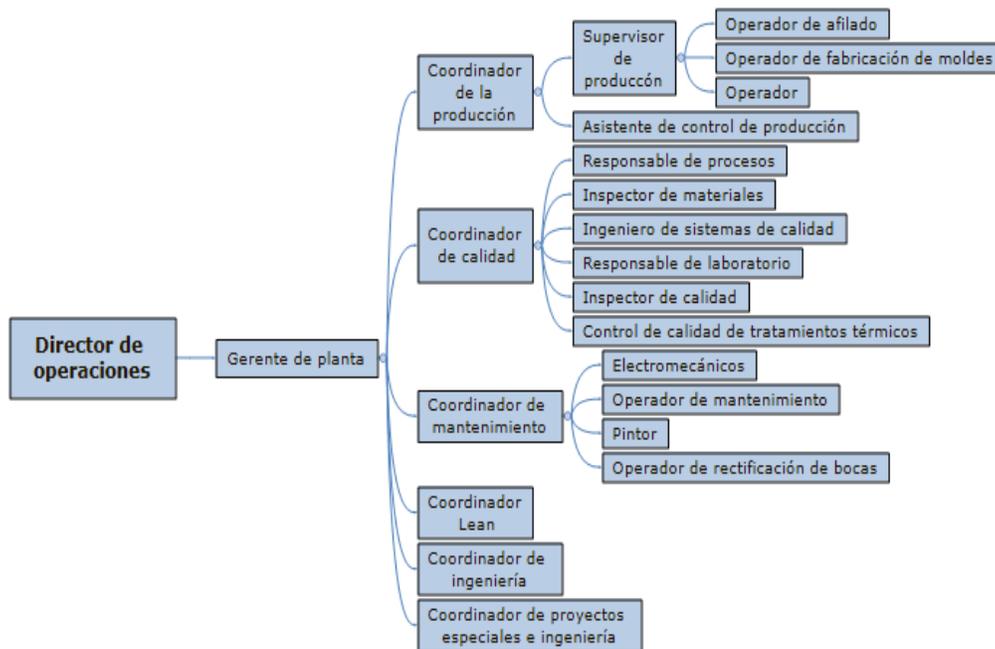


Figura 1. 3 Organigrama del personal a cargo del director de operaciones.

El gerente administración y finanzas es responsable de:

- Velar por la armonía de las funciones administrativas de la fábrica.
- Coordinar las tareas de contabilidad, tesorería, auditoría interna y análisis financiero.
- Supervisar que las interfaces al sistema contable se encuentren adecuadamente.
- Generar reportes de cumplimiento de metas.
- Emitir y revisar toda la información del proceso administrativo de la fábrica.
- Verificar el cierre contable y administrativo de la misma.
- Trabajar en coordinación y con buena comunicación con el personal que está a su cargo (Figura 1. 4).

El gerente de recursos humanos es responsable de:

- Desarrollar, aprobar y poner en práctica políticas, programas y campañas organizacionales.
- Supervisar las actividades de todos los departamentos, definiendo su estructura jerárquica.
- Hacer seguimiento de los recursos materiales y financieros, así como del talento humano.
- Brindar asesoría y capacitación en las políticas, procedimientos y prácticas de recursos humanos (RRHH).
- Llevar el registro de los archivos, informes y demás documentación pertinente al área.
- Trabajar en coordinación y con buena comunicación con el personal que está a su cargo (Figura 1. 5).

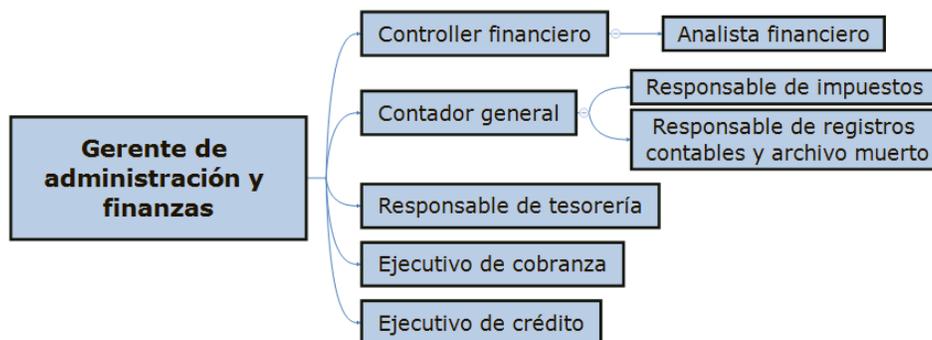


Figura 1. 4 Organigrama del personal a cargo del gerente de administración y finanzas.

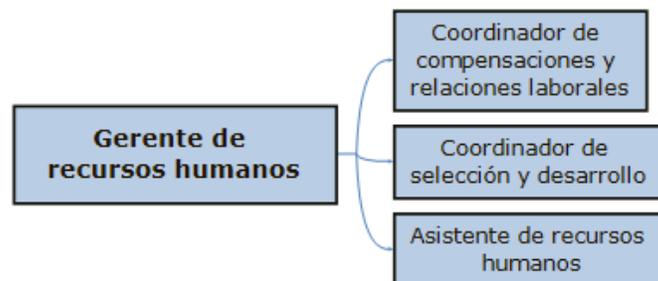


Figura 1. 5 Organigrama del personal a cargo del gerente de recursos humanos.

El Gerente de cadena de suministros es responsable de:

- Elaborar la política de distribución, aprovisionamiento y transporte de los materiales necesarios para la producción.
- Prever las necesidades de materias primas y componentes.
- Elaborar y aplicar sistemas de control de existencias para la planificación de las compras.
- Diseñar la organización de los materiales y productos almacenados.
- Negociar con proveedores, clientes y fábricas de transporte y logística.
- Controlar que la mercadería adquirida cumpla los requisitos de calidad y costo.
- Trabajar en coordinación y con buena comunicación con el personal que está a su cargo (Figura 1. 6).

El director comercial y *marketing* es responsable de:

- Elaborar los planes y acciones a corto y medio plazo para conseguir los objetivos marcados por la fábrica, diseñando las estrategias necesarias y supervisando su aplicación.
- Investigar el mercado, previendo la evolución de éste y anticipando las medidas necesarias para adaptarse a las nuevas inclinaciones o tendencias.
- Dirigir las actividades de la red comercial existente, formando al equipo y motivándolo
- Fijar tanto la política de precios y condiciones de venta como los canales de distribución.
- Diseñar, planificar, elaborar e instaurar los planes de *marketing* de la fábrica.
- Coordinar y controlar el lanzamiento de campañas publicitarias y de promoción.
- Dirigir y supervisar los estudios sobre coberturas, cuotas y distribución.
- Trabajar en coordinación y con buena comunicación con el personal que está a su cargo (Figura 1. 7).

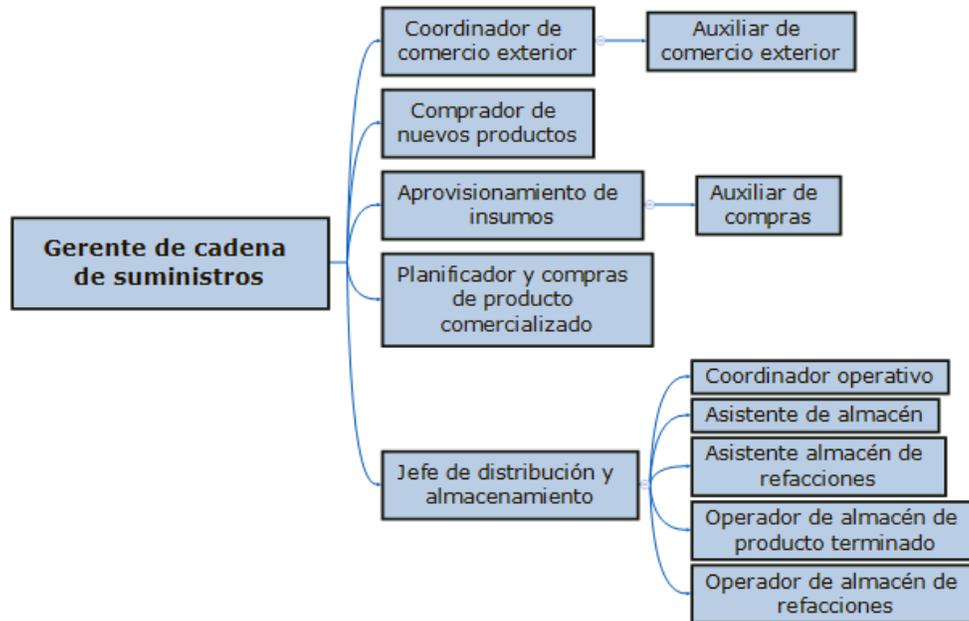


Figura 1. 6 Organigrama del personal a cargo del gerente de cadena de suministros.

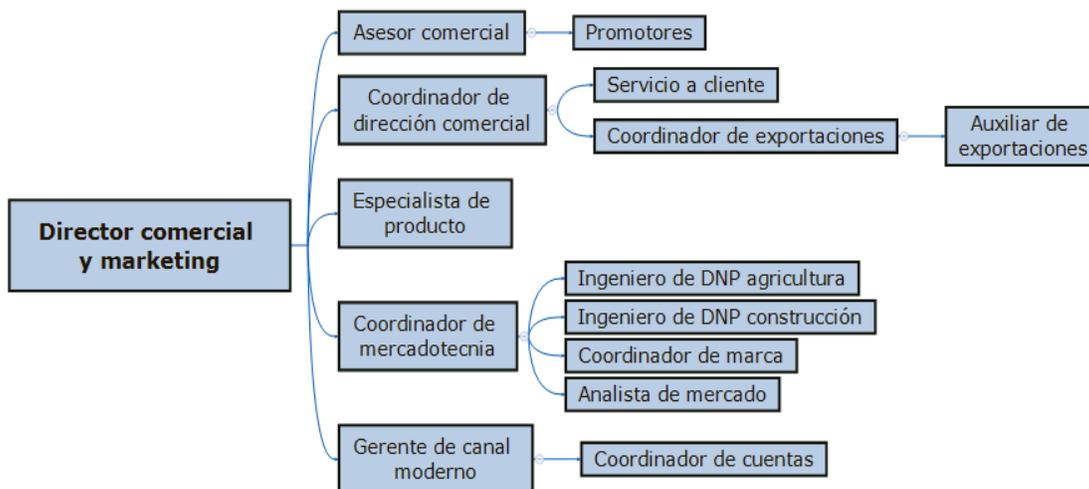


Figura 1. 7 Organigrama del personal a cargo del director comercial y marketing.

1.2.9 Productos de la fábrica

La tradición de calidad de la fábrica los ha hecho ser reconocidos en el mercado por ofrecer los productos con los más altos estándares de calidad, que se traduce en ofrecer mayor valor a sus usuarios y clientes. Son reconocidos en el mercado por producir productos (Figura 1. 8), los cuales son:

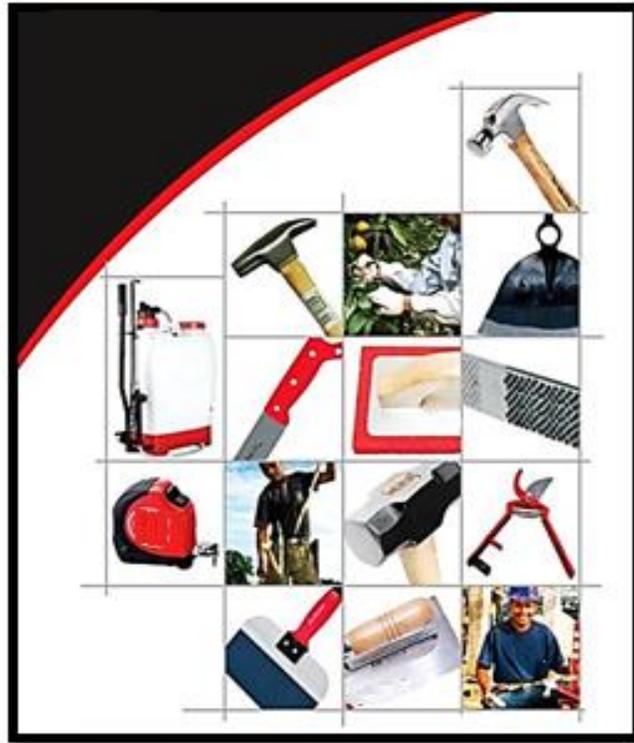


Figura 1. 8 Productos de la fábrica "██████".

- Limas agrícolas
- Machetes
- Tijeras de Poda
- Azadones
- Cuchara para Albañilería
- Llanas para acabados
- Limas mecánicas

1.2.10 Descripción del proceso de lima

La fábrica "██████" fabrica limas para diferentes usos, pero también existen otros productos que se manufacturan dentro de la fábrica en menor cantidad: cucharas, martillos o herramientas para el área agrícola; para este trabajo en particular sólo se describirán las siguientes cuatro etapas principales que se utilizan para el proceso de lima (Figura 1. 9):

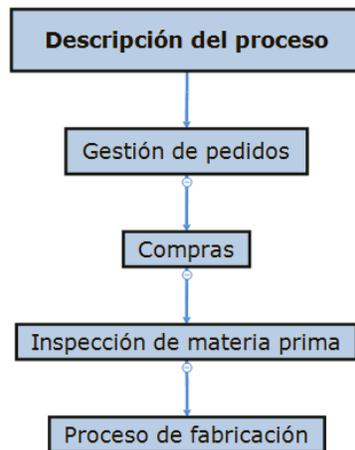


Figura 1. 9 Etapas del proceso de lima.

1. Gestión de Pedidos

Los pedidos del cliente son obtenidos por el personal de ventas y transmitidos a atención al cliente, gestionándose como se establece en “Gestión de pedidos exportación” (formato P-0301), “Gestión de pedidos nacional” (formato P-0302) y en la “Ficha del proceso de planificación de la demanda”.

2. Compras

Definidos los requisitos del cliente se debe comprar la materia prima, la cual debe cumplir con las especificaciones correspondientes. Se debe cumplir con lo establecido en “Compras” (formato P-0601) y en “Evaluación continua de proveedores” (formato P-0602).

3. Inspección de materia prima

En la etapa de inspección de materia prima se realizan pruebas e inspecciones necesarias al material que llega al área de almacén de acero (material solicitado en la etapa de compras), antes de comenzar la etapa de fabricación de lima. La materia prima inspeccionada es perfil de acero recocido o esbozo cortado recocido, con sección triangular, plana, redonda, semiredonda, cuadrada o media caña

4. Proceso de fabricación

En la etapa del proceso de fabricación se realizan las operaciones necesarias para modificar las características de la materia prima inspeccionada para obtener los diferentes tipos de limas que produce la fábrica “██████████”.

1.2.11 Descripción del proceso de lima triangular 6

Para convertir la materia prima en lima triangular 6 (Figura 1. 10), se deben realizar diferentes actividades. Para tener un panorama de cada una de estas actividades a continuación se da una breve descripción del proceso de fabricación de lima triangular 6 (Figura 1. 11):



Figura 1. 10 Lima triangular 6.

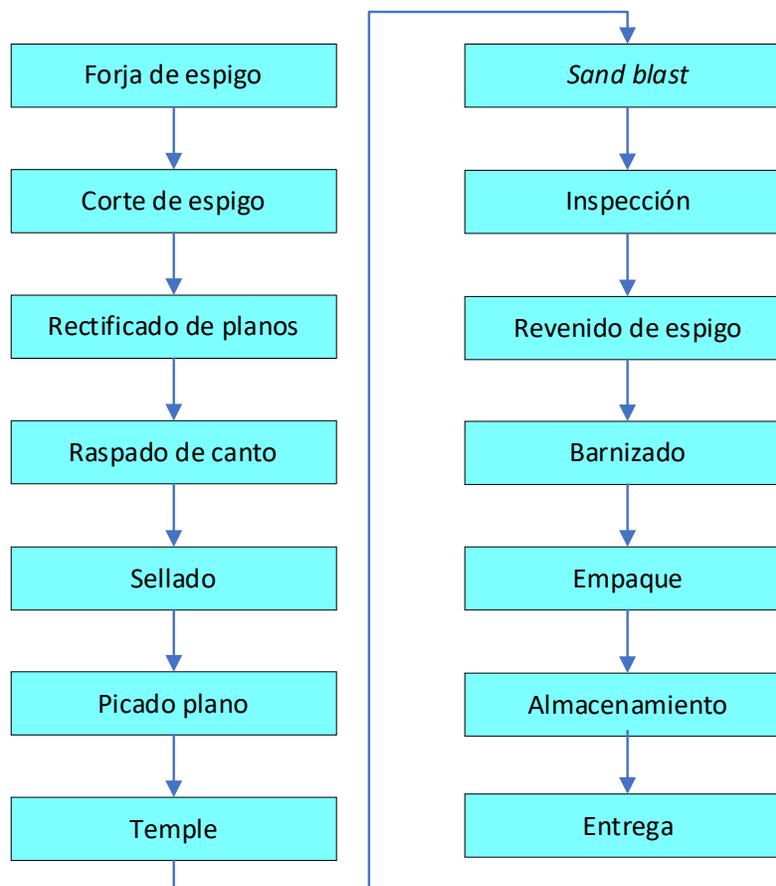


Figura 1. 11 Proceso de fabricación de la lima triangular 6.

- **Forja de espigo**

Consiste en calentar la lima mediante un horno de inducción para conformar el espigo con una máquina forjadora. Esta actividad se realiza para limas triangulares, redondas, semiredondas o cuadradas.

- **Corte de espigo**

Consiste en cortar el exceso de longitud del espigo utilizando una prensa. Esta actividad se realiza para limas triangulares, redondas, semiredondas o cuadradas.

- **Rectificado de planos**

Para el rectificado de planos se utilizan máquinas rectificadoras (tangencial o eurobumen).

- **Raspado de canto / amoldado de canto**

Estas actividades, que son equivalentes, se llevan a cabo para eliminar las aristas agudas de la lima y obtener un canto estrecho pero plano. El amolado de canto se lleva a cabo en un esmeril para cantos.

- **Picado plano**

Es la creación de dientes sobre las caras de la lima utilizando una máquina picadora las cuales pueden llevar doble talla.

- **Temple**

El temple consiste en dar el tratamiento térmico a la lima para darle la dureza adecuada; este proceso puede realizarse de dos formas:

- Por horno de inducción.

Las limas son calentadas en un horno de inducción. Cuando alcanzan la temperatura adecuada son inmediatamente introducidas en una cuba de enfriamiento. Con este proceso se obtiene una alta dureza en la lima.

- Por horno de sales.

Las limas son introducidas en un baño de sales hasta alcanzar la temperatura adecuada, entonces son sumergidas en una cuba de enfriamiento. Con este proceso se obtiene una dureza adecuada y uniforme.

- **Sand Blast**

Las limas, que se introdujeron previamente en una solución desincrustante, se introducen en una máquina de *sand blast* en la que son sometidas a un chorro de agua

y arena a presión, para eliminar todo resto de suciedad que exista en la lima. La máquina *sand blast* cuenta con una cinta transportadora que lleva las limas a través de un túnel de secado.

- **Control final**

Las limas limpias y secas son sometidas a un control unitario en el que son inspeccionadas por los controladores detenidamente y donde se prueba su agarre con ayuda de una probeta.

- **Revenido de espigo**

El revenido de espigo se hace para que aumente la tenacidad del mismo y mejore su apariencia, adquiriendo el color que ha sido tradicional en este producto. La obtención se logra calentando el espigo con la ayuda de quemadores que funcionan con gas.

- **Barnizado**

El barnizado se realiza para proteger a las limas de la corrosión, las cuales son sumergidas en una solución antioxidante que las protege hasta que son utilizadas.

- **Empaque**

Se empacan las limas en papel kraft cuando éstas han sido barnizadas y los empaques se introducen en cajas de cartón donde se identifican con sello o etiqueta y se acomodan en una caja mayor. Alternativamente, las limas también pueden ser empacadas individualmente en plástico u otro tipo de empaque y posteriormente introducidas en una caja de cartón y seguir el mismo proceso descrito anteriormente.

- **Almacenamiento**

En almacenamiento las cajas previamente empacadas pasan al almacén de producto terminado donde se almacenan en condiciones adecuadas hasta el momento de despacho.

- **Entrega**

Finalmente, las cajas almacenadas son entregadas de acuerdo con pedidos acordados, los cuales se embalan y se despachan por el medio adecuado para que sean entregados al cliente.

1.3 Conclusión

En este capítulo se presentó una descripción breve de la industria metalmecánica y de la fábrica de herramientas manuales “████████”, en la que se realizará el proyecto. De manera breve se describieron datos importantes sobre esta fábrica: nacimiento, misión, visión, valores, política de calidad y los procesos que componen la línea donde se trabajará.

Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capítulo se realiza una breve descripción de las técnicas y herramientas de ingeniería industrial utilizadas para cumplir con el objetivo del presente trabajo de tesis: Mejorar la eficacia global en un proceso crítico de producción de limas, mediante el desarrollo e implementación de una estrategia basada en la aplicación de técnicas de ingeniería industrial. La estructura de este capítulo comienza con la descripción de conceptos del mantenimiento productivo total (TPM por sus siglas en inglés *Total Productive Maintenance*), del indicador de la eficacia global del equipo (OEE por sus siglas en inglés *Overall Equipment Effectiveness*) y sus ocho grandes pérdidas. Posteriormente se describen los conceptos y la metodología del mapa de la cadena de valor (VSM por sus siglas en de *Value Stream Mapping* inglés), del diagrama de Pareto, del diagrama de pescado, de la simulación, del *software* de simulación *Flexsim* y *Expertfit*, Por último, se da la definición de las pruebas de hipótesis estadísticas, sus características y la descripción de algunas pruebas de hipótesis.

2.1 Mantenimiento Productivo Total

Mientras las industrias de proceso avanzaban en el mantenimiento preventivo y productivo, las industrias de manufactura y ensamble invertían en nuevos equipos para utilizar menos mano de obra. Los equipos utilizados en las industrias de proceso se han estado automatizando y sofisticando cada vez más. Esta tendencia hacia la automatización, combinada con la producción justo a tiempo, estimuló el interés en mejorar la gestión del mantenimiento en las industrias. Esto dio origen a un enfoque exclusivamente japonés denominado mantenimiento productivo total (TPM por sus siglas en inglés de *Total Productive Maintenance*); una forma de mantenimiento que involucra a todos los empleados (Suzuki, 2017).

2.1.1 Difusión del TPM

El TPM surgió y se desarrolló inicialmente en la industria del automóvil y rápidamente pasó a formar parte de la cultura corporativa de fábricas tales como Toyota, Nissan y Mazda, así como de sus suministradores y filiales. TPM se ha introducido posteriormente en otras industrias, como las de máquinas y herramientas, plásticos, fotografía y microelectrónica; también en industrias de proceso: alimentación, caucho, petróleo, químicas, farmacéuticas, gas, cemento, papel, siderúrgica, etc. (Suzuki, 2017).

2.1.2 Definición del TPM

Como las actividades TPM fueron contempladas primeramente en el entorno de los departamentos de producción, el TPM se definió originalmente por el Instituto Japonés de Mantenimiento de Plantas (JIPM, por sus siglas en inglés de *Japan Institute of Plant Maintenance*) incluyendo las siguientes cinco estrategias (Suzuki, 2017):

1. Maximizar la eficacia global que cubra la vida entera del equipo.
2. Establecer un sistema de mantenimiento preventivo que cubra la vida del equipo.
3. Involucrar a todos los departamentos que planifiquen, usen y mantengan equipos.
4. Involucrar a todos los empleados desde la alta dirección a los operarios directos.
5. Promover el mantenimiento preventivo motivando a todo el personal, por ejemplo, promoviendo las actividades de los pequeños grupos autónomos.

TPM también se aplica por toda la empresa, abarcando los departamentos de desarrollo del producto, así como los administrativos y de ventas. Para reflejar esta tendencia, el JIPM introdujo en 1989 una nueva definición de TPM, con los siguientes componentes estratégicos (Suzuki, 2017):

1. Crear una organización corporativa que maximice la eficacia de los sistemas de producción.
2. Gestionar la planta con una organización que evite todo tipo de pérdidas (asegurando los cero accidentes, defectos y averías) en la vida entera del sistema de producción.

3. Involucrar a todos los departamentos en la implantación del TPM, incluyendo desarrollo, ventas y administración.
4. Involucrar a todos en un mismo proyecto, desde la alta dirección hasta los operarios.
5. Orientar decididamente las acciones hacia las “cero-pérdidas” apoyándose en las actividades de los pequeños grupos.

2.1.3 Pilares del TPM

Las empresas deben seleccionar y poner en práctica actividades que logren eficiente y eficazmente los objetivos estratégicos del TPM. Las siguientes ocho actividades de TPM, son consideradas como los pilares tradicionales del TPM (Suzuki, 2017):

1. Mejoras orientadas

Las mejoras orientadas son un tipo de actividad realizada por equipos de proyectos interfuncionales compuesto por personas, tales como ingenieros de producción, personal de mantenimiento y operarios. Estas actividades están pensadas para minimizar las pérdidas que se buscan erradicar, que se han medido y evaluado cuidadosamente. La tendencia hacia operaciones sin intervención humana está muy avanzada en las industrias y probablemente irá aún más allá en el futuro. Por esta razón, las ideas para estabilizar los procesos y eliminar averías de los equipos, tiempos en vacío, y pequeñas paradas son también temas importantes para la mejora orientada.

2. Mantenimiento autónomo

El mantenimiento autónomo es una de las actividades más características del TPM, debido a que los operadores se involucran en el mantenimiento de rutina y en actividades de mejora que evitan el deterioro acelerado, controlan la contaminación y ayudan a mejorar las condiciones del equipo o la máquina. Las estrategias para lograr los objetivos del mantenimiento autónomo deben adaptarse de alguna forma respecto al procedimiento tradicional seguido en las industrias de manufactura y ensamble.

3. Mantenimiento planificado

El mantenimiento planificado, o programado, abarca tres formas de mantenimiento: el de averías, el preventivo y el predictivo. Como con otras actividades del TPM, la creación de un sistema de mantenimiento planificado debe hacerse sistemáticamente, superando un paso cada vez. La finalidad de realizar el mantenimiento preventivo y predictivo es eliminar las averías, pero incluso, cuando se realizan prácticas de mantenimiento sistemáticas, siguen ocurriendo fallos inesperados. Tales fallos revelan elementos inapropiados en el *timing* y contenido de los planes de mantenimiento y ponen a la luz que hay medidas ineficaces de prevención de fallos. En el TPM, las actividades de mantenimiento planificado resaltan la importancia de controlar los Tiempos Medios Entre Fallos (MTBF, por sus siglas en inglés de *Mean Time Between Failures*) y de usar ese análisis para especificar intervalos de las tareas (calendarios de mantenimiento semanal, mensual, anual, etc.).

4. Formación y adiestramiento

La fuerza laboral de una empresa es un activo de gran valor y, por esta razón, todas las empresas deben formar sistemáticamente a sus empleados. Los trabajadores de las industrias son cada vez más escasos, forman parte de una élite y cada vez tienen una formación más polivalente, de modo que su adiestramiento debe ser una parte vital del sistema de recursos humanos. Hay que visualizar el tipo de personas que se desea formar y los programas apropiados. En otras palabras, hay que identificar los conocimientos específicos, capacidades y habilidades de gestión que se desea que tengan y entonces programar la formación para lograr tal visión.

5. Gestión temprana de los equipos

La finalidad de la gestión temprana es lograr rápida y económicamente productos que sean fáciles de fabricar y equipos de fácil utilización. La gestión temprana del equipo concierne a los usuarios de los equipos, a las empresas de ingeniería y a los fabricantes de equipos.

6. Mantenimiento de calidad

El mantenimiento de calidad (QM, por sus siglas en inglés de *Quality Maintenance*) es un método para fabricar con calidad y evitar los defectos a través de los procesos y equipos. En el mantenimiento de calidad, la variabilidad, de las características de

calidad de un producto, se controla manejando la condición de los componentes del equipo que les afectan.

7. Actividades de departamentos administrativos y de apoyo

Los departamentos administrativos y de apoyo juegan un papel importante como soporte de la producción. La calidad y oportunidad de plazo de la información que aportan estos departamentos tiene un gran efecto sobre las actividades de producción. Hay que pensar que las tareas principales de los departamentos administrativos y de apoyo son recoger, procesar y distribuir información. Este concepto hace más fácil promover y medir el mantenimiento autónomo, la mejora y otras actividades TPM en un entorno de oficinas.

8. Gestión de seguridad y entorno

La seguridad y prevención de efectos adversos sobre el entorno son temas importantes en las industrias. Los estudios de operatividad combinados con la formación para prevenir accidentes y el análisis de fallos son medios eficaces para tratar estos asuntos. La seguridad se promueve sistemáticamente como parte de las actividades TPM. Incorporar mecanismos a prueba de errores es una forma de tomar las precauciones apropiadas.

2.1.4 Indicadores de evaluación de TPM

Un indicador sirve para evaluar el grado de logro de las metas previstas en un periodo concreto y compararlo con otros periodos o proyectarlo en el futuro. Estas medias, que pueden ser obtenidas estadísticamente, se pueden colocar en forma de razón o proporción y ser comparadas entre sí mismas o con parámetros de comportamientos del sistema previamente definidos o diseñados en congruencia con las expectativas de los usuarios (Rosas, 2014).

Específicamente hablando del mantenimiento productivo total (que se orienta a crear un sistema de gestión, que maximice la eficacia de todo el sistema productivo, estableciendo un sistema de pérdidas en todas las operaciones de la empresa), sus indicadores pueden clasificarse en siete tipos (Morales, 2004):

1. Gestión.
2. Calidad
3. Ahorro de energía.
4. Mantenimiento.
5. Salud, seguridad y entorno.
6. Entrenamiento y clima laboral.
7. Eficacia de planta.

Indicadores de gestión

De acuerdo con Morales (2004), los indicadores de gestión sintetizan muchas actividades individuales. Es esencial reflejar los resultados de las actividades TPM en los indicadores de gestión y mostrar cómo esta metodología ayuda a mejorar el rendimiento de la organización. Para lograr esto, se define una política TPM basada en la política general de la empresa, y se establecen objetivos TPM de acuerdo con los objetivos generales de la organización. La Tabla 2. 1 muestra indicadores de gestión.

Tabla 2. 1 Indicadores de gestión (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Proporción entre beneficio de operaciones y capital bruto	$\frac{\text{Beneficios de operaciones}}{\text{Capital bruto}} \times 100$		Anual	Indica el rendimiento global de la planta
Valor añadido	$\frac{\text{Valor añadido}}{\text{Número de empleados}}$		Anual	Valor añadido por empleado
Productividad del personal	$\frac{\text{Volumen o cantidad de producción}}{\text{Nº trabajadores o total horas tarabajadas}}$	1.4 – 2x	Anual	Output por persona
Reducción de costos	Reducción de costos absoluta o porcentual	De acuerdo con meta anual	Semestral	% de reducción de costos o umbral de rentabilidad
Reducción de personal	Reducción absoluta o porcentual del número de trabajadores	De acuerdo con meta anual	Semestral	En comparación con antes de introducir TPM
Reducción del valor de stocks de producto	Reducción absoluta o porcentual del valor de los stocks de producto	De acuerdo con meta anual	Semestral	En comparación con antes de introducir TPM
Reducción de trabajos en proceso	Reducción absoluta o porcentual del valor del trabajo en el proceso	De acuerdo con meta anual	Semestral	En comparación con antes de introducir TPM

Indicadores de calidad y ahorro de energía

En las industrias, hay que considerar a los indicadores de calidad y ahorro de energía como indicadores claves, ya que están directamente relacionados con los costos de producción. Tres de los indicadores de calidad más importantes son el número y valor de las reclamaciones de garantías, y el rendimiento global. Por otra parte, además de las mediciones de consumos (electricidad, vapor, agua, etc.), otros indicadores clave del ahorro de energía incluyen los que estimulan activamente modificaciones del proceso y mejoras similares (Morales, 2004).

La Tabla 2. 2 muestra indicadores de calidad y la Tabla 2. 3 muestra indicadores de ahorro de energía.

Tabla 2. 2 Indicadores de calidad (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Tasa de defectos de proceso	$\frac{RC + OS + deshecho}{Volumen\ de\ producción}$	1/10 o menos	Mensual	RC= tasa de generación de productos reciclados. OS= productos fuera de especificación
Costo de defectos de proceso	Costo total de pérdidas generadas por cada tipo de producto.	Minimizar	Mensual	Costos de reciclaje, pérdidas de degradación de productos y valor de costos deshechos
Número de defectos pasados sin detectar	Número de defectos pasados al proceso siguiente.	0	Mensual	Errores de muestreo, errores de inspección intermedia, etc.
Número de reclamaciones de garantía	Número de reclamaciones de clientes.	0	Mensual	
Valor de reclamaciones de garantía	Valor de las reclamaciones para cada tipo de producto.	Minimizar	Mensual	Valor actual de reclamaciones de garantía
Rendimiento global	$\frac{Total\ de\ producto\ expedido\ (\$)}{Total\ materias\ primas\ utilizadas\ (\$)}$	Maximizar	Mensual	Rendimiento global de cada tipo de producto

Tabla 2. 3 Indicadores de ahorro de energía (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Consumo de electricidad	Tendencia de consumo de electricidad (KWH).	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Incluida energía comprada y generada últimamente-
Consumo de vapor	Tendencia de consumo de vapor.	De acuerdo con metas anuales	Mensual	
Consumo d combustible	Consumo de petróleo, gas natural, etc.	De acuerdo con metas anuales	Mensual	
Consumo de agua	Tendencia de consumo de agua.	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Incluida agua fresca (potables), reciclada y tratada.
Consumo de lubricantes y fluidos	Consumo de lubricantes y fluidos hidráulicos.	De acuerdo con metas anuales	Mensual	

Indicadores de mantenimiento

De acuerdo con Morales (2004), se deben evaluar dos aspectos del mantenimiento. Primero, se evalúan las mejoras en la fiabilidad y conservación del equipo y se comprueba cómo ayudan a elevar la eficacia de la planta y la calidad del producto (Tabla 2. 4). En segundo lugar, se evalúa la eficacia del trabajo de mantenimiento (

Tabla 2. 5). En la Tabla 2. 6 se muestran ejemplos de costos de mantenimiento.

Tabla 2. 4 Indicadores de mantenimiento: Fiabilidad y mantenibilidad (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Frecuencia de fallos	$\frac{\text{Número total de paradas por fallos}}{\text{Tiempo de carga}}$		Mensual	Referido a las paradas de 10 minutos o más
Tasa de gravedad de fallos	$\frac{\text{Tiempo total de paradas por fallos}}{\text{Tiempo de carga}} \times 100$	0.15% o menos	Mensual	Mantener el tiempo total de paradas dentro de 1 hr/mes
Tasa de mantenimiento de emergencia	$\frac{\text{Número de trabajos de EM}}{\text{Número total de trabajos PM y EM}} \times 100$	0.5% o menos	Mensual	PM: Mantenimiento preventivo. EM: Mantenimiento de emergencia
Costos de paradas debidas a fallos	Tiempo de paradas x costo por unidad de tiempo	Minimizar	Mensual	Incluido la producción perdida, costos de energía y de horas perdidas de personal

Tabla 2. 5 Indicadores de mantenimiento: Eficiencia del mantenimiento (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Reducción en el número de paradas para mantenimiento (SMD)	$\frac{SMD \text{ previo}}{SMD \text{ actual}}$	De acuerdo con metas anuales	Anual	La meta es ampliar el número de días de producción continua.
Tasa de logros de PM	$\frac{Tareas \text{ PM terminadas}}{Tareas \text{ PM planificadas}} \times 100$	90% o más	Mensual	Indica el nivel de la planificación del mantenimiento
Tasa de reducción de personal de mantenimiento	Tendencia en la reducción del número de personas de mantenimiento	De acuerdo con metas anuales	Anual	

Tabla 2. 6 Indicadores de mantenimiento: Costos del mantenimiento (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Tasa de costos de mantenimiento	$\frac{Costo \text{ total del mantenimiento}}{Costos \text{ totales de producción}} \times 100$	De acuerdo con metas anuales	Semestral	Indica la proporción de los costos de mantenimiento sobre el costo total
Tasa de reducción de costos de mantenimiento	Tendencia en la reducción en los costos de mantenimiento	De acuerdo con metas anuales	Semestral	Comparación con la situación anterior a la introducción de TPM
Costos de reparación de fallos inesperados	Tendencias en los costos de reparación de fallos inesperados	De acuerdo con metas anuales	Semestral	Comparación con la situación anterior a la introducción de TPM
Tasa de costos globales de mantenimiento	$\frac{Costos \text{ totales de mantenimiento} + \text{pérdidas por paradas}}{Costos \text{ totales de producción}} \times 100$	De acuerdo con metas anuales	Semestral	Comparación con la situación anterior a la introducción de TPM

Indicadores de salud, seguridad y entorno

En cada planta, los directivos y supervisores asumen la responsabilidad de la salud, la seguridad y el entorno. Generalmente, el “Comité de Seguridad” organiza equipos que recorren las instalaciones para descubrir posibles problemas o causas de accidentes. Pese a lo anterior, es difícil conseguir que, durante largos períodos de tiempo, no se produzcan accidentes ni contaminación. Para dar solución a esta situación, se deben desarrollar medidas que impidan la repetición de accidentes y desastres. Además, se deben analizar las razones de los fallos y omisiones, y establecer métodos de seguridad (Morales, 2004). La Tabla 2. 7 lista algunos indicadores típicos de la seguridad, salud y entorno.

Tabla 2. 7 Indicadores de salud, seguridad y entorno (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Frecuencia de accidentes	$\frac{\text{Número de accidentes}}{\text{Horas de trabajo totales}}$	0	Anual	Número de accidentes por total de horas trabajadas
Tasa de gravedad de accidentes	$\frac{\text{Días perdidos por accidentes}}{\text{Horas totales de trabajo}}$	0	Anual	Número de días de trabajo perdidos por accidentes por horas de trabajo
Número de accidentes con pérdidas de días de trabajo	Número actual	0	Anual	Mantener por debajo de la media de la industria
Número de accidentes sin pérdidas de días de trabajo	Número actual	0	Anual	Mantener por debajo de la media de la industria
Número de accidentes de planta	Número actual	0	Anual	Fuego, explosiones, etc.

Indicadores de entrenamiento y clima laboral

A través de la formación y la práctica directa, el TPM intenta revolucionar al personal y desarrollar empleados altamente motivados, capacitados, y con seguridad en sí mismos, que conocen íntimamente sus equipos y procesos. Esto hace particularmente importante la evaluación de la formación y el clima laboral (Morales, 2004). La Tabla 2. 8 ilustra algunos indicadores típicos para esta finalidad.

Tabla 2. 8 Indicadores de formación y clima laboral (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
No. de reuniones o tiempo invertido en actividades de pequeños grupos	Números actuales	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Calcular el total de pequeños grupos que se ocultan en cada nivel de la organización
No. de temas registrados de mejoras focalizadas	Número registrado para cada tipo de pérdidas	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Empezar atacando los tipos de pérdidas que rendirán los mayores beneficios tangibles
Costos ahorrados debido a mejoras focalizadas	Costos totales ahorrados con mejoras enfocadas	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Costos totales ahorrados debido a mejoras enfocadas de equipos de proyecto, organización permanente y pequeños grupos
No. de sugerencias de mejora	Números actuales	De acuerdo con metas anuales	Mensual	Como mínimo 100 por año u 8 por mes

Indicadores de eficacia del equipo

El macro indicador de la eficacia global del equipo se compone de tres subindicadores: disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad.

De forma general, es difícil medir la mejora lograda con el TPM evaluando un proceso global, especialmente si éste es continuo y se compone de muchos subprocesos. En tal caso, el proceso global se divide en subprocesos y se evalúa el rendimiento de cada uno de ellos. Como indicador de importancia particular se selecciona el de eficacia global del peor subproceso. Además, se mide y evalúa la eficacia de los elementos de equipos clave de los más importantes subprocesos. Adicionalmente, se mide el número de fallos de proceso y planta y se emplean estas mediciones como referencia para la mejora (Morales, 2004). La Tabla 2. 9 muestra ejemplos de estos indicadores y sus métodos de cálculo.

Tabla 2. 9 Indicadores de eficacia de la planta (Morales, 2004).

Indicador	Fórmula	Objetivo	Intervalo	Observaciones
Disponibilidad	$\frac{\text{Tiempo de operación} - \text{Tiempo perdidos}}{\text{Tiempo de operación}} \times 100$	90% o más	Cada 6 meses	
Tasa de rendimiento	$\frac{\text{Tasa media actual de producción}}{\text{Tasa de producción estándar}} \times 100$	95% o más	Cada 6 meses	Indica el rendimiento de la planta
Tasa de calidad	$\frac{\text{Volumen de producción} - \text{defectos} - \text{reprocesos}}{\text{Volumen de producción}} \times 100$	99% o más	Cada mes	Tasa para el conjunto del proceso
Eficacia global de planta	Disponibilidad x Tasa de rendimiento x Tasa de calidad	80- 90%	Cada 6 meses	Indicador de la Eficacia global del proceso
Eficacia global del subproceso	Igual al anterior	80- 90%	Cada 6 meses	Eficacia global de subproceso cuello de botella
Eficacia global de equipos	Igual al anterior	85- 95%	Cada 6 meses	Eficacia global de unidades de equipos
Tasa de producción estándar	$\frac{\text{Volumen estándar de producción}}{\text{Tiempo de operación}}$	---	Cada año	Capacidad estándar (nominal) de la planta
Tasa de producción actual	$\frac{\text{Volumen de producción actual}}{\text{Tiempo de operación}}$	Valor actual	Mensual	Producción real por unidad de tiempo

2.2 Mapa de la cadena de valor (VSM)

El mapa de la cadena de valor (VSM, por sus siglas en inglés de *Value Stream Mapping*), es una herramienta basada en la versión *Lean Manufacturing* de Toyota. El VSM es una representación gráfica de un proceso o sistema de producción que muestra la secuencia de las actividades, los movimientos y el flujo de información y de material. Esta herramienta proporciona una visión general de un proceso, que frecuentemente va de un proveedor externo hasta un cliente externo (Lee y Snyder, 2006).

2.2.1 Generalidades de VSM

El mapa de la cadena de valor (VSM) es una herramienta que sirve para entender un proceso e identificar los desperdicios que se encuentran en ellos. El uso de esta herramienta consiste en dibujar un mapa o diagrama que muestra los materiales, información y los procesos que fluyen desde el proveedor hasta el cliente. En el mapeo se muestra la secuencia de los aspectos que el cliente considera valioso en la obtención del producto o servicio que está dispuesto a pagar. Con ello se pueden detectar áreas de oportunidad y así dirigir los esfuerzos para aplicar mejoras y así optimizar el funcionamiento de algún sistema generador de productos o servicios (Cabrera Calva, 2014).

Los beneficios de la aplicación de la herramienta del mapa de la cadena de valor (VSM) son los siguientes (Madariaga, 2013):

- Permite observar el flujo del proceso a analizar a lo largo de la corriente de valor.
- Ayuda a identificar las actividades que agregan valor al producto las cuales son importantes para el cliente.
- Permite encontrar las actividades que no agregan valor, pero son necesarias para el producto y las que simplemente no agregan valor al mismo.
- Crea un amplio panorama sobre la filosofía *lean manufacturing* sobre el sistema, al enfocarse en la eliminación o reducción de desperdicios.
- Ayuda a tener una visión general del funcionamiento de la fábrica, sistema o proceso.

- Puede ser tan detallado como el investigador lo requiera. No se limita a un simple proceso. Puede ser aplicado a una actividad, un proceso, a una línea de producción, a una fábrica o incluso a la interacción entre proveedor, fabricante y cliente.

Es importante recalcar que el uso del VSM tiene un mejor enfoque en sistemas donde existen algunos factores a considerar. Esto se puede deber a que la primera implementación del VSM se realizó en la industria automotriz; sin embargo, el proceso de mapeo, combinado con otras herramientas de análisis, puede ser una gran opción (Lee y Snyder, 2006).

La consideración de factores conduce a la correcta aplicación del VSM. Si no se considera de esta manera, cada factor contribuirá a que el VSM no proporcione la información que el investigador necesita. La Tabla 2. 10 muestra algunos factores en los que el VSM se puede o no aplicar con buenos resultados.

El impacto que tiene cada factor para el VSM, si no se contempla de manera correcta, se presenta a continuación (Lee y Snyder, 2006):

Volumen: El bajo volumen de producción puede no perjudicar la aplicación del VSM. Sin embargo, el volumen bajo de producción se asocia con la demanda errática, rutas de trabajo complejas y maquinaria compartida como en un taller de trabajo (*jobshop*). Estos aspectos frecuentemente son problemas para el VSM.

Tabla 2. 10 Factores a considerar para la aplicación del VSM (Lee y Snyder, 2006).

Aplicación del VSM		
Factores	Aplicación	Puede no aplicar
Volumen	Alto volumen	Bajo volumen puede ser problemático
Variedad	Baja variedad	Alta variedad
Equipo	Equipo dedicado	Múltiple equipo compartido
Rutas	Rutas sencillas	Rutas complejas
Componentes	Pocos	Muchas partes y subensambles
Estrategia	Sistema de producción Toyota (TPS)	Sin TPS y/o variantes de TPS

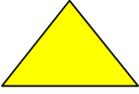
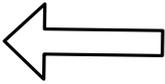
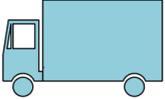
- **Variación:** Es importante considerar que los productos a estudiar no tengan una diferencia significativa para los procesos de manufactura. De no ser así, el VSM será extenso y complejo. En algunos casos, existe alta variedad desde la perspectiva del cliente por los métodos de manufactura, pero en la manufactura las diferencias son insignificantes. En esos casos el VSM trabaja de manera correcta.
- **Equipo:** El VSM trabaja correctamente cuando pocos productos comparten el uso de un equipo. Sin embargo, si docenas o cientos de partes son trabajadas por ese equipo y las partes tienen diferentes rutas de trabajo, lotes y patrones de demanda, entonces el VSM no mostrará la información que se necesita de forma clara.
- **Rutas:** Cuando los productos llegan al mismo equipo o procesos en la misma secuencia, el VSM es aplicado correctamente. Pero si existen muchas rutas, diferentes secuencias de trabajo y muchos patrones de demanda, será necesario un complejo análisis de tecnología de grupos.
- **Componentes:** El VSM será extendido, complejo y difícil de interpretar en el caso de que muchas partes y subensambles culminen en un producto final. De ser posible se deben agrupar las partes en un mismo flujo de proceso, de esta forma el VSM trabajará de manera correcta.
- **Estrategia:** El VSM está orientado a la versión Toyota de *Lean Manufacturing*. Puede haber situaciones donde no sea posible la aplicación de alguna herramienta o técnica de Toyota. Pero si cada industria usara al menos alguna de estas herramientas o técnicas, como es el caso del VSM, se pueden proporcionar soluciones subóptimas.

2.2.2 Símbolos de VSM

La simbología utilizada para realizar el VSM está clasificada en los procesos integrados, el material dentro del proceso, el flujo de información y otros denominados varios. Representa gráficamente todo el proceso y operaciones involucradas en el sistema a analizar. La implementación de ésta en el VSM, ayuda a obtener la información necesaria para tener el panorama general del sistema (Lee & Snyder, 2006). La simbología se divide en:

- Símbolos de materiales: Estos iconos representan el inventario, el flujo, el almacenamiento, transporte y requisición de material, se muestran en la Tabla 2. 11.

Tabla 2. 11 Símbolos de materiales (Lee y Snyder, 2006).

Símbolo	Representación	Descripción
	Inventario	Estos iconos muestran el inventario entre dos procesos. En el mapeo de estado presente, la cantidad de inventario puede ser aproximado por un conteo rápido y dicho inventario es anotado debajo de la figura
	Envíos	Este icono representa el movimiento de la materia prima desde el proveedor hasta el muelle de recepción o el movimiento de los productos terminados desde los muelles de embarque
	Flecha de empuje	Este icono representa el empuje de los materiales de un proceso al siguiente. El empuje se refiere a que un proceso produce algo independientemente de las necesidades inmediatas
	Flecha de jale	Este icono representa el jale de los materiales de un proceso anterior.
	Supermercado	Este es un supermercado de inventario (punto de acción <i>Kanban</i>). Regula la producción con base en la demanda existente
	Jale de material	Conecta los supermercados a un proceso más adelante. Por medio del icono <i>Pull</i> que indica remoción física
	Carril FIFO	Este icono representa a los procesos que están conectados con un sistema FIFO (Primero en entrar, primero en salir, por sus siglas en inglés) para limitar la entrada, por ejemplo, una banda transportadora
	Envíos externos	Este icono representa el transporte de material desde un proveedor hasta el almacenamiento de materia prima o el transporte de productos terminados desde el último proceso hasta el cliente

- Símbolos de proceso: Estos iconos representan a los equipos, grupos de trabajo, departamentos o proveedores y los clientes involucrados en el sistema, los cuales se muestran en la Tabla 2. 12.
- Símbolos de información: Estos iconos representan el flujo de información de producción, *Kanban*, e información manual y electrónica, los cuales se muestran en la Tabla 2. 13.

Tabla 2. 12 Símbolos de proceso (Lee y Snyder, 2006).

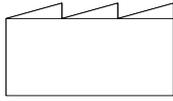
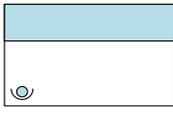
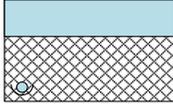
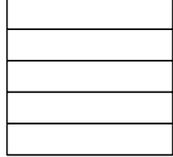
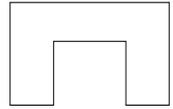
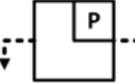
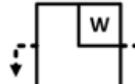
Símbolo	Representación	Descripción
	Cliente/ proveedor	Este icono representa al proveedor y al cliente que marca el punto de inicio y final del flujo de material.
	Proceso dedicado	Este icono es un proceso, operación, máquina o departamento a través del cual fluye el material.
	Proceso compartido	Este es un proceso, operación, departamento o centro de trabajo de una cadena de valor de familias compartidas.
	Caja de datos	Se coloca bajo las cajas de procesos. Muestra los datos necesarios para el análisis del sistema. La información que contienen frecuentemente son el tiempo de ciclo, tiempo de cambio, tiempo de configuración, número de operadores, capacidad disponible y tamaño de lote.
	Celda de trabajo	Este símbolo indica que los procesos múltiples están integrados en una celda de manufactura. Cada celda procesa un solo producto o familia limitada por productos similares.

Tabla 2. 13 Símbolos de información (Lee y Snyder, 2006).

Símbolo	Representación	Descripción
	Control de producción	Este icono representa la planificación central de producción o departamento de control de personal u operaciones.
	Información manual	Esta flecha muestra flujo el de información de memorándums, reportes o conversaciones.
	Información electrónica	Esta flecha representa el flujo de información mediante medios o dispositivos electrónicos como son, internet, correos electrónicos, fax, teléfono, etc.
	Kanban de producción	Este icono ordena la producción de un número determinado de partes.
	Kanban de transporte	Este icono representa una tarjeta o dispositivo que da la instrucción a un manipulador de material a mover partes de un estante a un proceso.
	Señal de Kanban	Este icono es usado siempre que el nivel de inventario entre dos procesos baje a un punto mínimo.
	Buzón Kanban	Este icono indica la localización donde una señal kanban espera a ser recogida. Frecuentemente usada con un sistema de dos cartas para intercambiar kanban de retirada y producción.

- Símbolos varios: Estos iconos representan oportunidades de mejora, operadores y líneas de tiempo que son invertidos para las operaciones del proceso, los cuales se muestran en la Tabla 2. 14.

Es importante mencionar que los símbolos mostrados en las Tablas 2.19 a 2.22, no son estandarizados y pueden ser modificados cuando así lo requiera el sistema productivo o proponer un nuevo icono cuando no exista una representación adecuada de la actividad que se desea representar (Lee y Snyder, 2006).

2.2.3 Metodología de VSM

El mapeo de la cadena de valor es una herramienta que representa de forma gráfica, el flujo de materiales y de información a lo largo del sistema de producción (corriente de valor), utilizando iconos específicos. La representación se enfoca en un producto o una familia de productos, donde se visualiza el flujo de la materia prima que es entregada por el proveedor, los procesos que contribuyen a la transformación del producto dentro de la fábrica y el producto terminado que es entregado al cliente.

Tabla 2. 14 Símbolos varios (Lee y Snyder, 2006).

Símbolo	Representación	Descripción
	Explosiones kaizen	Estos iconos son usados para destacar una necesidad de mejora y talleres de planeación Kaizen en procesos específicos que son fundamentales para lograr el VSM de estado futuro.
	Operador	Este icono representa a un operador. Un número que acompaña a este icono representa el número de operadores requeridos en el proceso del VSM en una estación de trabajo en específico.
	Otro	Otra información útil o potencialmente útil.
	Línea de tiempo	La línea de tiempo muestra el tiempo de valor agregado (tiempo de ciclo) y de tiempo que no agrega valor (esperas).

Para la elaboración del VSM diversos autores coinciden en las etapas de selección del producto o familia de productos, elaboración de VSM actual, VSM futuro y la implementación de mejoras. En la Figura 2. 1 se describe la metodología de 6 etapas que propone Cabrera Calva (2011).

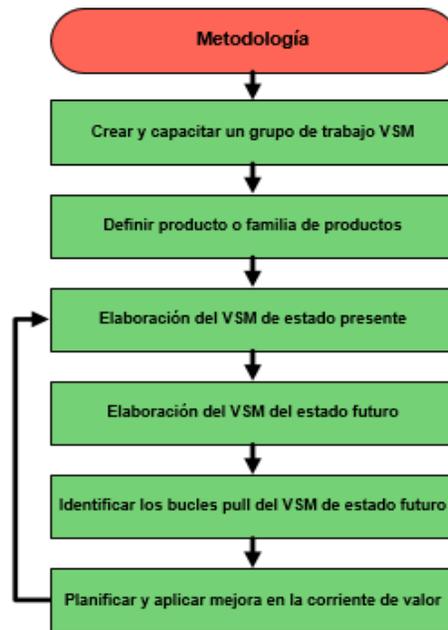


Figura 2. 1 Metodología para el desarrollo de VSM (Cabrera Calva, 2011).

2.2.3.1 Crear y capacitar un grupo de trabajo VSM

La primera etapa del VSM es crear y capacitar a un grupo de trabajo, para esto, se deben realizar los siguientes pasos (Cabrera Calva, 2011):

1. Seleccionar a un grupo entre 3 y 5 personas que conozcan el proceso que se va a mapear. Estas personas deben tener una actitud positiva al cambio y de mente abierta.
2. Seleccionar a un líder para que coordine las actividades y que sea capaz de mantener al equipo enfocado en lograr los resultados.
3. Realizar una capacitación al grupo de trabajo en cuanto a los siguientes aspectos:
 - a. Conocer los diferentes tipos de desperdicios.
 - b. Saber diferenciar claramente los tipos de actividades desde la perspectiva del cliente (actividades que agregan valor y las que no agregan valor al producto).

- c. Entender el pensamiento *Lean* y la revisión general simplificada.
 - d. Saber cómo clasificar y seleccionar familias de productos.
4. Realizar recorridos varias veces a lo largo de toda la cadena de valor que será mapeada, de principio a fin, viendo todos los detalles del proceso incluyendo posibles errores en las operaciones.

2.2.3.2 Definir el producto o familia de productos

La siguiente etapa es la definición de la familia del producto, para esto se deben realizar los siguientes pasos (Cabrera Calva, 2011):

1. Seleccionar uno de los criterios que se pueden utilizar para agrupar familias de productos cuando existe una gran variedad de éstos. En caso de ser necesario, si es requerida una selección más compleja para definir las familias de productos, el autor Cabrera Calva (2011) propone los criterios de la Tabla 2. 15 para establecer una familia de productos.

Tabla 2. 15 Criterios para establecer macro familia (Cabrera Calva, 2011).

Criterio por identificar	Macro familias de productos	Ejemplo
Tipo de producto	Cada familia la conforman productos del mismo tipo o función.	Motores y generadores. Testamentos/ escrituras/ donaciones
Mercado	Geográfico, o tipo de cliente: final, distribuidor, etc.	PEMEX, COPETROL, PETROVEN, ETC. UE, USA, Seguros de vida/ autos/ gastos médicos.
Clientes	Familia de productos que se venden a uno o varios clientes.	Una familia para dos clientes dominantes, el resto de los productos constituyen una tercera familia.
Grado de contacto con el cliente	Agrupar productos por el grado de influencia del cliente en el producto final.	Consulta externa y quirúrgica. Ambulatoria/ Análisis sangre/ Rayos X/ Mamografías/ Farmacia/ <i>Chech up</i> .
Volumen de ventas	Agrupar grupos con similar volumen de ventas.	Alto volumen, bajo volumen, venta directa, por catálogo y corporativo.
Patrones de pedido	Agrupar productos con base en los diferentes patrones de recibir pedidos.	Comida a la carta, buffet; comidas/ Cenas. Series largas y repetitivas, por un lado, series cortas e irregulares por otras.
Base competitiva	Agrupar productos con base en sus argumentos de venta.	Bajo costo y rápida entrega, por otro los de productos personalizados.
Tipo de proceso	Productos con similares procesos en la misma familia	Todos los que requieren montaje, por un lado, todos los que no requieren montaje por otro.
Características de productos	Productos con similares características físicas.	Grandes contra pequeños, ligeros contra pesados, etc.

2. Realizar la matriz que propone Cabrera Calva (2011) la cual se basa en identificar los productos que contribuyen en la utilidad y los que tienen problemas con los clientes. Por medio de la identificación de la matriz de Cabrera se definen los productos “estrella”, “magia”, “abeja” y “a desaparecer”. La Figura 2. 2 muestra la matriz de cómo se clasifican los productos identificados. Normalmente los productos “estrella” tienen poco por mejorar, pero conviene hacerlo con ellos como segunda opción. Los productos “abeja” y “a desaparecer”, son familias a las que no se le debe invertir mucho capital, ya que la contribución en los beneficios económicos no es mucho.
3. Realizar un diagrama de Pareto donde el 20% de los tipos de procesos manejan el 80% de los productos o el 20% de los clientes consumen el 80% de un producto.

2.2.3.3 Elaboración del VSM de estado presente

El mapa de estado presente muestra como los procesos de trabajo funcionan actualmente en el sistema o en la empresa. La mayoría de los autores coinciden en que la realización del VSM de estado presente debe seguir una serie de pasos sistemáticos para desarrollarlo de manera correcta. Los pasos para la elaboración del VSM de estado presente son los siguientes (Lee y Snyder, 2006):

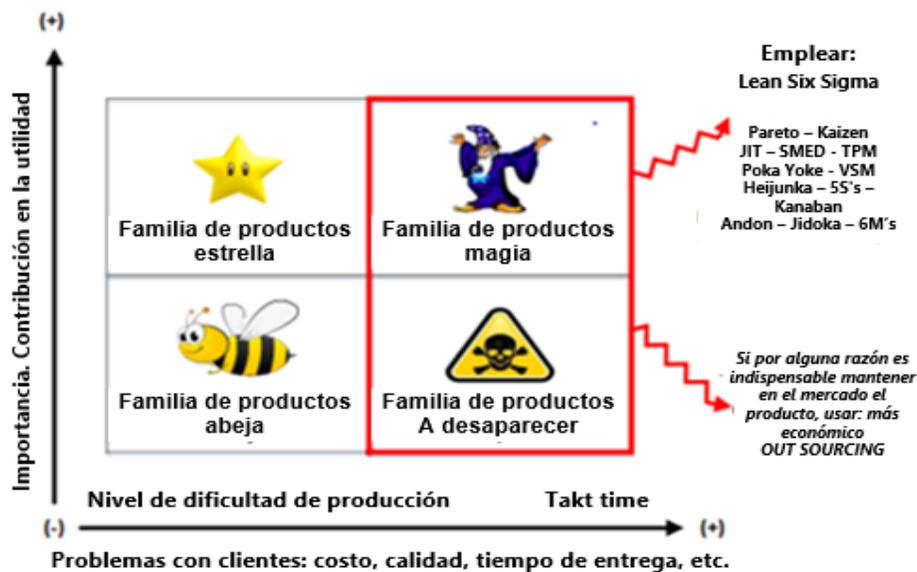


Figura 2. 2 Matriz para la priorización de producto (Cabrera Calva, 2011).

1. Dibujar los iconos del cliente, proveedor y el control de producción (Figura 2. 3).
2. Introducir las necesidades del cliente por mes y por día. Si el cliente realiza compras en lotes infrecuentes, entonces se debe tener en cuenta la frecuencia y el tamaño del lote (Figura 2. 3).
3. Calcular los requisitos de envase y producción diaria. La producción debe corresponder a las necesidades del cliente. Cuando los contenedores tienen múltiples piezas, entonces se debe calcular el número de contenedores requeridos (Figura 2. 3).
4. Dibujar el icono de envío a los clientes y camiones con frecuencia de entrega, ya sean cargas completas, parciales o mixtas (Figura 2. 3).
5. Dibujar el icono de envío entrante, camiones y frecuencia de entrega, ya sean cargas completas, parciales o mixtas (Figura 2. 3).
6. Dibujar cajas para cada proceso en secuencia, de izquierda a derecha (Figura 2. 3).
7. Añadir los cuadros de datos por debajo de las cajas de proceso y cronograma de calor agregado y sin valor agregado (Figura 2. 3).

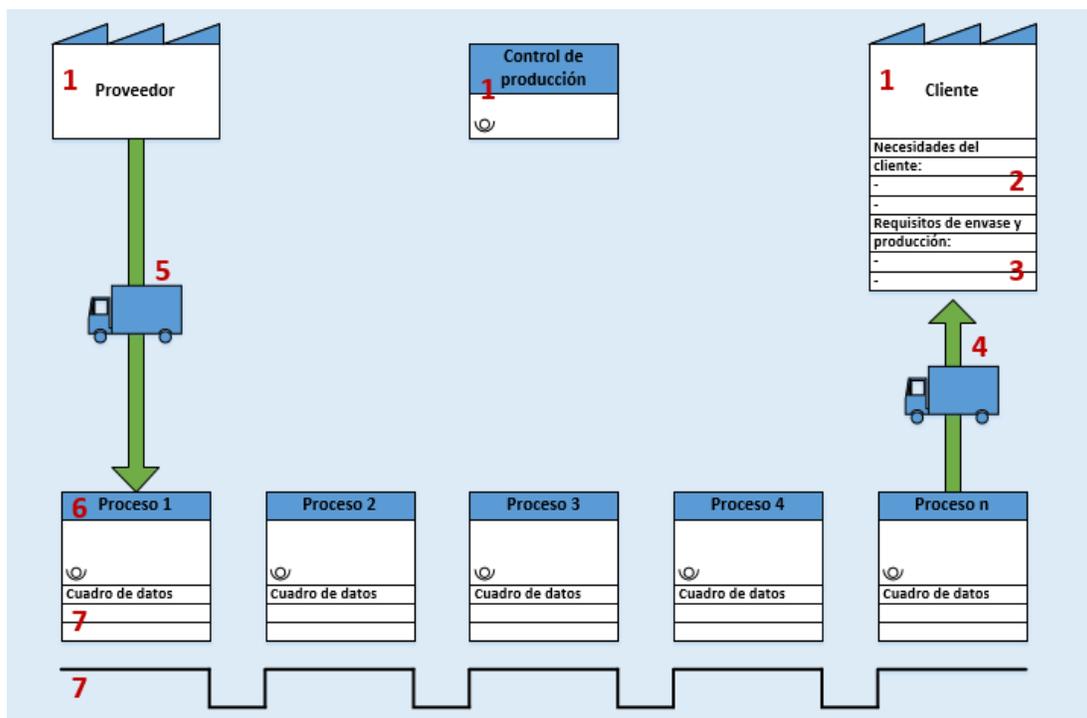


Figura 2. 3 Proceso de elaboración de VSM, estado presente (pasos 1-7), modificado de Lee y Snyder (2006).

8. Añadir las flechas, métodos de comunicación y frecuencias. Esto puede requerir una considerable investigación (Figura 2. 4).
9. Obtener los atributos del proceso y agregarlos a cuadros de datos (Figura 2. 4).
10. Agregar los símbolos de operaciones y números (Figura 2. 4).
11. Agregar las ubicaciones de inventario y niveles en las unidades de producción (Figura 2. 4).
12. Agregar las características del flujo de proceso; empujar, tirar, iconos FIFO (Figura 2. 4).
13. Añadir cualquier otra información que pueda resultar útil (Figura 2. 4).
14. Añadir las horas de trabajo. Utilizar las horas netas disponibles planificadas o programadas para la fábrica o departamento (Figura 2. 4).
15. Calcular los plazos de entrega y situarlos en la línea de tiempo. Para los procesos, el tiempo de espera y el tiempo de ciclo. Para los transportes, el tiempo requerido para el transporte (Figura 2. 4).
16. Calcular el tiempo de ciclo total y plazo de ejecución. Para esto se debe sumar el total de los tiempos de valor agregado y de no valor agregado de la línea de tiempo y colocarlo en un cuadro de información al final de la línea de tiempo (Figura 2. 4).

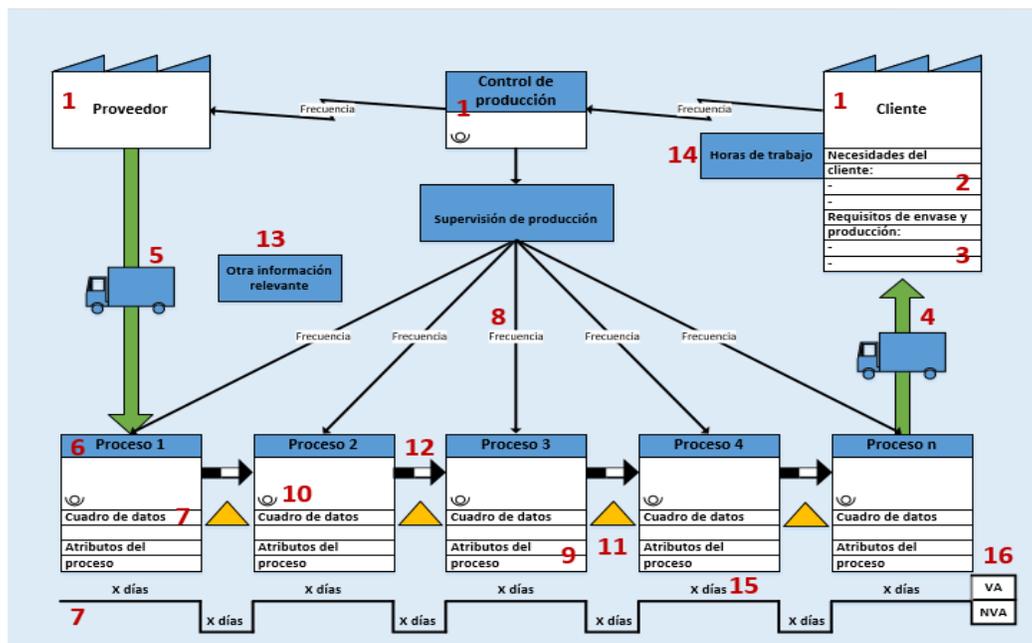


Figura 2. 4 Proceso de elaboración de VSM, estado presente (pasos 8-16), modificado de Lee y Snyder (2006).

2.2.3.4 Elaboración del VSM de estado futuro

La elaboración de un VSM, estado futuro, requiere de un análisis detallado del VSM, estado presente, y del conocimiento de los principios y herramientas de *Lean Manufacturing*, puesto que representa las oportunidades de mejora del sistema, es decir, como debería ser el sistema considerando estrategias de optimización.

Es importante tener en cuenta que un VSM de estado futuro está sujeto a cambios a medida que progresa el trabajo, ya que no es un diseño definitivo y una idea de mejora puede dar origen a nuevas ideas para la optimización del sistema.

Lee y Snyder (2006), proponen los siguientes nueve pasos para la elaboración de un VSM futuro, los cuales se pueden observar en la Figura 2. 5:

1. Revisar el VSM, estado presente. Esta revisión debe responder a las siguientes tres preguntas:
 - a. ¿El VSM, estado presente, es correcto?
 - b. ¿Todo el equipo logra entender el mapa y sus detalles?
 - c. ¿Dónde se encuentran las principales áreas de oportunidad?

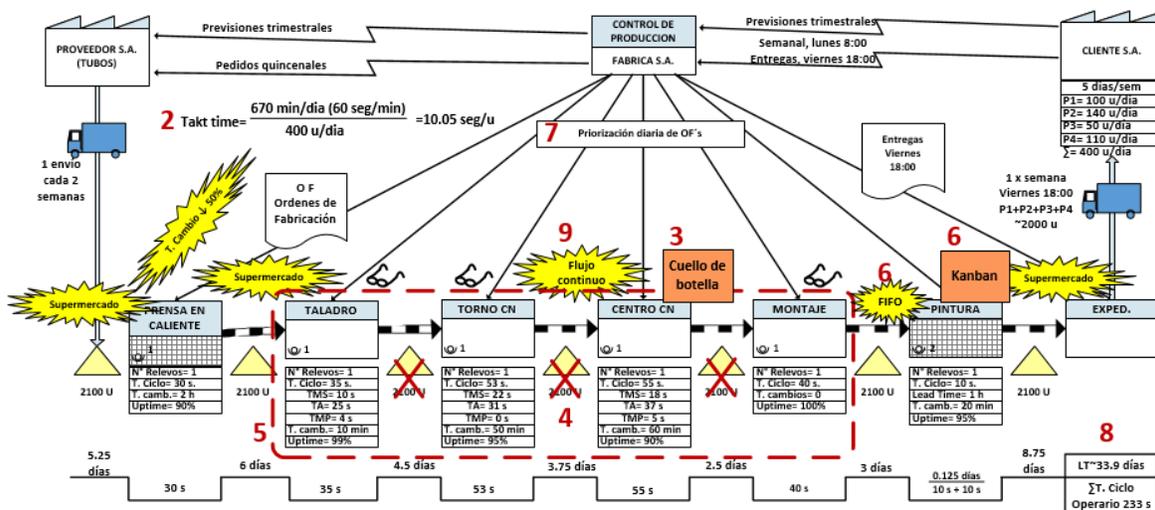


Figura 2. 5 Proceso de elaboración de VSM de estado futuro, modificado de Madariaga (2013).

La tercera pregunta es muy importante ya que tiene la finalidad de identificar las principales oportunidades de mejora. Estas áreas de oportunidad pueden estar ligadas con los siguientes problemas:

- Grandes volúmenes de inventario.
 - Distancias grandes para el transporte de materiales.
 - Largos periodos de preparación.
 - Problemas de calidad.
 - Menor disponibilidad por averías.
 - Retrasos.
2. Calcular el tiempo *Takt*. Este tiempo está basado en la demanda del cliente y su finalidad es identificar si existe incapacidad en el proceso de fabricación mediante comparación. Es decir, si cualquier tiempo de proceso es más largo que el tiempo de procesamiento requerido entonces existe un problema de capacidad. Algunas de las posibilidades para resolverlo son:
 - a. Acelerar el proceso mediante estrategias de mejora.
 - b. Invertir en mejores equipos o contratar más personas.
 - c. Eliminar el proceso.
 3. Identificar el proceso cuello de botella. Éste puede ser identificado con el tiempo de ciclo más largo.
 4. Identificar los tamaños de los lotes. El tamaño de los lotes debe estar en función de los costos de instalación y de almacenamiento. Trabajar con lotes pequeños reduce el inventario, permite la aplicación de *Kanban* y puede aumentar la capacidad y flexibilidad del proceso.
 5. Identificar las posibles celdas de trabajo y determinar si es factible, o no, de acuerdo con el proceso y las posibilidades económicas.
 6. Identificar las ubicaciones para *Kanban*, *Broadcast* y FIFO.
 7. Establecer los métodos de programación de la producción.
 8. Calcular los tiempos de entrega y tiempos de ciclo. El tiempo de entrega proviene de la suma de todos los tiempos de la línea de tiempo y el tiempo total de ciclo proviene de la suma de los totales de todas las cajas de proceso (VA y VNA).
 9. Añadir los iconos que indican las áreas con oportunidades de mejora a futuro.

Las mejoras planteadas en el VSM de estado presente se incorporarán mediante su símbolo correspondiente, en el mapa del estado futuro, tal y como se muestra en la Figura 2. 6.

2.2.3.5 Identificar los bucles pull del VSM de estado futuro

El mapa del estado futuro se completa añadiendo las ideas de mejora e identificando los bucles pull (Madariaga, 2013). En la Figura 2. 7 se muestran los bucles pull con líneas punteadas color verde, rojo y azul.

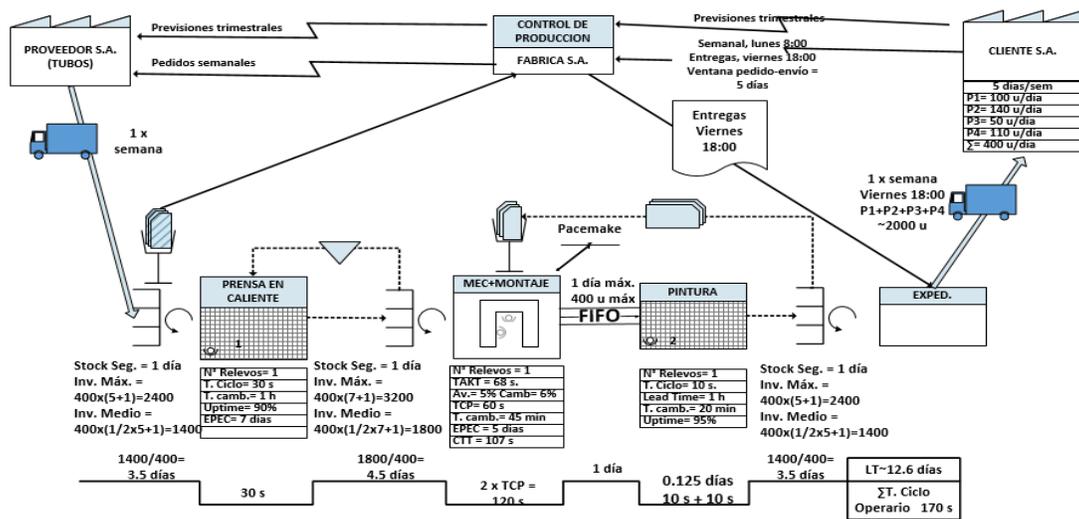


Figura 2. 6 VSM del estado futuro (Madariaga, 2013).

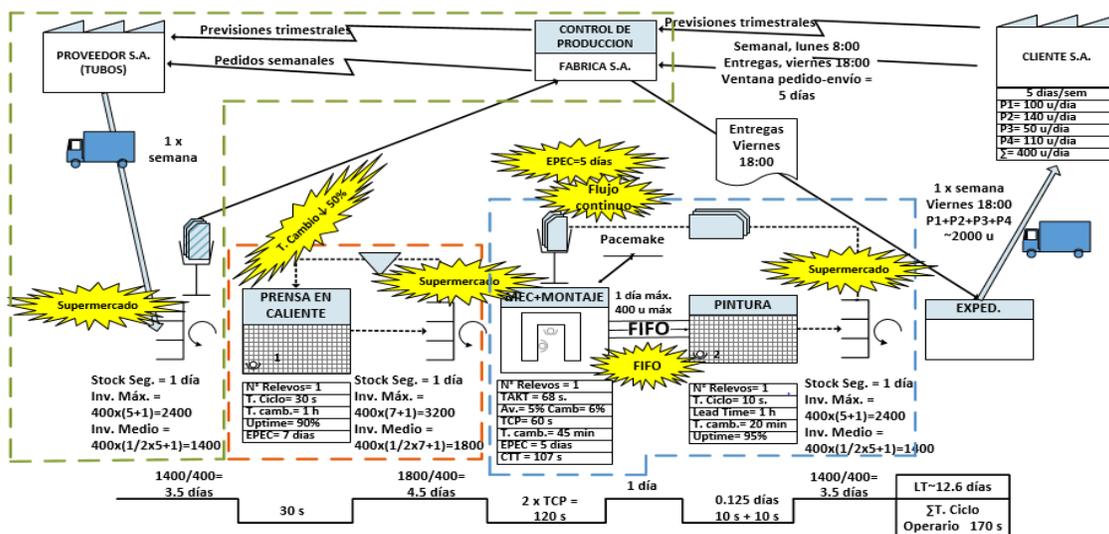


Figura 2. 7 VSM del estado futuro con bucles pull e ideas de mejora (Madariaga, 2013).

2.2.3.6 Planificar y aplicar mejora en la corriente de valor

A medida que se avance con la implantación de las ideas de mejora podrán surgir nuevos *inputs*, oportunidades y nuevas ideas que se deben tener en cuenta para actualizar el mapa de la situación futura y el plan de mejora de la corriente de valor.

El VSM es una metodología de alto nivel que debe ser aplicada sobre cada una de las familias de productos o corrientes de valor, para construir la visión industrial hacia la que debe encaminarse la fábrica. Además, es apropiada para definir el camino y los hitos para la implantación de *lean manufacturing* en la fábrica. Es una opción mucho más lógica y coherente que la de elegir una herramienta o técnica concreta de *lean manufacturing* y comenzar a implantarla a lo largo y ancho de toda la fábrica. La metodología sirve como guía para seguir los pasos de la mejora continua para implementar *lean manufacturing* en la corriente de valor (Madariaga, 2013).

Cada hito o idea de mejora pretende un nuevo nivel de eficiencia, un nuevo estándar, e implica nuevos métodos. Un equipo de mejora, específico para cada caso, aplicará el conocido ciclo PDCA (por sus siglas en inglés de *Plan, Do, Check and Act*), como se observa en la Figura 2. 8. El ciclo CAPD consta de cuatro fases (Madariaga, 2013):

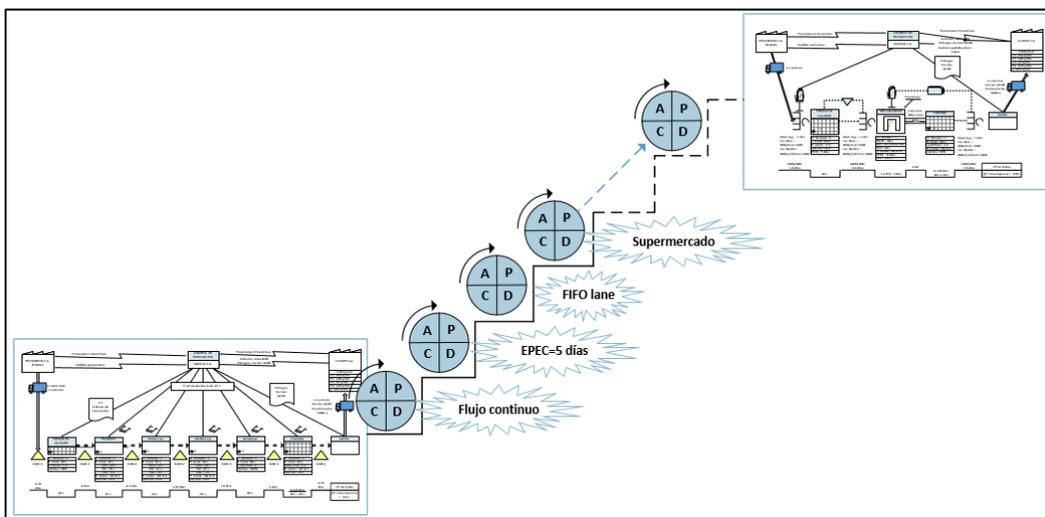


Figura 2. 8 Mejora en la corriente de valor (Madariaga, 2013).

- **Planificar (*Plan*).** Comprender el estado actual del proceso, en función de la naturaleza de la mejora. Para esto se pueden utilizar, entre otras, las siguientes herramientas:
 - Cálculo del OEE y desglose de las pérdidas en un equipo o máquina.
 - Tabla de observación de tiempos.
 - Hoja de trabajo estándar.
 - Diagrama de trabajo estándar.
 - Tabla de capacidad del proceso.
 - Gráfico de equilibrado de operarios.
 - Formato SMED para analizar el cambio de referencia.

Se define el objetivo de la mejora, se identifican los factores que pueden contribuir a la mejora, se determinan las acciones necesarias para alcanzar la mejora y, por último, se evalúan las acciones según su dificultad, costo de implantación y su impacto en la seguridad, calidad, servicio y productividad.

- **Ejecutar el plan (*Do*).** Se realizan las acciones para lograr la mejora.
- **Evaluar los resultados (*Check*).** Se evalúan las acciones realizadas.
- **Actuar en función de los resultados (*Act*).** Se debe actualizar la documentación y estandarizar el nuevo método. Si no se ha obtenido el resultado esperado, se repetirá el ciclo de mejora analizando de nuevo la situación actual.

2.3 Herramientas de calidad

Tradicionalmente se dice que son siete herramientas básicas de la calidad, lo cual proviene de la tradición japonesa que dice que el samurái (guerrero japonés) usaba siete herramientas o armas en su actividad militar. Inspirado en su tradición, el Dr. Kaoru Ishikawa estableció las siete herramientas de la básicas (seis estadísticas y una, su diagrama de causa-efecto, de análisis, básicamente).

Las herramientas pretenden auxiliar en la recopilación y el análisis de datos para tomar decisiones con base en ellos y así resolver la mayoría de los problemas en las áreas productivas. Esto no significa que cada problema requiera del uso de las siete herramientas a la vez; dos o tres pueden ser suficientes (Garza, 2008).

Las siete herramientas básicas son (Camisón et al., 2006):

1. Diagrama de pescado (o de Ishikawa).
2. Diagrama de Pareto.
3. Hojas de verificación y/o recopilación de datos.
4. Histograma.
5. Estratificación.
6. Diagrama de dispersión.
7. Gráficas de control.

En las secciones siguientes, para la identificación de las principales causas que afectan la pérdida por paradas, de velocidad y de calidad, en este trabajo se emplearon sólo dos herramientas: diagrama de Pareto y diagrama causa-efecto.

2.3.1 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una herramienta de representación gráfica que identifica los problemas más importantes, en función de su frecuencia de ocurrencia o coste (dinero, tiempo), y permite establecer las prioridades de intervención. En definitiva, es un tipo de distribución de frecuencias que se basa en el principio de Pareto, a menudo denominado regla 80/20 (Camisón et al., 2006)

El diagrama de Pareto (Principio de Pareto), destacado por Wilfredo Pareto (1848-1923) teniendo como base una observación de la distribución de las riquezas en Italia (20 % de la población posee 80 % de las riquezas), ha sido, desde entonces, generalizado en el mundo de las empresas. De esta manera se encuentran muy frecuentemente los ejemplos siguientes (Kume, 1992):

- El 20 % de los artículos generan el 80 % de la cifra de venta.
- El 20 % de las familias de producto representan el 80 % de las existencias.
- El 20 % de los proveedores representan el 80 % del volumen de compra.

La utilización del diagrama de Pareto permite visualizar problemas de calidad que se presentan como pérdidas (productos defectuosos y su costo). La mayoría de las pérdidas se deberán a unos pocos tipos de defectos, y estos defectos pueden atribuirse a un número muy pequeño de causas.

El objetivo del diagrama de Pareto es utilizar los hechos para identificar la máxima concentración de potencial del efecto en estudio (magnitud del problema, costes, ventas, tiempo, etc.) en el número mínimo de elementos que a él contribuyen. Con este análisis se busca enfocar los esfuerzos en las contribuciones más importantes, con objeto de optimizar el beneficio obtenido del mismo.

De acuerdo con Kume (1992) es muy importante aclarar el patrón de la distribución de la pérdida. La mayoría de las pérdidas se deberán a unos pocos tipos de defectos y éstos pueden atribuirse a un número muy pequeño de causas. Si se identifican las causas de estos pocos defectos vitales, se pueden eliminar casi todas las pérdidas, concentrándose en esas causas particulares y dejando de lado por el momento los muchos defectos triviales. El uso del diagrama de Pareto permite solucionar este tipo de problema con eficiencia.

El análisis de Pareto permite mostrar gráficamente el principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales), es decir, que hay muchos problemas sin importancia frente a unos pocos graves. En un diagrama de Pareto se colocan los "pocos vitales" a la izquierda y los "muchos triviales" a la derecha. El diagrama de Pareto es un análisis gráfico para organizar datos de forma que éstos queden en orden descendente, de izquierda a derecha y separados por barras. Permite, pues, asignar un orden de prioridades (Kume, 1992).

Si se identifican las causas de estos pocos defectos vitales, se pueden eliminar todas las pérdidas, concentrándose en estas causas particulares y dejando de lado muchos defectos triviales. Existen dos tipos de diagramas de Pareto (Kume, 1992):

- Diagrama de Pareto de fenómenos. En el diagrama de Pareto de fenómenos se relacionan los resultados indeseables como los que se presentan a continuación y se utiliza para averiguar cuál es el mayor problema.
 - Calidad.
 - Costo.
 - Entrega.
 - Seguridad.
- Diagrama de Pareto de causas. En el diagrama de Pareto de causas se relacionan los resultados indeseables, como los que se presentan a continuación, y se utilizan para averiguar cuál es el principal problema.
 - Operario.
 - Máquina.
 - Materia Prima.
 - Método operacional.

Los diagramas de Pareto de fenómenos o de causas, facilitan el estudio comparativo de numerosos procesos dentro de los ámbitos industriales, sociales o naturales. Además, se debe tener en cuenta que la distribución de los efectos y las causas no es una distribución lineal.

La utilización de esta herramienta presenta las siguientes ventajas (Galgano, 1995):

- Permite observar los resultados de las acciones de mejora implantadas al comparar dos diagramas del mismo fenómeno en momentos distintos de tiempo.
- Es una herramienta polivalente y fácilmente aplicable, no sólo en el control de la calidad, sino en cualquier ámbito.
- Utilizado en presentaciones y reuniones aumenta la eficiencia y la rapidez de la comunicación ya que permite identificar rápidamente y a simple vista el problema más grave.

2.3.1.1 Aplicaciones del diagrama de Pareto

De acuerdo con Kume (1992) el diagrama de Pareto puede ser utilizado para:

- Identificar oportunidades de mejora.
- Identificar un producto o servicio para el análisis de mejora de la calidad.
- Llamar la atención a los problemas o causas de una forma sistemática.
- Analizar las diferentes agrupaciones de datos.
- Buscar las causas principales de los problemas.
- Establecer la prioridad de las soluciones.
- Evaluar los resultados de los cambios efectuados a un proceso comparando diagramas obtenidos en momentos diferentes (antes y después).
- Clasificar datos en categorías.

El diagrama de Pareto es muy útil para aprender a concentrar esfuerzos en los aspectos más importantes y rentables del problema analizado, es decir, en los aspectos que ocupan las partes más elevadas del propio diagrama.

Dado que, en la vida cotidiana, se cuenta con tiempo y recursos limitados para la consecución de resultados, es necesario saber centrar los esfuerzos sobre los aspectos prioritarios, para lo que el análisis de Pareto resulta de fundamental importancia (Galgano, 1995).

2.3.1.2 Metodología del diagrama de Pareto

Galgano (1995) propone los siguientes siete pasos para la elaboración de un diagrama de Pareto:

1. **Decidir cómo clasificar los datos.** Después de tener clara la cuestión a analizar, se debe elegir el método de clasificación de los datos que deben recogerse. Se pueden clasificar por tipo de defecto, por máquina, por fase del proceso, por turno, etc.
2. **Determinar el tiempo de recogida de los datos.** Consiste en decidir cuándo y durante cuánto tiempo se recogerán los datos en términos de horas, días, semanas o meses.
3. **Obtener los datos y ordenarlos.** En esta fase se debe preparar la hoja de recogida de datos. Por ejemplo, si ha decidido clasificar por tipo de defecto y se define un periodo de observación de cuatro semanas consecutivas. En la hoja se van anotando los datos

(el defecto A ocurrió dos veces en la primera semana, el defecto B ocurrió cuatro veces, y así sucesivamente con todos), de manera que, una vez completada, constituye la base para la representación del Diagrama de Pareto (Tabla 2. 16). Antes de dibujar el diagrama de Pareto hay que colocar los defectos en orden decreciente en función del número de veces que se hayan detectado (Figura 2. 9).

Tabla 2. 16 Obtención de datos (Camisón et al., 2006).

Tipo de defecto	SEMANAS				Total
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	
Defecto A	//	////	/	/	9
Defecto B	////	//// ////	////	//// ///	27
Defecto C	//// ////	//// //// /	//// //// /	//// //// ///	45
Defecto D	//	////	///		9
Total	18	30	20	22	90

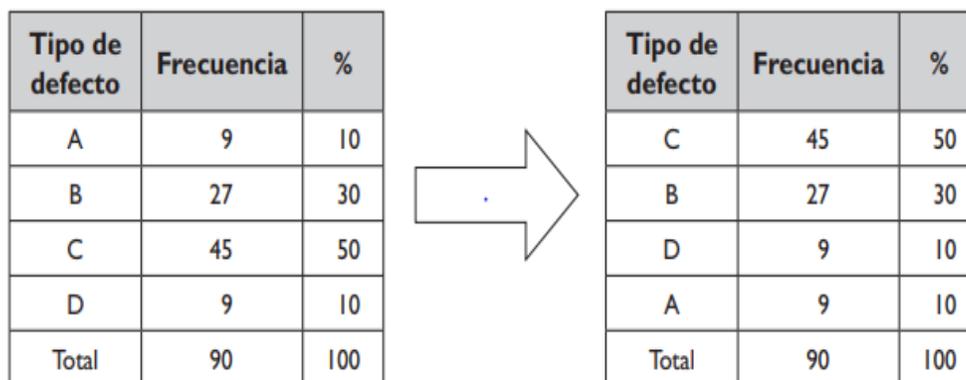


Figura 2. 9 Ordenar datos decrecientemente (Camisón et al., 2006).

4. **Dibujar los ejes de coordenadas.** Se colocan en el eje vertical la escala de medida de las frecuencias o coste y en el eje horizontal las causas en orden decreciente de la unidad de medida. En el ejemplo de la Figura 2. 10, en el eje vertical se figura el número total de defectos detectados y en el eje horizontal los tipos de defectos.

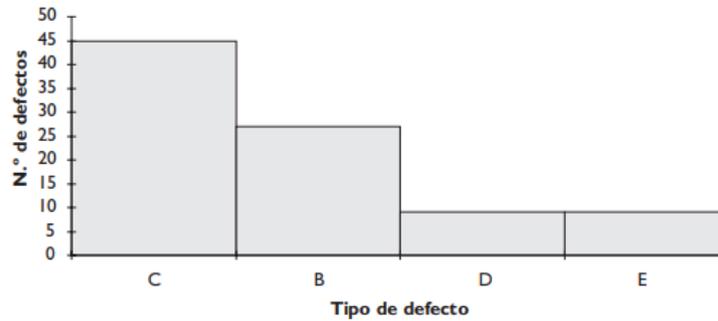


Figura 2. 10 Representación gráfica de los datos (Camisón et al., 2006).

5. **Dibujar el diagrama.** Consiste en la representación gráfica de los datos recogidos en la hoja. Para ello se observa cual es el defecto ocurrido con más frecuencia y se representa en el extremo izquierdo, junto al eje vertical, mediante una barra ancha que tendrá la altura correspondiente a su frecuencia. Posteriormente, se representa el segundo defecto en frecuencia, y así sucesivamente (Figura 2. 10).
6. **Construir una línea de frecuencia acumulada.** Consiste en trazar una línea de porcentajes, a la derecha de la gráfica, que sitúa el 100% a la altura del total de frecuencias (total de los defectos observados en las cuatro semanas). Esta línea muestra los porcentajes acumulados (Figura 2. 11).

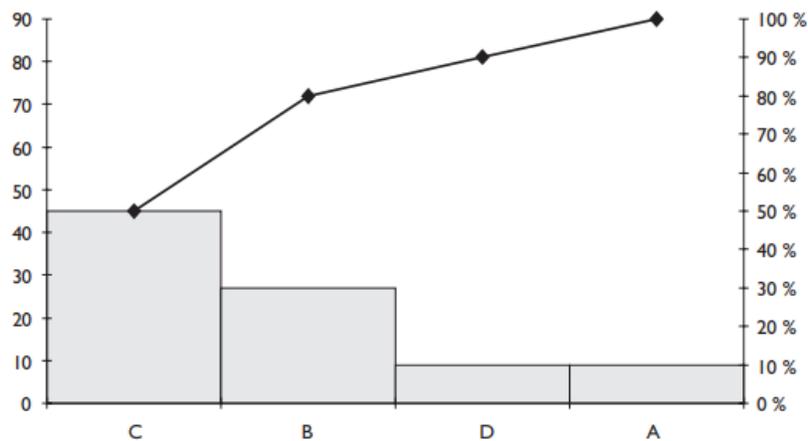


Figura 2. 11 Diagrama de Pareto (Camisón et al., 2006).

7. **El análisis de Pareto.** El diagrama pone de relieve los problemas más importantes sobre los que será necesario actuar. En el ejemplo, los defectos C y B son los defectos más importantes, puesto que representan el 80% de los defectos totales. Entonces, a la hora de actuar se tendrá que comenzar a resolver los problemas teniendo en cuenta este orden de importancia, dado que normalmente se cuenta con un tiempo y unos recursos limitados para la consecución de los resultados. Si se consigue eliminar o disminuir drásticamente estos dos defectos, se habrán eliminado la mayoría de los defectos, por tanto, se deben centrar esfuerzos en esta dirección.

2.3.2 Diagrama de pescado

De acuerdo a Camisón et al. (2006) el diagrama de pescado se utiliza para recoger de manera gráfica todas las posibles causas de un problema o identificar los aspectos necesarios para alcanzar un determinado objetivo (efecto). También se le denomina diagrama de causa-efecto o diagrama de Ishikawa.

Para desarrollar el diagrama de espina se deben seguir los siguientes pasos (Camisón et al., 2006):

1. Definir y determinar claramente el problema o efecto que se va a analizar, escribiéndolo dentro de un recuadro en el lado derecho del papel.
2. Identificar los factores o causas que originan el efecto, mediante una lluvia de ideas. La enumeración de las causas debe ser lo más amplia y completa posible. Para clasificar las causas encontradas a menudo se utiliza como referencia las categorías de las cuatro M definidas por Ishikawa: mano de obra, maquinaria, materiales y métodos, aunque pueden ser cualesquiera que resulten apropiadas. Estas categorías son los rótulos de las espinas. En esta fase es importante no criticar ninguna aportación realizada por los miembros del grupo y animar a la participación.
3. Representar el diagrama. Una vez enumeradas todas las causas, se deben colocar en el diagrama, agrupando las de similar naturaleza, aunque también se puede hacer directamente conforme éstas vayan surgiendo. Algunas veces, una misma causa puede ser colocada en más de una espina, por lo que, si no hay consenso respecto a

la ubicación, deberá colocarse repetidamente en todos los apartados o espinas necesarios.

4. Analizar las relaciones causa-efecto que derivan de la construcción del diagrama. En esta fase se examinan críticamente las causas y se determinan las causas más probables, y entre ellas las más importantes, de manera que se puedan jerarquizar y conocer el orden de prioridad a la hora de emprender acciones.

Esta herramienta puede utilizarse para conocer y afrontar las causas de los defectos, anomalías o reclamaciones; reducir costes; obtener mejoras en los procesos; mejorar la calidad de los productos, servicios e instalaciones; y establecer procedimientos normalizados, tanto operativos como de control (Galgano, 1995).

De acuerdo con Lloréns Montes y Fuentes Fuentes (2001), a pesar de la aparente sencillez de esta herramienta, su aplicación presenta una serie de ventajas:

- Proporcionar una metodología racional para la resolución de problemas.
- Permitir sistematizar las posibles causas de un problema.
- Favorecer el trabajo en equipo permitiendo que los trabajadores planteen de forma creativa sus opiniones y que la comunicación sea clara y eficaz.

2.4 Simulación

Con el nacimiento de la computadora se crearon diferentes herramientas para analizar el diseño y operación de sistemas o procesos complejos, siendo la simulación una de las más importantes (Coss Bu, 2003).

Para tomar decisiones correctas es necesario saber cómo responderá el sistema o proceso ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema real; pero existen inconvenientes como costos, seguridad, tiempo, entre otros, que hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por otro sistema. El proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación (Tarifa, 2001).

La simulación es una herramienta de modelación y análisis usada para evaluar y mejorar los sistemas. Ésta ha crecido desde ser una herramienta usada por unos cuantos especialistas, a una herramienta ampliamente aceptada hoy en día, usada por los responsables de toma de decisiones en todos los niveles de una organización (Harrell et al., 2004).

2.4.1 Definición de simulación

Existen muchas definiciones aceptadas y difundidas de simulación. Para una mejor comprensión de la herramienta de simulación, a continuación, se presentan algunas definiciones descritas por distintos autores:

- Según Thomas H. Naylor:
“Técnica numérica para conducir experimentos en una computadora que comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas del mundo real a través de largos periodos de tiempo” (Coss Bu, 2003).
- Según Christopher A. Chung:
“Simulación es el proceso de creación y experimentación con un modelo matemático informatizado de un sistema físico” (Chung, 2004).
- Según David Ríos Insúa:
“Técnica numérica para conducir experimentos, en una computadora digital, que comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo” (Aldana Castillo, 2016).
- Según Robert E. Shannon y Fernando A. Bernal:
“Proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para su funcionamiento” (Shannon y Bernal, 1988).

2.4.2 Clasificación de la simulación

De acuerdo con Law y Associates (2007), los modelos de simulación se pueden clasificar de tres formas diferentes:

1. Modelos de simulación estáticos y dinámicos.
 - Modelo estático. Es aquel en el que las variables del modelo no cambian con el tiempo. Un modelo de simulación estático es una representación de un sistema en un tiempo particular, o uno que puede ser usado para representar un sistema en el cual el tiempo simplemente no juega un papel. Ejemplo: La distribución de planta de una fábrica.
 - Modelo dinámico. Es aquel en el que las variables del modelo si cambian con el tiempo. Representa un sistema que evoluciona con el tiempo. Ejemplo: Los modelos de colas.
2. Modelos de simulación probabilísticos y determinísticos.
 - Modelo probabilístico. Es aquel que contiene variables aleatorias que son definidas por una función de probabilidad. Ejemplo: Simulación de un banco.
 - Modelo determinístico. Es aquel que contiene variables matemáticas que se conocen con certeza. Ejemplo: Simulación de una línea de ensamble controlada por robots.
3. Modelos de simulación discretos y continuos.
 - Modelo discreto. Es aquel en que el estado de las variables cambia en determinados puntos separados en el tiempo, que pueden ser contados. Ejemplo: Simulación de un banco.
 - Modelo continuo. Es aquel en que el estado de las variables cambia continuamente con respecto al tiempo. Ejemplo: Proceso químico en el cual la temperatura y la presión cambian continuamente a través del tiempo.

2.4.3 Metodología para un modelo de simulación

Law y Associates (2007) propusieron la metodología de la Figura 2. 12 para elaborar un modelo de simulación.

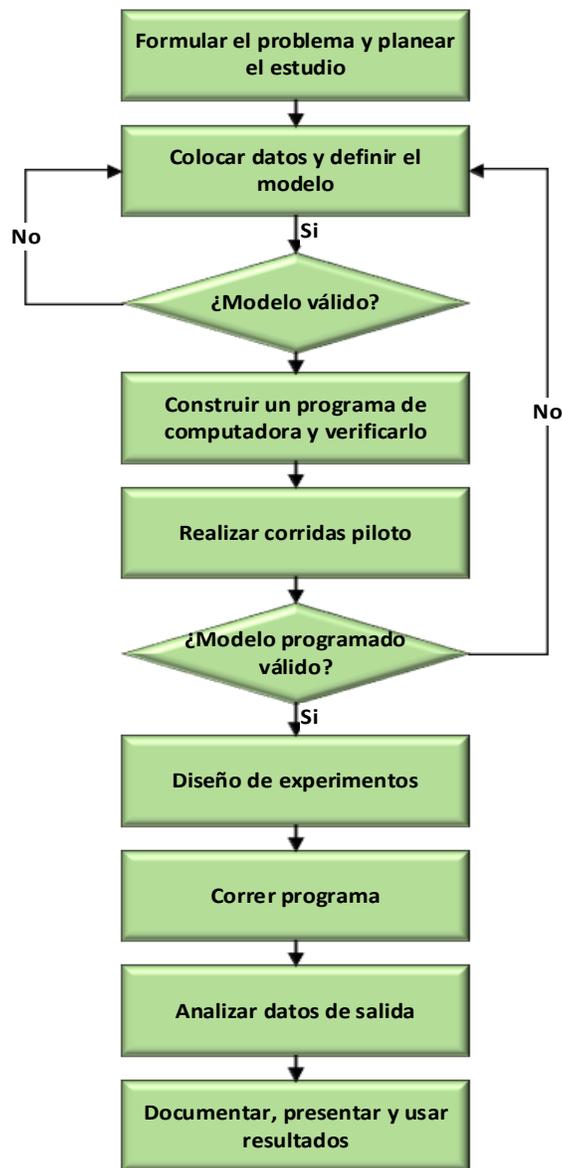


Figura 2. 12 Metodología para elaborar un modelo de simulación (Law y Associates, 2007).

2.4.3.1 Definir problema y planear estudio

Cada estudio de simulación empieza con una definición del problema a resolver. Para realizar una correcta definición del problema y posteriormente realizar la planeación del estudio de simulación, se debe considerar lo siguiente (Law y Associates, 2007):

- El problema a resolver es seleccionado por el gerente de la fábrica.

- Reuniones iniciales para el estudio de simulación, con asistencia del responsable del proyecto, el analista de simulación y el experto en el tema. En estas reuniones los siguientes puntos son discutidos:
 - Los objetivos principales del estudio y las preguntas específicas que deben ser contestadas por el estudio.
 - Medidas de desempeño que serán usadas para evaluar la eficiencia de las diferentes configuraciones del proceso.
 - Alcance o propósito del modelo y las configuraciones del proceso a ser modeladas.
 - Marco de tiempo, recursos y *software* que se utilizarán para el estudio.

2.4.3.2 Recolectar datos y definir el modelo

Una vez que el problema y la planeación del estudio han sido definidos, se empieza la recolección de datos y definición del modelo de simulación; para ello se realizan los siguientes pasos (Law y Associates, 2007):

- Colectar datos sobre la distribución de planta del sistema y procedimientos de operación. Los datos pueden ser (Harrell et al., 2004): estructurales, operacionales y numéricos.
- Realizar un diagrama de flujo del sistema a modelar.
- Colectar datos para especificar los parámetros del modelo y las distribuciones de probabilidad de los datos (Sección 2.4.6.1).
- Delinear la información y datos mencionados en un documento apropiado, el cual es el modelo conceptual.
- Colectar datos sobre el desempeño del sistema existente.
- Definir por escrito en un documento los supuestos del modelo, con el objeto de establecer cuáles son las condiciones o aspectos del sistema que van a ser tomadas en cuenta, en la definición del modelo de simulación.
- Definir el nivel de detalle del modelo, el cual dependerá de los siguientes puntos:
 - Objetivos del proyecto.
 - Medidas de desempeño.

- Disponibilidad de datos.
- Restricciones de la computadora.
- Restricciones de tiempos y dinero
- Evitar el forzar una correspondencia uno a uno entre cada elemento del modelo y el correspondiente elemento del sistema.
- Interactuar con el gerente (y otras personas claves del proyecto) de un modo regular.

2.4.3.3 Verificar que los supuestos del modelo sean validos

La verificación consiste en asegurar que la operación del modelo es una representación compatible del proceso que se está modelando. La verificación del modelo, cuyo objetivo es validarlo, se puede realizar de las siguientes maneras (Saucedo, 2011):

- Responder la pregunta: ¿El modelo tiene todos los elementos, sucesos y relaciones relevantes?
- Realizar aproximaciones útiles para establecer si los aspectos del sistema real son los importantes para el propósito de la simulación.
- Desarrollar una explicación estructurada del modelo conceptual usando el documento de los supuestos ante una audiencia de gerentes, analistas y expertos en el tema.
- Confirmar que el diagrama de flujo del modelo es correcto, antes del inicio de la programación para evitar reprogramaciones significativas más tarde.

2.4.3.4 Construir y verificar un programa de cómputo

Verificado el modelo conceptual se procede a la construcción de éste a una forma computarizada. Para ello se siguen los siguientes pasos (Saucedo, 2011):

- Programar el modelo en un lenguaje de programación o en un *software* de simulación. Los beneficios de usar un lenguaje de programación es que tienen un bajo costo de compra, además, se obtiene un modelo con un tiempo de ejecución más pequeño. El uso de un *software* de simulación, por otro lado, reduce los tiempos de programación y se obtiene un proyecto con un costo menor.
- Verificar (depurar) el programa computacional de simulación.

2.4.3.5 Realizar corridas piloto

Después de haber construido y verificado el modelo, se procede a realizar corridas pilotos de simulación para incrementar la experiencia del modelador en el uso del modelo de simulación y por consiguiente empezar a tener expectativas respecto a las salidas del modelo en términos cuantitativos y cualitativos, además de proveer resultados que puedan ser usados para planear varios aspectos de corridas posteriores, así como proporcionar ayuda para validar el modelo de un sistema existente.

Para que el procedimiento del cálculo de corridas sea óptimo se pueden realizar los siguientes pasos (Chung, 2004):

- Determinar el número de corridas o réplicas.
- Calcular el número óptimo de corridas o réplicas.

Chung (2004) menciona que para determinar el número de corridas piloto se puede iniciar con un número de 10 corridas, con un intervalo de confianza del 0.95 y un nivel de significancia de 0.05; con la información obtenida de las corridas se puede determinar el número óptimo de corridas para el modelo de simulación.

2.4.3.6 Validar el modelo programado

Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación del modelo programado. En esta etapa es posible detectar deficiencias en la formulación del programa de computadora o en los datos recolectados para el programa de computadora, permitiendo de esta forma que el programa de computadora sea una representación exacta del sistema real. Esta validación puede ser realizada a través de alguno de los siguientes pasos (Law y Associates, 2007):

- Si hay un sistema existente, entonces comparar las medidas de desempeño del modelo y el sistema existente.
- Independientemente de que haya un sistema existente, el analista de simulación y los expertos en el sistema, deben revisar los resultados del modelo para su corrección.

- Usar el análisis de sensibilidad para determinar que los factores del modelo tienen un impacto significativo sobre las medidas de desempeño.

2.4.3.7 Realizar diseño de experimentos

El diseño de experimentos, en la realización del modelo de simulación, es una etapa importante, porque permite determinar el número óptimo de corridas que el programa de computadora debe ser ejecutado; esto es con el objetivo de obtener un mayor grado de precisión en las medidas de desempeño elegidas. Para la experimentación del programa de computadora se debe especificar lo siguiente para cada configuración del sistema de interés (Law y Associates, 2007):

- El margen de error máximo aceptado de cada medida de desempeño.
- La longitud de tiempo de cada corrida.
- La longitud del periodo de precalentamiento, si el sistema lo necesita.
- Número de corridas independientes de simulación usando diferentes números aleatorios, esto facilita la construcción de intervalos de confianza.

2.4.3.8 Realizar corridas del modelo

Este paso involucra la realización de las corridas de simulación del modelo mediante el diseño de experimentos (Sección 2.4.3.7). Las corridas piloto son preliminarmente ejecutadas después de que ha sido verificado y construido el modelo de simulación; con estas corridas se proveen resultados que después serán analizados en el siguiente paso.

2.4.3.9 Analizar los datos de salida

El análisis de los datos de salida consiste en recolectar los datos producidos por la simulación, durante el paso anterior (Sección 2.4.3.8), en las medidas de desempeño establecidas; teniendo en cuenta dos objetivos principales (Law y Associates, 2007):

- Determinar el desempeño absoluto de configuraciones definitivas del proceso.
- Comparar las configuraciones alternativas del proceso en un sentido relativo.

2.4.3.10 Documentar, presentar y usar resultados

La documentación, presentación y uso de resultados del estudio de simulación involucra preparar y escribir un reporte que describa todos los aspectos importantes del estudio, entre los cuales están (Law y Associates, 2007):

- Documentar los supuestos (Sección 2.4.3.2) del programa de computadora y los resultados del estudio para usarlos en el proyecto actual y en futuros proyectos.
- Presentar los resultados del estudio:
 - Usar animación para presentar los resultados del modelo a los jefes y a otras personas que no tengan conocimiento sobre los detalles del programa de computadora.
 - Discutir la construcción del modelo y el proceso de validación para promover la credibilidad de los resultados.
 - Usar los resultados obtenidos en el proceso de toma de decisiones, si ellos han sido válidos y creíbles.

2.4.4 Factores a considerar en el desarrollo del modelo de simulación

La simulación está basada fuertemente en la teoría de probabilidad y estadística, ciencias computacionales y diseño de experimentos. Se describe a continuación cómo intervienen estas áreas en el desarrollo y formulación del modelo de simulación (Coss Bu, 2003):

- **Generación de variables aleatorias no uniformes**

De acuerdo con Coss Bu (2003), si el modelo de simulación es probabilístico, la simulación debe ser capaz de generar variables aleatorias no uniformes de distribuciones de probabilidad teóricas o empíricas; esto se puede obtener si se cuenta con un generador de número uniformes y una función que transforme estos números en valores de la distribución de probabilidad deseada. Se han desarrollado una gran cantidad de generadores para las distribuciones de probabilidad más comunes: la distribución normal, exponencial, Poisson, Erlang, binomial, gamma, beta, f, t, etc.

- **Tamaño de la muestra**

El tamaño de la muestra es el número de corridas en la computadora. Es uno de los factores principales a considerar en un estudio de simulación. La selección de un tamaño de muestra apropiado que asegure un nivel deseado de precisión y a la vez minimice el costo de operación del modelo, es un problema algo difícil pero muy importante. Es necesario que un análisis estadístico sea realizado para determinar el tamaño de muestra requerido. El tamaño de la muestra puede ser obtenido de dos maneras (Coss Bu, 2003):

1. Previa e independientemente de la operación del modelo,
2. Durante la operación del modelo y basado en los resultados arrojados por el modelo, utilizando la técnica estadística intervalos de confianza.

- **Lenguajes de programación**

Los primeros dos pasos de un estudio de simulación se refieren a la definición del sistema a ser modelado y a la descripción del sistema en términos de relaciones lógicas de sus variables y diagramas de flujo. El siguiente paso consiste en describir el modelo en un lenguaje que sea aceptado por la computadora que se va a usar, para ello, se tienen dos opciones a seguir sino se tiene un *software* de simulación (Coss Bu, 2003):

1. Desarrollar el *software* requerido para estudios de simulación,
2. Comprar *software* (lenguajes de programación de propósito especial). Para esta alternativa es necesario analizar y evaluar varios paquetes de simulación, antes de tomar la decisión final.

- **Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos es un tema cuya relevancia ha sido reconocida pero raramente aplicado. El diseño de experimentos en los estudios de simulación puede ser de varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que se hayan planteado.

Los tipos de análisis requeridos más comunes son los siguientes:

- Comparación de las medias y varianzas de las alternativas analizadas.
- Determinación de la importancia y el efecto de diferentes variables en los resultados de la simulación.
- Búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.

2.4.5 Errores comunes al realizar un estudio de simulación

Al realizar un estudio de simulación se puede caer en ciertos errores, lo que ocasiona deficiencias en los resultados obtenidos, los errores más comunes son (Law y Associates, 2007):

- No se definen claramente los objetivos del estudio de simulación.
- No se detalla adecuadamente el modelo del sistema real que se está simulando.
- Aplicar simulación sin tener conocimientos de estadística.
- Creer que la simulación es demasiado compleja.
- Falta de comunicación con el gerente y gente involucrada en el estudio que se está llevando a cabo.
- Usar distribuciones de probabilidad arbitrarias (por ejemplo, la distribución normal) como entradas del programa, ya que se asigna lo que se desea, más no lo que realmente debe ser.
- Usar medidas de desempeño erróneas por no definir el objetivo.
- Mal uso de la animación, ya que se debe usar para convencer al gerente haciendo a la simulación una técnica entendible.

2.4.6 Pruebas estadísticas para un estudio de simulación

El uso de pruebas estadísticas, de acuerdo con Law y Associates (2007), es de vital importancia dentro de un proyecto de simulación, ya que se usan para:

- **Determinar las distribuciones de probabilidad de los datos de entrada**
Dentro de un estudio real de simulación es necesario obtener datos del proceso bajo estudio, como son tiempos entre llegadas, tiempos de servicio o de operación, tiempos de recorridos, etc., estos datos van a ser los valores de entrada del modelo de simulación. Para introducir estos datos dentro en un *software* de simulación es necesario especificar su distribución de probabilidad de cada uno de los datos reales de entrada necesarios para la construcción del modelo de simulación. Para esto se utilizan las pruebas de bondad de ajuste.

- **Determinar del número de corridas óptimo del modelo de simulación**

Una vez validado el modelo se procede a determinar por la persona experta del sistema bajo estudio, el grado de error y el nivel de confianza que se desea obtener por el modelo de simulación de las medidas de desempeño elegidas. Con estos datos se procede a determinar el número óptimo de corridas que se deberán realizar del modelo de simulación para obtener los datos dentro de las especificaciones requeridas. Para determinar el número de corridas óptimo del modelo de simulación se utiliza la prueba estadística $n^*(\beta)$.

- **Realizar la validación del modelo de simulación**

Creado el modelo de simulación se procede a validarlo, con la finalidad de determinar si los datos generados por el modelo de simulación representan verdaderamente el sistema real. La prueba más usada para la validación del modelo de simulación es la prueba t de *student*.

2.4.6.1 Determinar las distribuciones de probabilidad de los datos de entrada

El hecho de determinar las distribuciones de probabilidad de entrada del modelo es con el objeto de que el *software* de simulación cree eventos de tipo probabilístico, con base en las distribuciones de probabilidad determinadas de cada variable de entrada. Con estos datos de entrada el *software* de simulación creará variables aleatorias que imiten el comportamiento del sistema real por el modelo de simulación.

Las pruebas de bondad de ajuste permiten determinar el grado en el que se ajustan los datos recolectados a un tipo de distribución de probabilidad. Las pruebas más comúnmente usadas en los proyectos de simulación son:

1. La prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrada.
2. La prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

La prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrada

Puede pensarse como una comparación formal entre un histograma creado a partir de datos observados, con la función densidad o masa de una distribución de probabilidad teórica

conocida (Law y Associates, 2007). El estadístico que usa la prueba Chi Cuadrada está dado por la Ecuación 2.1.

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots\dots\dots (Ec. 2.1)$$

Donde:

k = Número de celdas o barras del histograma de frecuencias.

O_i = Valor observado en cada celda.

E_i = Valor esperado en cada celda.

El Estadístico Chi Cuadrada tendrá aproximadamente una distribución de probabilidad Chi cuadrada en un muestreo repetitivo para “ n ” grande. El número de grados de libertad es igual al número de celdas, k , menos un grado de libertad por cada restricción lineal independiente impuesta sobre los conteos observados de las celdas, menos un grado de libertad por cada parámetro que se estime.

Una restricción lineal siempre está presente porque la suma total de los conteos de las celdas tiene que ser igual a “ n ”, es decir $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$. La región de rechazo será denotada por la Ecuación 2.2.

$$X^2 > X_{\alpha, k-1-p}^2 \dots\dots\dots (Ec. 2.2)$$

Donde:

k = número de celdas.

p = número de parámetros estimados.

α = nivel de confianza.

La distribución Chi Cuadrada puede ser usada siempre y cuando el valor esperado en cada celda sea mayor o igual a cinco.

La prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

La prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) compara una función de distribución empírica $F_n(x)$ tomada a partir de datos reales con una función de distribución teórica hipotetizada $F(x)$ (Law y Associates, 2007).

La prueba K-S no requiere agrupar los datos de ninguna manera, por lo que no se pierde información. Además, es válida para cualquier tamaño de muestra n , mientras que la prueba Chi Cuadrada es válida sólo en un sentido asintótico. La gran desventaja es que para datos discretos los valores críticos no están disponibles y tienen que ser calculados usando fórmulas muy complejas.

Para la prueba K-S se define la función de distribución empírica como $F_n(x)$ a partir de los datos reales observados X_1, X_2, \dots, X_n como:

$$F_n(x) = \frac{\text{(número de } X_i \text{ s } \leq x)}{n} \dots\dots\dots (Ec. 2.3)$$

Si $F(x)$ es la función de distribución teórica hipotetizada, el estadístico K-S, que se definirá como “ D_n ”, mide la cercanía entre la función $F_n(x)$ y $F(x)$, es decir, D_n es la distancia vertical máxima entre $F_n(x)$ y $F(x)$ para todos los valores de X .

Como la función de distribución teórica hipotetizada puede estar por encima o por debajo de la función de distribución empírica, entonces el estadístico D_n se expresa mediante las siguientes tres ecuaciones:

$$D_n+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - F(X_i) \right\} \dots\dots\dots (Ec. 2.4)$$

$$D_n- = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ F(X_i) - \frac{(i-1)}{n} \right\} \dots\dots\dots (Ec. 2.5)$$

$$D_n = \max\{D_n+, D_n-\} \dots\dots\dots (Ec. 2.6)$$

Para una $n \geq 20$, la aproximación para los valores críticos de D, en los cuales inicia la región de rechazo, se definen con las siguientes ecuaciones:

$$D_{0.05} = \frac{1.36}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (Ec. 2.7)$$

$$D_{0.01} = \frac{1.63}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (Ec. 2.8)$$

2.4.6.2 Determinar del número de corridas óptimo del modelo de simulación

La prueba $n^*(\beta)$ es utilizada para determinar el número óptimo de corridas o réplicas para estimar la media $\mu = E(x)$ con un error específico, una vez que el modelo ha sido validado (Moras Sánchez, 2017).

Si el estimador \bar{X} es tal que $|\bar{X} - \mu| = \beta$, entonces se dice que \bar{X} tiene un error absoluto β . Si se hacen corridas de una simulación hasta que la mitad del intervalo de confianza, dado por la Ecuación 2.9:

$$\bar{X}_n \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \dots\dots\dots (Ec. 2.9)$$

Sea menor o igual que β (donde $\beta > 0$, y β es el error absoluto el cual es elegido junto con el experto del sistema) entonces:

$$1 - \alpha \approx p(\bar{X} - mitad \leq \mu \leq \bar{X} + mitad) \dots\dots\dots (Ec. 2.10)$$

$$= p(|\bar{X} - \mu| \leq mitad) \dots\dots\dots (Ec. 2.11)$$

$$\leq p(\bar{X} - \mu \leq \beta) \dots\dots\dots (Ec. 2.12)$$

Por lo que X tiene un error absoluto máximo β con una probabilidad aproximada $1-\alpha$. En otras palabras, si se construyen 100 intervalos de confianza independientes al 90%, es de esperarse que X tenga un error absoluto de a lo más β en 90 de los casos; en alrededor de 10 intervalos el error absoluto sería mayor a β .

Suponiendo que se ha construido un intervalo de confianza para m basado en un número fijo de corridas n . Si se asume que el estimador de la varianza poblacional no cambia apreciablemente a medida que el número de corridas se incrementa, una expresión aproximada para el número total de replicaciones $n^*(\beta)$ requerido para obtener un error absoluto de β es dado por la Ecuación 2.13.

$$n * (\beta) \left\{ i \geq n: t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \leq \beta \right\} \dots\dots\dots (Ec. 2.13)$$

Por lo que es posible determinar $n^*(\beta)$ incrementando i en uno hasta que un valor de i obtiene mediante la Ecuación 2.14 (Law et al., 2000).

$$t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \leq \beta \dots\dots\dots (Ec. 2.14)$$

2.4.6.3 Realizar la validación del modelo de simulación.

Para validar que un modelo representa adecuadamente al sistema real, se utiliza la prueba *t* de *student*. Cuando los tamaños de muestra son pequeños, se deben hacer dos cambios técnicos en el procedimiento para probar las diferencias entre medias. El primero tiene que ver con la forma en que se calcula el error estándar estimado de la diferencia entre dos medias muestrales, el segundo es basar la prueba de la muestra pequeña en la distribución *t* de *student*, más que en la distribución normal (Levin & Rubin, 2004). El estadístico de prueba para la diferencia de medias con muestras pequeñas es calculado a partir de las ecuaciones 2.16 y 2.17 (Sección 2.7.3).

2.5 Software de simulación Flexsim

Flexsim es una herramienta de análisis que permite a ingenieros y planificadores a tomar decisiones inteligentes en el diseño y la operación de un sistema. Con *Flexsim* es posible desarrollar modelos de computadora en tres dimensiones (3D) de un sistema real (Beaverstock et al., 2012).

Flexsim es un programa de *software* de simulación que integra un entorno de modelado 3D con múltiples funcionalidades. Fundamentalmente, es una herramienta que funciona con eventos discretos. El *software Flexsim* puede importar sus propios objetos 3D para brindar modelos de simulación, además, tiene poderosas herramientas de análisis disponibles, así como la capacidad de generar gráficos e informes vinculados a resultados estadísticos (Réveillac, 2017).

2.5.1 Requerimientos mínimos de *hardware*

Cualquier *software* necesita de requerimientos mínimos en el equipo de cómputo (*hardware*) para trabajar adecuadamente. El *software Flexsim* no es la excepción y las especificaciones recomendadas por el desarrollador y mínimas requeridas para que *Flexsim* funcione adecuadamente se muestran en la Tabla 2. 17 (FlexSim, 2020).

Tabla 2. 17 Requerimientos mínimos recomendados por *Flexsim* (FlexSim, 2020).

<i>Hardware</i>	Requerimientos mínimos recomendados
CPU	Cualquier procesador Intel o AMD x86 o x64 moderno producido en los últimos 5 años, como: <ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel de quinta generación (<i>Broadwell</i>) Core o superior • Procesador de la serie AMD Bristol Ridge o superior
RAM	4 GB RAM o más
Gráficos	Una unidad de procesamiento gráfico (GPU) compatible con OpenGL 3.1 o superior, producida en los últimos 5 años, como: <ul style="list-style-type: none"> • Nvidia GeForce GT 710 o superior • AMD Radeon R5 330 o superior • Intel HD <i>Graphics</i> 510 o superior
OS	Cualquier sistema operativo Windows actualmente compatible con <i>Microsoft</i> 32 o 64 bits, tales como: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Windows</i> 10 (versiones compatibles) • <i>Windows</i> 8.1 (el soporte finaliza el 10 de enero de 2023)
Espacio de disco	3 GB libres para la instalación del programa <i>Flexsim</i>
<i>Software</i> adicional	El último <i>.NET Framework</i>

2.5.2 Objetos 3D en *Flexsim*

Flexsim ofrece una variedad de diferentes objetos 3D que puede usar para construir un modelo de simulación. Las tres categorías más importantes de *Objects* que se necesitan conocer son *FlexSim* (2020):

- **Elementos de flujo (*Flow ítems*)**

Los elementos de flujo son los elementos que fluirán a través de su modelo de simulación desde el comienzo de su simulación hasta el final (Figura 2. 13). Pueden representar muchas cosas diferentes en un modelo de simulación:

- Materiales que se mueven a través de una línea de montaje y pueden ser de cualquier tipo: cajas, cilindros, esferas, piezas de carros, alimentos, etc.
- Clientes caminando por un centro de servicio.
- Productos que se mueven a diferentes ubicaciones en un almacén.
- Los pedidos se transfieren de una estación a otra.

- **Recursos fijos (*Fixed resources*)**

Los recursos fijos son objetos que permanecen fijos o estacionarios en el modelo, como se muestra en la Figura 2. 14. En términos generales, los recursos fijos interactúan con elementos de flujo en la simulación, como almacenar o modificar elementos de flujo. Los *Flow ítems* fluirán de un recurso fijo al siguiente recurso fijo aguas abajo hasta que lleguen al final de la simulación. Varios recursos fijos diferentes están disponibles en la biblioteca de *Flexsim*, tal como se ilustra en la Tabla 2. 18 y Tabla 2. 19. Los recursos fijos pueden representar varios pasos o procesos en el modelo, tales como:

- Estaciones de trabajo.
- Operaciones de la máquina.
- Estaciones de procesamiento
- Sitios de carga y descarga
- Áreas de almacenamiento

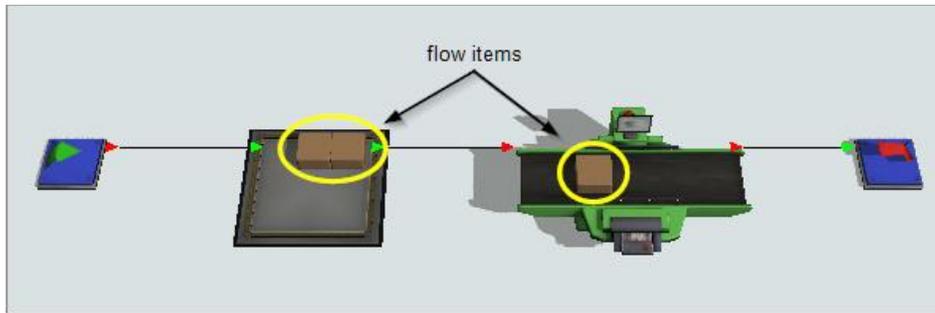


Figura 2. 13 Elementos de flujo (Flow ítems).

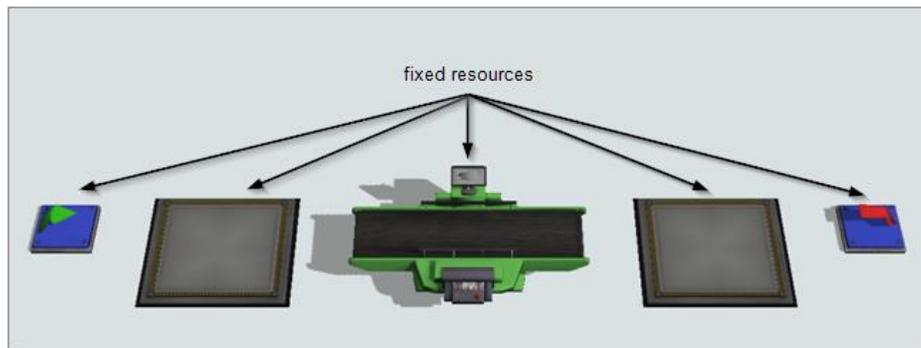


Figura 2. 14 Recursos fijos (Fixed resources).

Tabla 2. 18 Biblioteca de Flexsim de Fixed resources.

Icono	Descripción
<p><i>Source</i></p> 	<p>La fuente crea elementos de flujo y los libera a un objeto posterior. Puede controlar la velocidad a la que la fuente crea elementos de flujo para que lleguen en un horario fijo, una velocidad continua regular o una distribución estadística aleatoria.</p>
<p><i>Queue</i></p> 	<p>La cola almacena elementos de flujo hasta que un objeto posterior está listo para tomarlos. De forma predeterminada, la cola libera elementos de flujo según el orden de entrada, pero hay otras opciones disponibles.</p>
<p><i>Processors</i></p> 	<p>Los procesadores simulan elementos de flujo que se procesan en una estación. Simulan un retraso de tiempo, comenzando con un tiempo de configuración seguido del tiempo de proceso. Puede requerir que utilice un operador durante la configuración (tiempo de proceso) y puede configurar procesadores para manejar más de un elemento de flujo.</p>

Tabla 2. 19 Biblioteca de Flexsim de Fixed resources (continuación).

Icono	Descripción
<p><i>Sink</i></p> 	<p>El fregadero elimina los elementos de flujo de un modelo de simulación cuando están terminados.</p>
<p><i>Combiner</i></p> 	<p>El combinador agrupa varios elementos de flujo juntos. Puede unir los elementos de flujo de forma permanente o puede empaquetarlos en un elemento de flujo de contenedor para que puedan separarse en un momento posterior.</p>
<p><i>Separator</i></p> 	<p>El separador separa un elemento de flujo en varias partes, ya sea desempacando un elemento de flujo de contenedor que ha sido empaquetado por un combinador o haciendo varias copias del elemento de flujo original. La división / desembalaje se realiza una vez finalizado el tiempo de proceso.</p>
<p><i>Multiprocessor</i></p> 	<p>El multiprocesador es similar al objeto del procesador, pero puede simular elementos de flujo que atraviesan una secuencia de dos o más procesos.</p>
<p><i>Basic FR</i></p> 	<p>Puede utilizar el objeto <i>Basic FR</i> para crear un objeto de recurso fijo personalizado</p>

- **Ejecutores de tareas (*Task executers*)**

Los ejecutores de tareas son objetos que pueden moverse por el modelo e interactuar con recursos fijos y elementos de flujo (Figura 2. 15). Todos los ejecutores de tareas tienen la misma funcionalidad básica; la principal diferencia entre ellos es la forma en que se mueven. Se les llama ejecutores de tareas porque se les pueden asignar tareas y secuencias de tareas, por ejemplo, pueden viajar, cargar elementos de flujo, descargar elementos de flujo, configurar u operar máquinas, actuar como recursos compartidos para estaciones de procesamiento y realizar muchas otras tareas de simulación *FlexSim* (2020). La biblioteca *Flexsim* tiene una variedad de ejecutores de tareas; éstos se muestran en la Tabla 2. 20 y Tabla 2. 21.

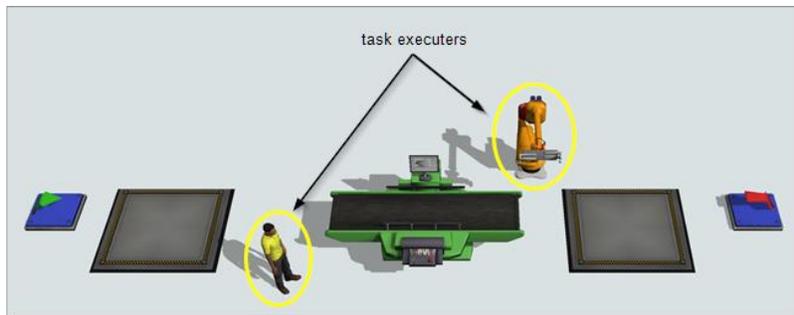


Figura 2. 15 Ejecutores de tareas (Task executers).

Tabla 2. 20 Biblioteca de Flexsim de Task executers.

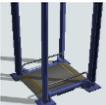
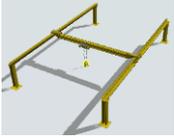
Icono	Descripción
<p><i>Dispatcher</i></p> 	<p>El despachador se utiliza para controlar un grupo de transportistas u operadores. Los recursos fijos pueden enviar secuencias de tareas al despachador, que luego delega las tareas a los transportes u operadores que están conectados a él una vez que estén disponibles.</p>
<p><i>Task-Executer</i></p> 	<p>El objeto <i>Task-Executer</i> es un ejecutor de tareas genérico. Desde cierta perspectiva, se puede utilizar sin tener que crear toda la lógica personalizada como lo haría con un objeto <i>Basic TE</i>. Un <i>Task-Executer</i> tiene algunas funciones básicas que puede adaptar a una variedad de usos. La forma predeterminada de este objeto está diseñada para parecerse a un vehículo guiado automático (AGV).</p>
<p><i>Operator</i></p> 	<p>Los operadores representan a empleados que pueden transportar elementos de flujo, operar recursos fijos y realizar una variedad de otras tareas que requieren un empleado en un modelo de simulación.</p>
<p><i>Transporter</i></p> 	<p>El transportador se utiliza principalmente para transportar elementos de flujo de un objeto a otro. Tiene una carretilla elevadora que sube o baja los artículos de flujo cuando los carga o descarga de una rejilla.</p>
<p><i>Elevator</i></p> 	<p>El elevador es un tipo especial de transporte que mueve los elementos de flujo hacia arriba y hacia abajo. Automáticamente viajará al nivel donde los elementos de flujo deben ser recogidos o depositados. Los elementos de flujo se animan cuando entran y salen del ascensor para mejorar la precisión del modelo.</p>
<p><i>Robot</i></p> 	<p>El robot es un transporte especial que levanta elementos de flujo desde sus ubicaciones iniciales y los coloca en sus ubicaciones finales. Generalmente, la base del robot no se mueve. En cambio, 6 articulaciones giran para mover los elementos de flujo.</p>

Tabla 2. 21 Biblioteca de Flexsim de Task executers (continuación).

Icono	Descripción
<p data-bbox="349 317 418 342"><i>Crane</i></p> 	<p data-bbox="500 342 1349 489">La grúa simula grúas guiadas por raíles, como grúas pórtico, aéreas o de brazo. Tiene una funcionalidad similar al transportador, pero con gráficos modificados. De forma predeterminada, el recogedor de grúa se eleva a la altura del objeto de la grúa después de recoger o dejar un elemento de flujo antes de que viaje a la siguiente ubicación, pero estos movimientos se pueden personalizar.</p>
<p data-bbox="313 522 454 548"><i>ASRS vehicle</i></p> 	<p data-bbox="500 527 1349 730">El vehículo ASRS es un tipo de transporte especial diseñado específicamente para trabajar con <i>racks</i>. Se desliza hacia adelante y hacia atrás en un pasillo entre dos estantes que recogen y dejan artículos de flujo. Los movimientos de alcance, elevación y desplazamiento están completamente animados por el vehículo ASRS. Los movimientos de elevación y desplazamiento ocurrirán simultáneamente, pero el alcance sólo ocurrirá después de que el vehículo se haya detenido por completo.</p>
<p data-bbox="337 743 430 768"><i>BasicTE</i></p> 	<p data-bbox="500 789 1349 852">Puede utilizar el objeto <i>BasicTE</i> para crear un objeto ejecutor de tareas personalizado.</p>

Más allá de las tres categorías básicas de elementos en *Flexsim*, existen tipos adicionales de objetos que puede utilizar para mejorar un modelo de simulación *FlexSim* (2020):

- **Los objetos visuales (*visual objects*)** pueden ayudar a administrar modelos complejos y agregar detalles visuales que podrían ser útiles al presentar el modelo a las partes interesadas.
- **Los objetos transportadores (*Conveyor objects*)** se pueden utilizar para crear sistemas transportadores para transportar elementos de flujo a través del modelo de simulación.
- **Los objetos *AStar* y *AGV*** controlan el movimiento del ejecutor de tareas en el modelo de simulación, asegurándose de que los ejecutores de tareas utilicen rutas de viaje designadas.
- **Los objetos fluidos (*Fluid objects*)** se pueden utilizar para crear modelos de simulación para manipular materiales fluidos.

2.5.3 Etiquetas en *Flexsim*

Las etiquetas (*Labels*) son un componente crucial en la construcción de la lógica de un modelo. En su nivel más básico, una etiqueta es una forma de almacenar información en un *flow item* u objeto 3D. Las etiquetas son clave para la funcionalidad general de *Flexsim* porque pueden rastrear información importante o cambiar dinámicamente lo que sucede durante una simulación en función de diferentes condiciones en el modelo de simulación *FlexSim* (2020).

Cada etiqueta está compuesta por tres elementos *FlexSim* (2020):

- Propietario (*Owner*): cada etiqueta pertenece a un *flow item* u objeto 3D específico. Se necesita saber qué elemento u objeto posee la etiqueta para hacer referencia a esa etiqueta durante una ejecución de simulación.
- Nombre (*Name*): cada etiqueta tiene un nombre que describe el tipo de información que contiene. Se utiliza este nombre de etiqueta para hacer referencia a la etiqueta y obtener información de ella. El nombre de la etiqueta se asigna cuando se crea la etiqueta por primera vez y no cambiará durante la ejecución de la simulación. Aunque *Flexsim* a veces sugiere nombres de etiqueta predeterminados para ciertas etiquetas, la decisión final sobre el nombre de la etiqueta dependerá del programador.
- Valor (*Value*): cada etiqueta tiene un valor que contiene información sobre el propietario de la etiqueta. Las etiquetas pueden variar de un artículo a otro o de una ficha a otra. Los valores pueden ser cualquier tipo de datos, como texto, números, referencias a otros objetos e incluso matrices. Los valores de las etiquetas pueden cambiar durante la ejecución de una simulación.

A medida que este elemento de flujo se mueve a través de varios procesos en el modelo de simulación, el valor de esta etiqueta puede cambiar.

Es útil poder comprender una referencia de etiqueta cuando se encuentra una. Los siguientes son ejemplos de algunas referencias de etiquetas:

- *item.ProductType*
- *item.Destination*
- *current.MyOperator*

Como se mencionó anteriormente, cada etiqueta tiene tres componentes: un propietario, un nombre y un valor. Las referencias de etiquetas utilizan dos de esos componentes. La primera parte de la referencia de la etiqueta (la que está antes del punto) es el *owner* de la etiqueta. La segunda parte de la referencia de la etiqueta es el *name* de la etiqueta: *owner.labelName*

2.5.4 Puertos en *Flexsim*

El término puerto normalmente podría pensarse en una estación de atraque donde los barcos cargueros cargan y descargan un envío de mercancías. Eso es realmente muy similar a cómo funcionan los puertos en *Flexsim*.

En *Flexsim*, los puertos (*ports*) son puntos en un objeto donde los elementos de flujo se pueden transferir de un objeto a otro; esto se muestra en la Figura 2. 16. Una conexión de puerto es la conexión entre puertos en dos objetos diferentes. Los puertos crean relaciones entre objetos que les permiten comunicarse entre sí e intercambiar elementos de flujo.

La mayor ventaja de utilizar conexiones de puerto es que son rápidas y fáciles de crear. Los puertos también tienen una lógica de flujo bastante sencilla, lo que facilita que los nuevos usuarios comprendan cómo funcionan.

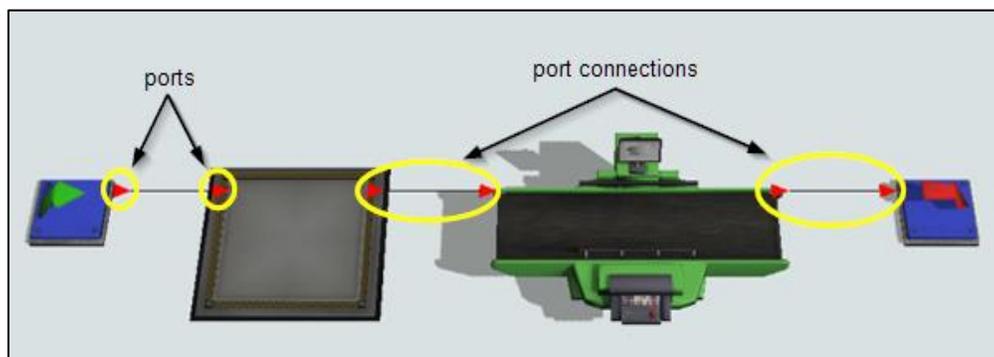


Figura 2. 16 Conexiones de puertos

Los dos tipos más comunes de conexiones de puerto son *FlexSim* (2020):

- **Puertos de entrada/salida (conexiones A)**

Los puertos de entrada / salida son los tipos más comunes de conexiones de puertos. Se utilizan generalmente para conectar dos *fixed resources* juntos para que puedan intercambiar *Flow items*. El puerto de entrada de un objeto descendente está conectado al puerto de salida de un objeto ascendente. Un puerto de entrada es donde el elemento de flujo ingresa al objeto y se ve como una flecha apuntando hacia el objeto. Un puerto de salida es donde el elemento de flujo sale del objeto y se ve como una flecha apuntando en dirección opuesta al objeto. Se representan gráficamente como un pequeño triángulo rojo o verde (Figura 2. 17).

- **Puertos centrales (conexiones S)**

Los puertos centrales se usan generalmente para conectar los *task executors* a los *fixed resources*, pero pueden conectar dos objetos que necesiten hacer referencia entre sí. Los puertos centrales se representan gráficamente como un cuadrado rojo (Figura 2. 18).

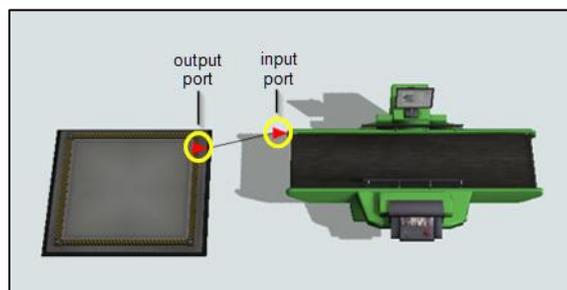


Figura 2. 17 Puertos de entrada/salida.

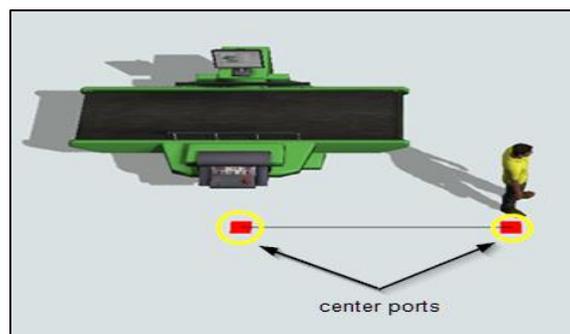


Figura 2. 18 Puertos centrales.

- Transportar *flow items*: los *fixed resources* pueden utilizar los *task executers* conectados a sus puertos centrales para transportar *flow items* a un *fixed resource* descendente.
- Configuración y procesamiento: algunos *fixed resources* tienen tiempos de configuración y procesamiento. Estos objetos pueden requerir la presencia de un *task executers* conectado a sus puertos centrales durante los tiempos de configuración y procesamiento.
- Referencia general: los objetos pueden tener conexiones de puerto central para comunicarse o hacer referencia entre sí.

2.5.5 Construir un modelo 3D en *Flexsim*

Una de las cosas que hace *Flexsim*, es que brinda la capacidad de crear representaciones 3D de sistemas. Mientras que otros *softwares* de simulación pueden ayudar a construir modelos teóricos, *Flexsim* brinda la capacidad de ver un sistema de una manera concreta que es fácil de entender y usar (*FlexSim, 2020*).

2.5.5.1 Agregar *objects* al modelo 3D

El primer paso para crear un modelo 3D es crear el diseño básico del sistema que está intentando simular. Para crear el diseño de un modelo 3D, se deben agregar *objects* siguiendo los siguientes pasos *FlexSim (2020)*:

1. Buscar la ventana de *Library* que se encuentra en el panel izquierdo de *Flexsim* (Figura 2. 19).
2. Agregar *objects* al modelo (los más comunes se describieron en la Sección 2.5.2), haciendo clic izquierdo con el *mouse* sobre ellos y arrastrarlos de *Library* al modelo de simulación (Figura 2. 19).

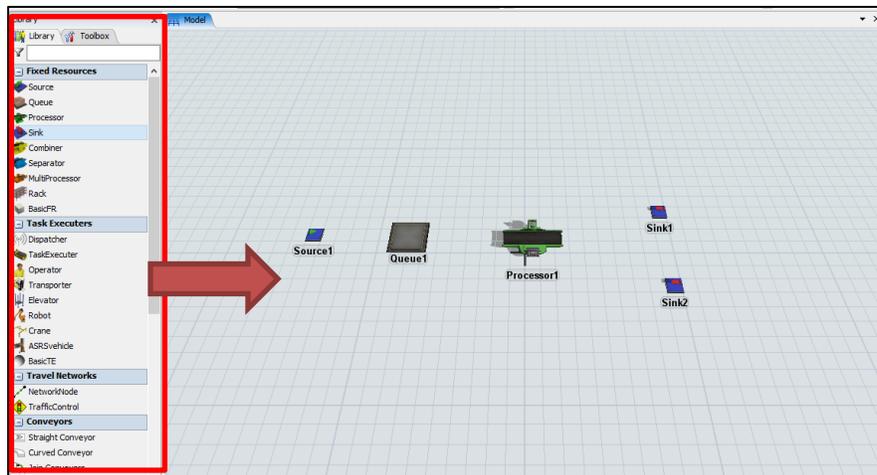


Figura 2. 19 Arrastrar objetos en el modelo de simulación.

2.5.5.2 Editar *objects* del modelo 3D

Los *objects* agregados al modelo de simulación tienen muchas propiedades generales que pueden editarse: nombre, posición, rotación, tamaño, entre otras. Para editarlas se deben hacer los siguientes pasos:

1. Editar nombre de los *objects* realizando lo siguiente:
 - a. Hacer doble clic izquierdo sobre el *object* que se va a editar de nombre.
 - b. Seleccionar la pestaña *Set the Object's name* (Figura 2. 20).
 - c. Editar el nombre.
2. Editar la posición de los *objects* (en los ejes X, Y, Z) realizando lo siguiente:
 - a. Hacer doble clic izquierdo sobre el *object* que se va a mover de posición.
 - b. Seleccionar la pestaña *Visuals* (Figura 2. 20).
 - c. Editar la posición del *object* en los ejes X, Y, Z en la primera fila introduciendo los dígitos de la posición que se requiere, siendo 0, 0, 0 las coordenadas de origen.
3. Editar la rotación de los *objects* (en los ejes X, Y, Z) realizando lo siguiente:
 - a. Hacer doble clic izquierdo sobre el *object* que se va a rotar.
 - b. Seleccionar la pestaña *Visual* (Figura 2. 20).
 - c. Editar la rotación en grados del objeto en los ejes X, Y, Z en la segunda fila introduciendo los dígitos de la rotación en grados que se requiere, siendo 0, 0, 0 las coordenadas de origen.

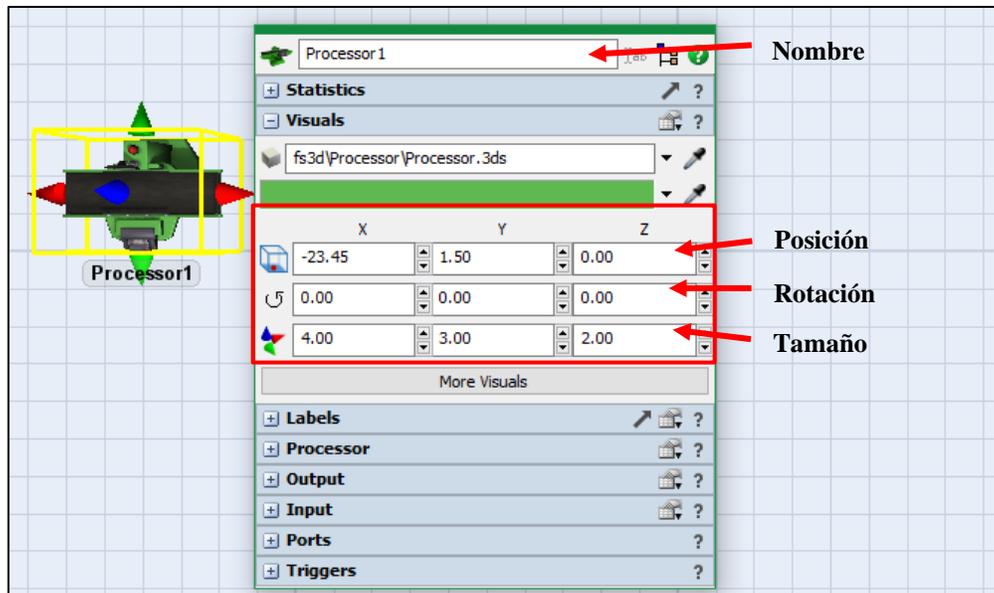


Figura 2. 20 Ventana de General properties.

4. Editar el tamaño de los *objects* (en los ejes X, Y, Z) realizando lo siguiente:
 - a. Hacer doble clic izquierdo sobre el *object* al que se le va a cambiar de tamaño.
 - b. Seleccionar la pestaña *Visuals* (Figura 2. 20).
 - c. Editar el tamaño del *object* en los ejes X, Y, Z en la tercera fila introduciendo los dígitos del tamaño que se requiere. Cada objeto tiene un tamaño definido.

2.5.5.3 Cambiar apariencia de los *objects* 3D

Para cambiar la apariencia de un *object* por otra, se debe tener un archivo de formato (*.3ds) o de formato (*.dae) y se deben seguir los siguientes pasos (Figura 2. 21):

1. Hacer clic izquierdo sobre el *object* al que se le quiere cambiar la apariencia.
2. Desplegar la pestaña *Visuals*, que se muestra en la ventana derecha de *Properties*
3. Buscar la nueva apariencia que se requiere, haciendo clic sobre el triángulo color negro.
4. Seleccionar el nuevo *object* y dar clic en aceptar.

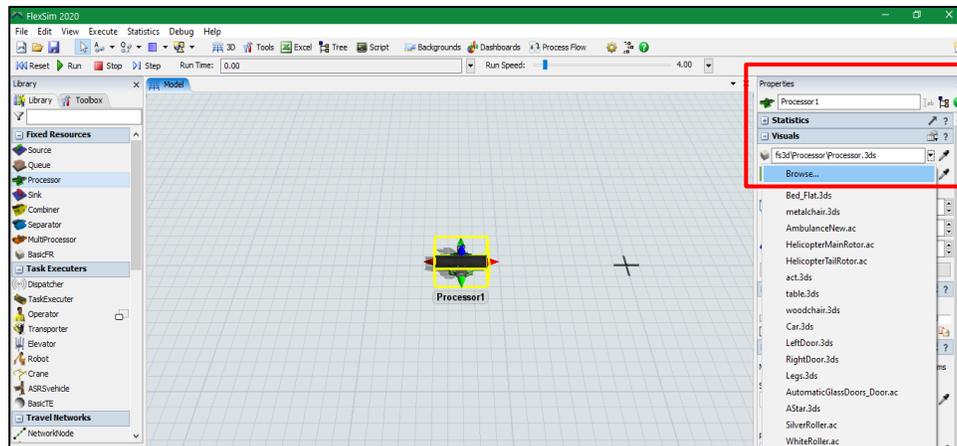


Figura 2. 21 Ventana de propiedades para cambiar apariencia.

2.5.5.4 Conectar los objects 3D

Existen diversas formas para conectar los *objects* en *Flexsim*. Una de ellas es conectar objetos mediante conexiones de puerto (Sección 2.5.4).

Para crear conexiones de puerto de entrada/salida entre *fixed resources*, se realizan los siguientes pasos *FlexSim (2020)*:

1. Hacer clic izquierdo en el botón con el símbolo de una cadena que se encuentra en el menú principal y seleccionar la opción *connect objects A* (Figura 2. 22). Cuando esté en modo de conexión, el puntero del mouse cambiará a un signo de + con el símbolo de eslabón de cadena al lado.

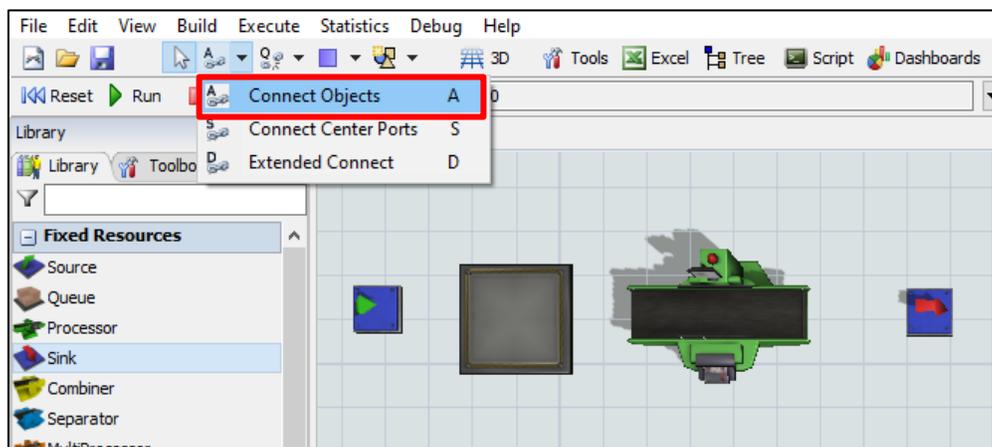


Figura 2. 22 Seleccionar Connect objects A.

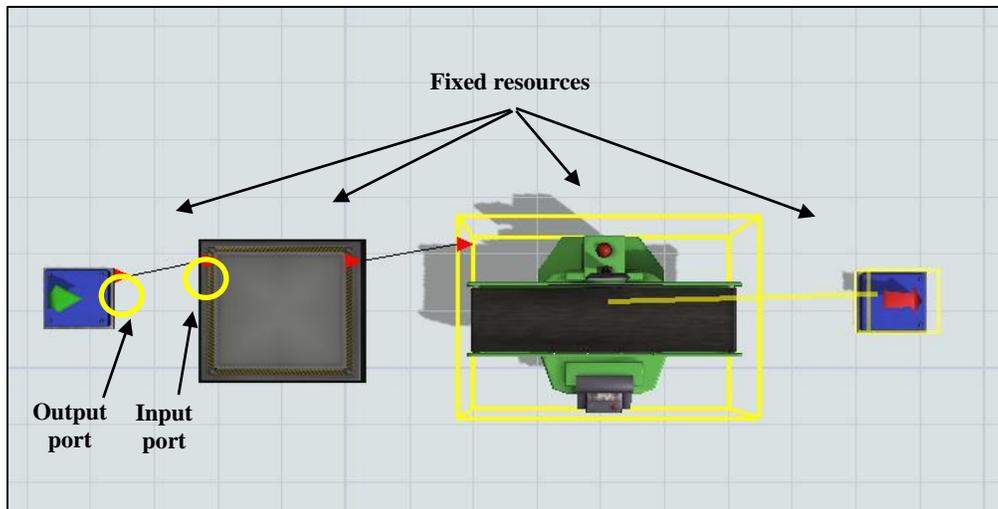


Figura 2. 23 Conectar fixed resources.

2. Hacer clic en el *fixed resource* de origen. Al mover el *mouse*, aparecerá una línea amarilla entre el *fixed resource* y el cursor (Figura 2. 23).
3. Hacer clic en otro *fixed resource* para crear la conexión de puerto entre los dos *fixed resources* y seguir conectando los demás (Figura 2. 23).
4. Presionar la tecla Esc para salir del modo de conexión.

Para crear conexiones de puerto de puerto central entre *fixed resources* y *task executers*, se realizan los siguientes pasos *FlexSim* (2020):

1. Hacer clic izquierdo en el botón con el símbolo de una cadena que se encuentra en el menú principal y seleccionar la opción *connect center ports S* (Figura 2. 24). Cuando esté en modo de conexión, el puntero del mouse cambiará a un signo de + con el símbolo de eslabón de cadena.
2. Hacer clic en un *fixed resource*. Al mover el *mouse*, aparecerá una línea amarilla entre el *fixed resource* que hizo clic y el cursor.
3. Hacer clic en un *task executer* para crear la conexión de puerto central (Figura 2. 25).
4. Presionar la tecla Esc para salir del modo de conexión.

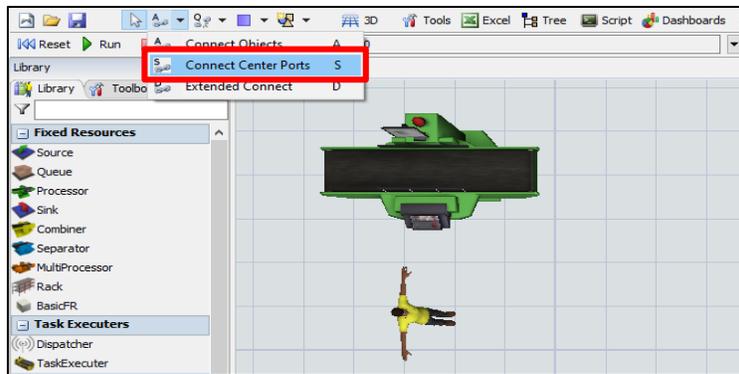


Figura 2. 24 Seleccionar Connect center ports S.

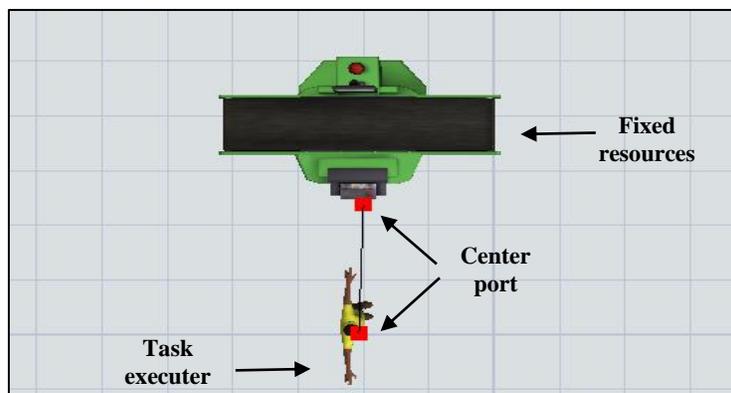


Figura 2. 25 Conectar fixed resources y task executers.

2.5.5.5 Ejecutar un modelo por primera vez

Para ejecutar un modelo y ver qué sucede cuando está en operación se realiza lo siguiente *FlexSim (2020)*:

1. Presionar el botón *Reset* en la barra de simulación, que está justo debajo de la barra de herramientas (Figura 2. 26).
2. Presionar *Run* para iniciar la simulación
3. Presionar *Stop* para pausar la simulación (Figura 2. 26).

En el ejemplo de la Figura 2. 26 se observa que el *source* crea *flow items* (cajas) y los envía a un *queue* donde se almacenan temporalmente, hasta que un *task executor* (operador) lleve las cajas a un *processor*, donde simula que el *flow item* es procesado y después enviado a un *sink* que elimina los *flow items* del modelo de simulación.

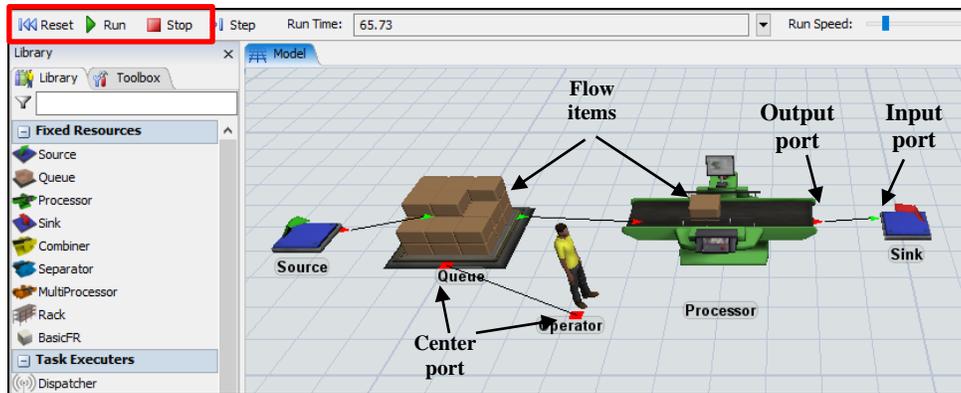


Figura 2. 26 Ejecutar modelo por primera vez.

2.5.6 Expertfit

Expertfit es un *software* que permite determinar de forma automática y precisa qué distribución de probabilidad representa mejor un conjunto de datos obtenidos de observaciones de un sistema real (Law y Associates, 2007).

Expertfit es ampliamente utilizado por analistas que realizan estudios de simulación de eventos discretos de sistemas del mundo real en áreas de aplicación como defensa, fabricación, transporte, atención médica, centros de contacto y redes de comunicaciones.

Para estos usuarios, *Expertfit* tomará la distribución seleccionada y la pondrá en el formato adecuado para la entrada directa a *Flexsim*. También se emplea en disciplinas tan diversas como ciencia actuarial, agricultura, química, economía, análisis ambiental, finanzas, silvicultura, hidrología, medicina, meteorología, minería, simulación de Montecarlo, física, psicología, ingeniería de confiabilidad y análisis de riesgos (Law y Associates, 2020).

2.5.6.1 Características de *Expertfit*

Las características más importantes de *Expertfit* son las siguientes (Law M y Associates, 2020):

- Determina automáticamente y exactamente la mejor distribución de probabilidad para un conjunto de datos en segundos.

- El algoritmo de distribución-selección está basado en 29 años de búsqueda y en la experimentación con 35,000 conjuntos de datos.
- Provee una evaluación absoluta de la “mejor” distribución.
- El modo estándar contiene características suficientes para el 95 por ciento de todos los análisis y centra al usuario sobre las características que son realmente importantes.
- Tamaños de muestra de 10 hasta 100,000 observaciones.
- Brinda acceso a 40 distribuciones de probabilidad.
- La distribución elegida es proporcionada en el formato correcto para la entrada directa a 21 *software* de simulación.
- Pruebas de bondad de ajuste Chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling.
- Ofrece más de 30 gráficas de alta calidad de sus datos.
- Permite graficar cualquier número de distribuciones en el mismo gráfico, haciendo las comparaciones fáciles.
- Los histogramas pueden ser actualizados interactivamente.
- Generación de valores aleatorios de cualquier distribución.
- El visualizador de distribución permite interactivamente ver características de una distribución sin ingresar los datos.
- La capacidad del modo lote permite al usuario analizar un gran número de conjuntos de datos.
- Módulo para determinar si el conjunto de datos “similares” son homogéneos y, por tanto, pueden ser mezclados.
- Ayuda a elegir una distribución en ausencia de datos, incluidos modelos para fallas aleatorias de equipos

2.5.6.2 Distribuciones de probabilidad de *Expertfit*

Hay dos tipos principales de distribuciones de probabilidad disponibles en *Expertfit* (Law y Associates, 2020): distribuciones discretas y distribuciones continuas.

Distribución discreta

Una distribución discreta es aquella que toma un número finito de valores $0, 1, \dots, i$, o un número contable de valores $0, 1, 2, \dots$. Sea X una variable aleatoria discreta. La probabilidad de que X tome el valor x viene dada por la función de masa de probabilidad $p(x)$. La función $p(x)$ toma valores entre 0 y 1 (es decir, es una probabilidad) y su suma sobre todos los valores de x es 1. La Tabla 2. 22 muestra las ocho distribuciones discretas disponibles en *Expertfit*, incluidos sus parámetros y rangos (Law y Associates, 2020):

Tabla 2. 22 Distribuciones discretas de *Expertfit*.

Distribución	Parámetros
Bernoulli	p
Binomial	t, p
Geométrica	p
Hiper geométrica	N, s, n
Series logarítmicas	α
Binomial negativo	s, p
Poisson	λ
Uniforme (discreta)	i, j

Distribución continua

Una distribución continua es aquella que puede tomar cualquier valor en algún intervalo, como $[0, \infty)$ (números reales no negativos) o $[a, b]$ para $a < b$. Sea X una variable aleatoria continua. Entonces X tiene una función de densidad de probabilidad $f(x)$, que no es negativa y se integra a 1. La función de densidad $f(x)$ no es la probabilidad de que X tome el valor x . Sin embargo, es más probable que X caiga en un intervalo por encima del cual $f(x)$ es "grande" que en un intervalo del mismo ancho por encima del cual $f(x)$ es "pequeño" (Law y Associates, 2020).

Cada distribución continua en *Expertfit* tiene uno o más parámetros, que pueden clasificarse, con base en su interpretación física o geométrica, como uno de los tres tipos básicos: ubicación (gama), escala (beta) o parámetros de forma Alpha).

Hay treinta y dos distribuciones continuas en *Expertfit*, que se dividen en tres categorías (Law y Associates, 2020):

- **Acotada:** es aquella que puede tomar cualquier valor en un intervalo finito (a, b). La Tabla 2. 23 muestra las cinco distribuciones acotadas disponibles en *Expertfit* y sus parámetros.

Tabla 2. 23 Distribuciones continuas acotadas de *Expertfit*.

Distribución	Parámetros
Beta	a, b, α_1, α_2
Johnson SB	a, b, α_1, α_2
Triangular	a, b, m
Función de potencia	a, b, α
Uniforme	a, b

- **No negativa:** es aquella que puede tomar cualquier valor mayor que su parámetro de ubicación γ (es decir, $X - \gamma$ es positivo) y, por lo tanto, tiene un rango de (γ, ∞) . La Tabla 2. 24 muestra las diecisiete distribuciones no negativas disponibles en *Expertfit*.

Tabla 2. 24 Distribuciones continuas no negativas de *Expertfit*.

Distribución	Parámetros
Chi cuadrada	γ, g, l
Erlang	γ, β, α
Exponencial	γ, β
F	g, l_1, g, l
Gamma	γ, β, α
Gauss inverso	γ, β, α
Weibull inversa	γ, β, α
Log-Laplace	γ, β, α
Log-Logistic	γ, β, α
Log-normal	γ, β, α
Pareto	γ, β
Pearson tipo V	γ, β, α
Pearson tipo VI	$\gamma, \beta, \alpha_1, \alpha_2$
Random walk	γ, β, α
Rayleigh	γ, β
Weibull	γ, β, α

- **Ilimitada:** es aquella que puede tomar cualquier número real y , por lo tanto, tiene un rango de $(-\infty, \infty)$. La Tabla 2. 25 muestra las diez distribuciones ilimitadas disponibles en *Expertfit* y sus parámetros.

Tabla 2. 25 Distribuciones continuas ilimitadas de *Expertfit*.

Distribución	Parámetros
Cauchy	γ, β
Error	
Poder exponencial	γ, β, α
Valor extremo tipo A	γ, β
Valor extremo tipo B	γ, β
Johnson SU	$\gamma, \beta, \alpha_1, \alpha_2$
Laplace	γ, β
Logístico	γ, β
Normal	γ, β
T de <i>student</i>	g, l

2.5.6.3 Pruebas de bondad de *Expertfit*

La siguiente es una breve discusión de las tres pruebas de bondad de ajuste disponibles en *Expertfit* (Law y Associates, 2020):

- **Prueba de chi-cuadrada:** Es aplicable a distribuciones continuas y discretas, siempre que los parámetros de la distribución ajustada se estimen mediante el método de máxima verosimilitud. Puede realizarse con intervalos de igual probabilidad o igual ancho, y se recomienda el primer enfoque para distribuciones continuas. No existe una prescripción definida para elegir los intervalos de prueba, lo cual es un gran inconveniente de la prueba. En algunas situaciones, se pueden llegar a conclusiones completamente diferentes a partir del mismo conjunto de datos, dependiendo de cómo se especifiquen los intervalos.
- **Prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S):** Sólo es aplicable a ciertas distribuciones continuas: error, exponencial, valor extremo tipo A, valor extremo tipo B, Weibull invertido, log-logístico, logístico, lognormal, normal, Rayleigh y Weibull. (Para las distribuciones no negativas, el parámetro de ubicación no se puede estimar a partir de

los datos). Por otro lado, la prueba K-S no tiene la especificación de intervalo problemático de la prueba chi-cuadrado y, a menudo, es más poderosa.

- **Prueba de Anderson-Darling (A-D):** Es aplicable a las mismas distribuciones continuas que la prueba K-S, así como a las distribuciones de Erlang, gamma, Pearson tipo V, Laplace y log-Laplace. (Para las distribuciones no negativas, el parámetro de ubicación no puede estimarse a partir de los datos). A menudo es algo más poderosa que la prueba K-S. La estadística de la prueba A-D pone mayor énfasis en las colas de una distribución, ésta es la razón de su mayor poder.

2.5.6.4 Uso de *Expertfit*

Para determinar la distribución de probabilidad a la que se ajusta a un conjunto de datos mediante *Expertfit*, se deben realizar los siguientes pasos (Law y Associates, 2020):

1. Abrir el *software Expertfit*. Para abrir *Expertfit* se debe realizar lo siguiente:
 - a. Abrir el *software Flexsim*.
 - b. Seleccionar la opción *New model*.
 - c. Configurar las unidades del modelo (*Model Units*) y dar clic sobre *OK*.
 - d. Abrir la pestaña *Statics* del menú de *Flexsim* y seleccionar la opción *Expertfit* (Figura 2. 27).

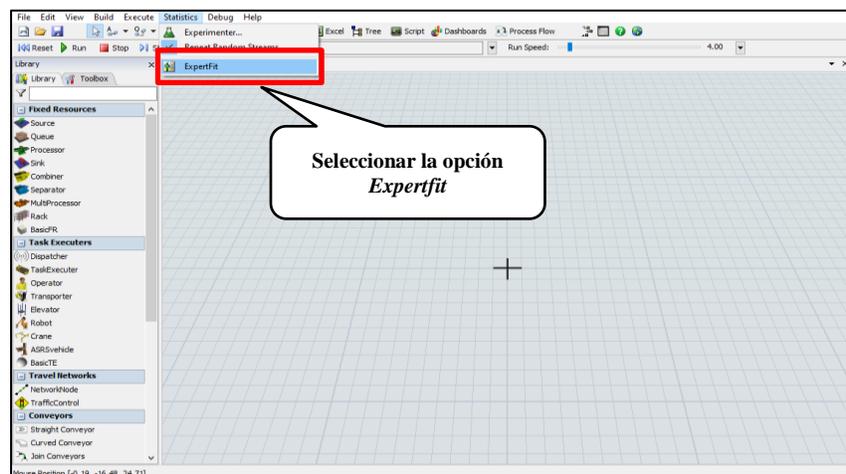


Figura 2. 27 Abrir el *software Expertfit*.

2. Crear un nuevo proyecto en *ExpertFit*. Para crear un nuevo proyecto dentro de *ExpertFit* se debe realizar lo siguiente:
 - a. Dar clic sobre el botón *New* (Figura 2. 28).

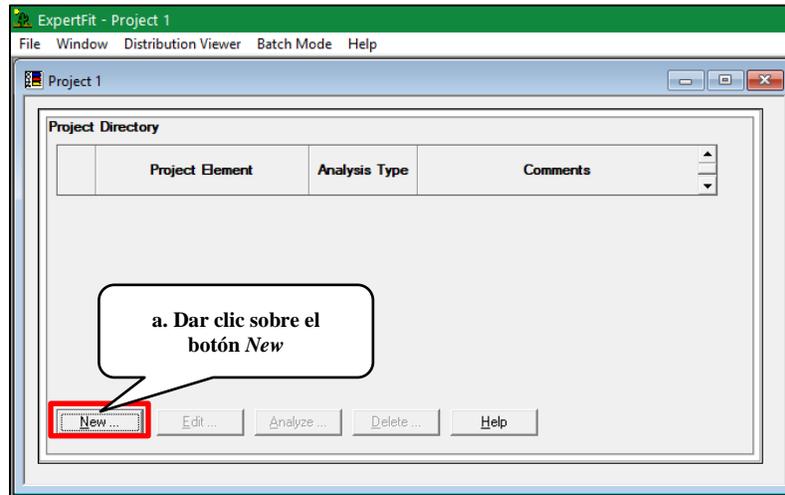


Figura 2. 28 Crear nuevo proyecto Expertfit.

- b. Anotar el nombre del proyecto (Figura 2. 29).
- c. Seleccionar la opción *Fit distribution data* (Figura 2. 29).
- d. Anotar algún comentario del proyecto (Figura 2. 29).
- e. Oprimir el botón de *OK* (Figura 2. 29).

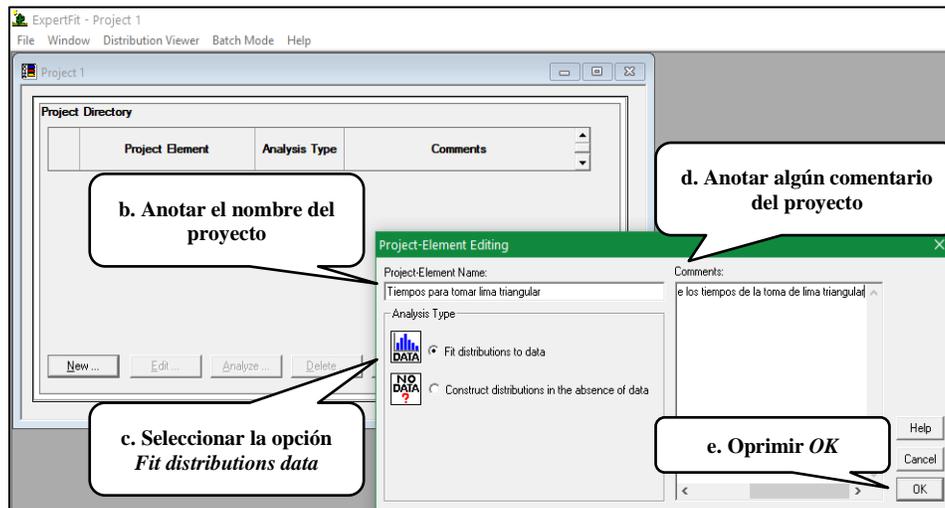


Figura 2. 29 Ventana de Project-Element Editing de Expertfit.

3. Introducir los datos al proyecto. La introducción de los datos se puede hacer de dos formas: introduciendo los datos uno a uno o copiando los datos desde una hoja de cálculo; lo más usual es copiar desde una hoja de cálculo mediante los siguientes pasos:
 - a. Dar doble clic con el botón izquierdo del *mouse* en el icono *DATA* (Figura 2. 30). Aparecerá una ventana llamada *Data Analysis*.
 - b. Oprimir el botón *Enter data* (Figura 2. 30).

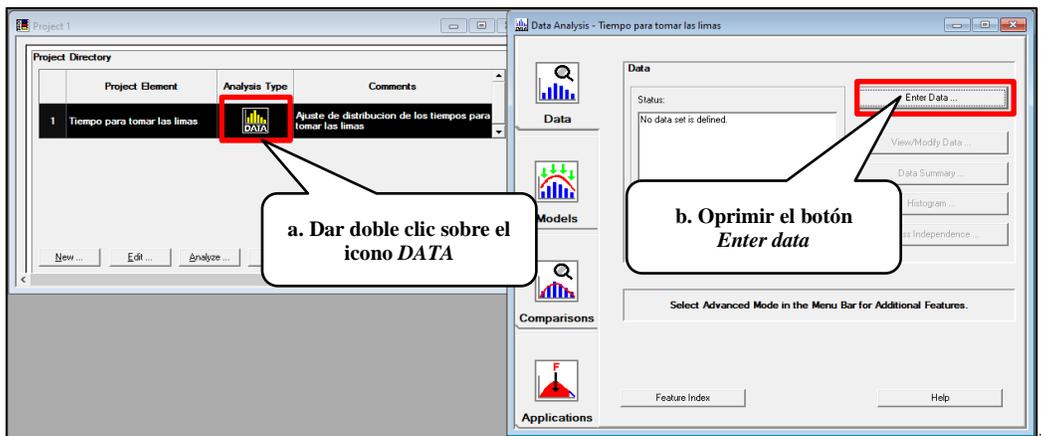


Figura 2. 30 Ventana de Project Directory y de Data Analysis.

- c. Seleccionar *Enter/Edit Data Values* en la ventana *Enter-Data Options* (Figura 2. 31).
 - d. Dar clic sobre el botón *Apply* (Figura 2. 31).

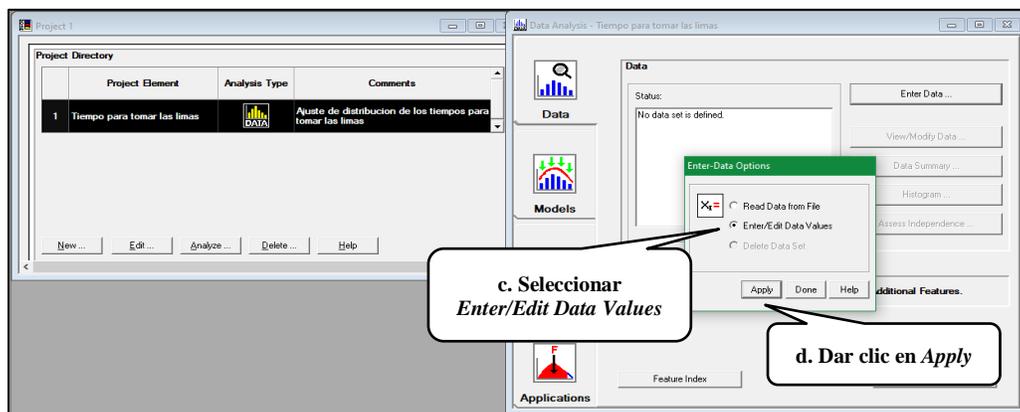


Figura 2. 31 Ventana de Enter-Data Options.

- e. Abrir la hoja de cálculo, en la cual se encuentran los datos a ser analizados, seleccionarlos (Figura 2. 32), y oprimir el comando copiar (Ctrl+C) para copiar los datos al portapapeles de *Windows*.

	A	B	C	D	E	F
13						
		Dato	Tomar lima y acomodarla en la máquina	Rectificar por primera vez	Voltear lima por primera vez	Rectificar por segunda vez
14		1	9	16.55	9.73	40.75
15		2	8.83	18.34	8.88	41.14
16		3	7.42	17.98	9.17	41.14
17		4	17.31	16.1	14.64	37.22
18		5	16.55	13.56	14.13	40.03
19		6	18.95			37.23
20		7	13.19			38.33
21		8	11.45			45.77
22		9	10.85			48.91
23		10	9.54	21.07	5.14	44.77
24		11	14.16	22.34	4.57	45.5
25		12	13.61	22.39	3.99	44.35
26		13	37.43	23.08	27.52	32.85
27		14	32.6	23.59	66.05	36.66
28		15	20.76	13.3	3.65	33.1
29		16	8.78	14.05	5.2	47.1
30		17	10.75	21.99	16.04	38.06
31		18	8.02	15.1	10.47	42.04
32		19	14.08	17.59	23.58	41.01
33		20	14.59	18.64	9.88	40.56
34		21	13.51	19.21	22.41	39.82
35						

Figura 2. 32 Hoja de cálculo con los datos a analizar.

- f. Seleccionar el botón de *Paste at End form Clipboard* (Figura 2. 33).
 g. Verificar que los datos que fueron copiados sean los correctos (Figura 2. 33).
 h. Dar clic en el botón de *OK* (Figura 2. 33).

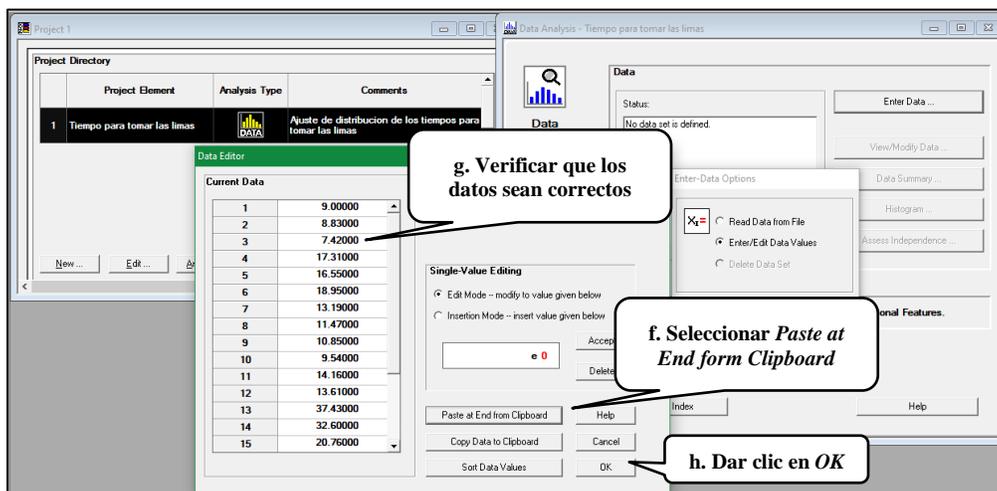


Figura 2. 33 Ventana de Data Editor.

- i. Dar clic al botón *Done* en la ventana *Data Summary Table* (Figura 2. 34).

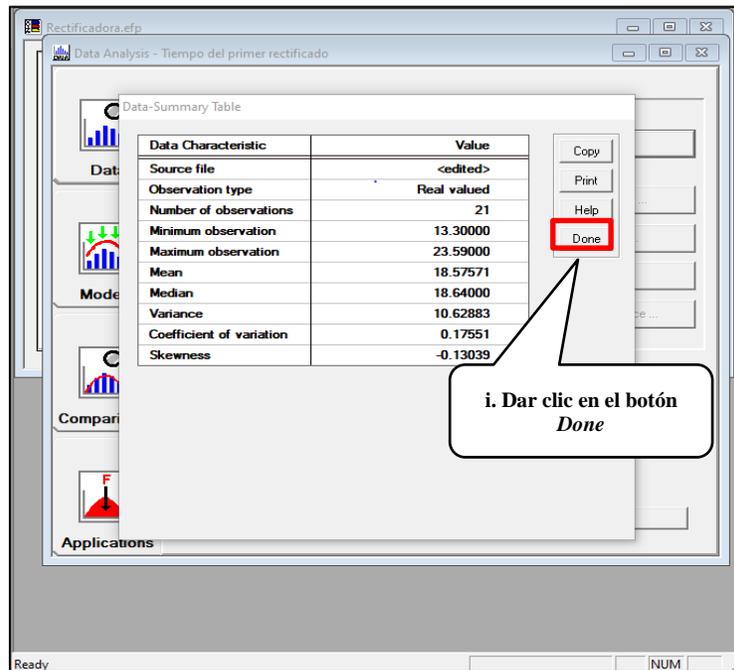


Figura 2. 34 Ventana de *Data-Summary Table*.

4. Realizar el ajuste de los datos. Con los datos ya introducidos a *Expertfit* se procede a ajustar los datos:
 - a. Seleccionar el icono *Models*.
 - b. Dar clic sobre el botón *Automated Fitting* (Figura 2. 35).

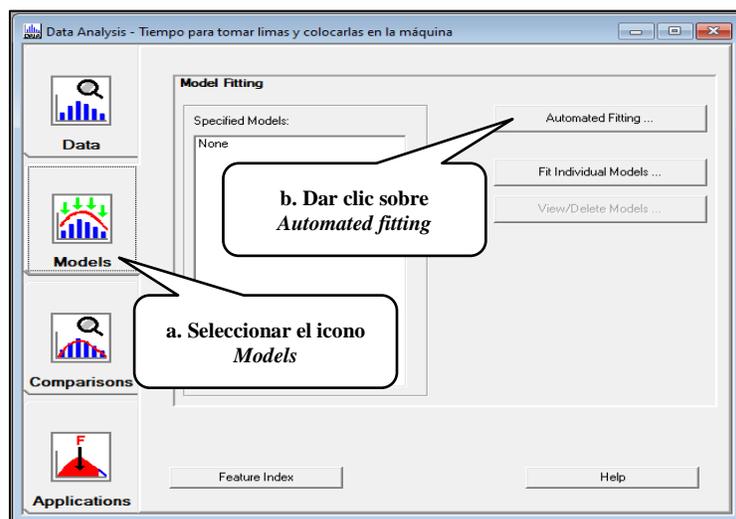


Figura 2. 35 Ventana de *Data Analyses*, pestaña de *Models*.

5. Observar las distribuciones de probabilidad propuestas. En la ventana *Automated Fitting Results* (Figura 2. 36) se muestran los siguientes elementos:
 - a. En el recuadro *Relative Evaluation of Candidate Models* se muestran los modelos que se ajustan con una mayor puntuación. Se indica el nombre de los modelos de distribución de probabilidad, la puntuación relativa de cada modelo y los parámetros que forman parte del modelo de cada distribución de probabilidad.
 - b. En los recuadros *Absolute Evaluation of model* y *Additional Information* se muestra la evaluación, sugerencias e información adicional del modelo de distribución de probabilidad que tiene una mayor puntuación.
6. Dar clic sobre el botón *Done* (Figura 2. 36) para cerrar la ventana *Automated Fitting Results*.

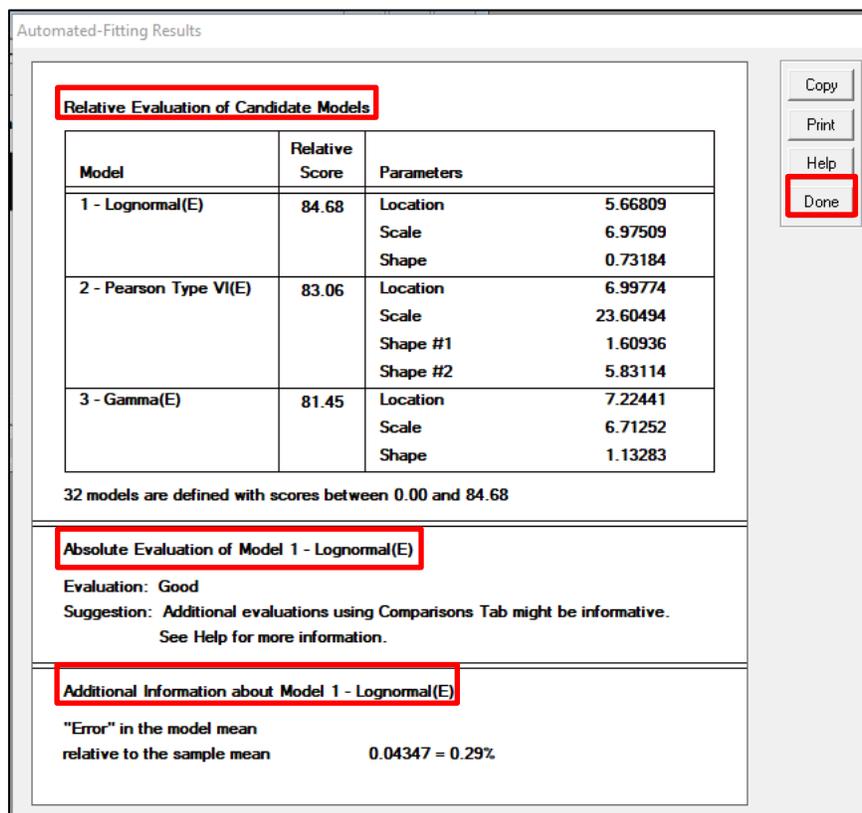


Figura 2. 36 Ventana de Automated-Fitting Results.

7. Obtener la representación de la distribución de probabilidad elegida para *Flexsim* realizando los siguientes pasos: a) Ir al icono *Applications* y seleccionar la distribución, b) Dar clic en *Simulation Representation*, c) Seleccionar el *software* de simulación y d) Dar clic sobre el botón *Apply*, como se muestra en la Figura 2. 37.

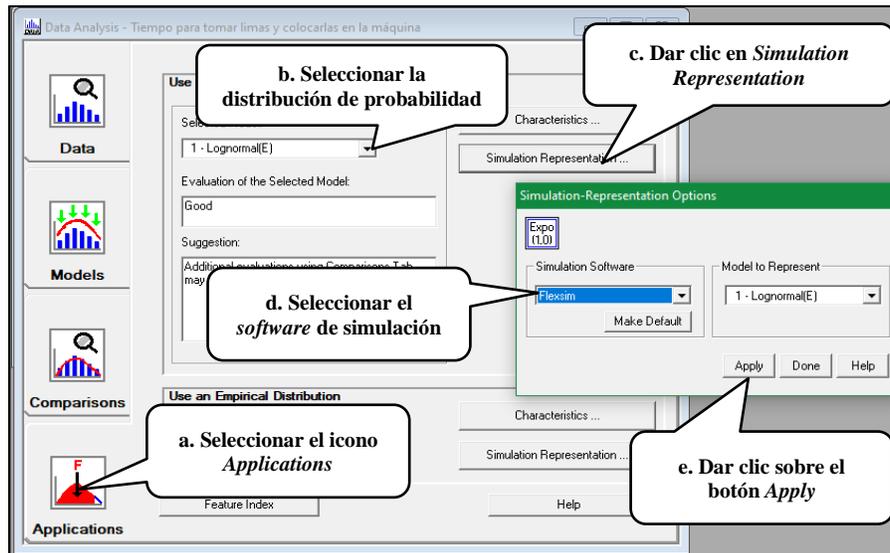


Figura 2. 37 Ventana de Simulation-Representation Options.

- Continuando con el paso siete, se realiza lo siguiente: e) Dar clic sobre la primera columna, f) Seleccionar el botón *Copy* y g) Seleccionar el botón *OK*, como se muestra en la Figura 2. 38.

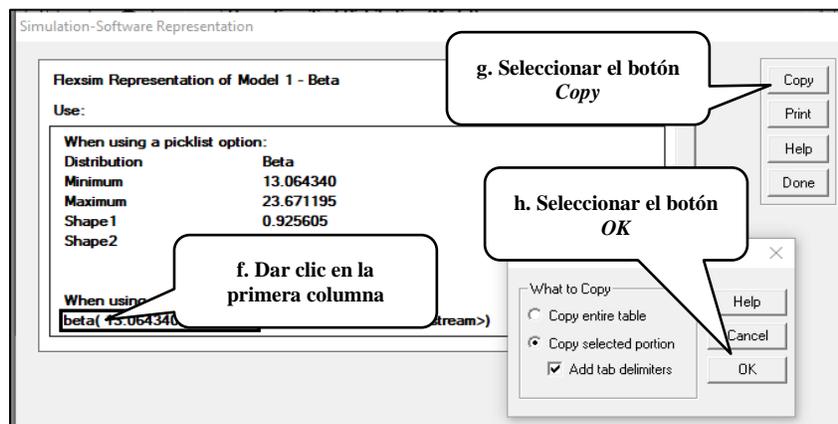


Figura 2. 38 Ventana de Simulation-Software Representation.

2.6 Diseño Asistido por Computadora (CAD)

El diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés de *Computer Aided Design*) implica el uso de computadoras para crear dibujos y modelos de producto. El CAD suele asociarse con gráficas interactivas en computadora, y por esto se conoce como sistema CAD. El sistema CAD es una técnica poderosa que se usa en el diseño mecánico y en el modelado geométrico de productos y componentes (Kalpakjian & Steven, 2002).

2.6.1 Etapas del CAD

Para crear elementos en un *software* de diseño asistido por computadora diversos autores concuerdan que consta de cuatro etapas, las cuales se muestran a continuación (Cañongo, Mena, & Solar, 2014):

1. Modelado geométrico. Éste se describe como forma matemática o analítica a un objeto físico donde el diseñador construye un modelo geométrico emitiendo comandos que crean líneas, superficies, cuerpos, dimensiones y texto; los comandos introducidos dan origen a una representación exacta en dos o tres dimensiones del objeto. El representado en línea abarca todas las aristas del modelo que se pueden considerar como líneas llenas dando como resultado una imagen ambigua ya que algunas veces las formas son complicadas y para facilitarlos se pueden usar los colores para distinguir las líneas de las piezas y tener una mejor visualización.
2. Análisis y optimización del diseño. Después de haber determinado las propiedades geométricas, se analiza el modelo virtual para rectificar que no haya errores en el modelado (dimensiones, formas, etc.).
3. Revisión y evaluación del diseño. En esta etapa se comprueba si existen interferencias entre componentes de cierto mecanismo que impidan su correcto funcionamiento o deficiencias estructurales en el caso de cuerpos sólidos. Esta etapa es de gran utilidad, ya que ayuda a evitar problemas posteriores en la producción del producto, ya sea en el ensamble o en el uso de la pieza. Existen programas de animación y simulación dinámica para el cálculo y análisis de las propiedades físicas (esfuerzos, deformaciones, deflexiones, vibraciones) de los objetos que ayudan a determinar si el objeto cumple con los requerimientos de diseño y de manufactura.

4. Documentación y dibujo (*drafting*). Por último, en esta etapa se realizan planos técnicos de trabajo. Se representan diferentes vistas de la pieza, a escala, incluyendo perspectivas. Además de planos del diseño, la documentación puede incluir una memoria descriptiva con aspectos no gráficos que sean necesarios para su manufactura, esta clase de datos se suelen agregar en el pie del plano.

2.6.2 Ventajas del CAD

Las tecnologías CAD son muy útiles al momento de crear un diseño u producto, es por eso que las ventajas que se tienen al utilizar un *software* CAD se muestran a continuación (Cañongo et al., 2014):

- Es más fácil y práctico trabajar con un *software* CAD que hacer los diseños a mano. Se ahorra tiempo y es más sencillo.
- Permite intercambiar información no sólo en papel, sino mediante archivos, y eso representa una mejora en la rapidez y efectividad a la hora de interpretar diseños.
- Los *softwares* CAD cuentan con herramientas para que los diseños sean perfectos, tanto en estética como en información ya que el acabado y la presentación de un proyecto o plano es importante.
- Es posible dibujar tanto en 3D como en 2D. A partir de un dibujo en 2D (dibujo plano), existe la posibilidad de generar el modelo 3D en un tiempo mucho menor que el tiempo que se emplea en dibujar un isométrico o una perspectiva a mano.
- Se ha convertido en un estándar en el diseño por ordenador debido a que es muy versátil, pudiendo ampliar el programa base mediante programación,
- Menor tiempo de trabajo. Productividad al dibujar.
- Práctico con respecto a la facilidad de realizar modificaciones.
- Su campo de aplicación es amplio. Se utiliza en ramas como: arquitectura, industria civil, electrónica, electromecánica, química, petrolífera, técnica, entre otras

2.6.3 Mastercam

Mastercam ofrece herramientas de *software* CAD / CAM para una variedad de necesidades de programación de Control Numérico por Computadora (CNC), desde básicas hasta

complejas. Debido a las soluciones innovadoras y flexibles de su red de soporte de primer nivel, su *software* es una solución completa desde el inicio del diseño hasta la fabricación.

El *software* CAD se utiliza para diseñar piezas, accesorios y ensamblajes. Se puede utilizar para crear piezas desde cero, modificar diseños existentes o preparar piezas para el mecanizado. El *software* CAM se utiliza para programar trayectorias de herramientas y generar el código G que controla las máquinas CNC como fresadoras, enrutadores, tornos y electroerosiones por hilo. El *software* CAD / CAM, como *Mastercam*, se utiliza para llevar las piezas desde el diseño hasta la producción dentro de una única interfaz fácil de usar (CNC *Software*, 2020).

2.6.3.1 Tipos de archivos compatibles con *Mastercam*

Una ventaja notable de CAD para CAM integrado es la capacidad de importar archivos desde prácticamente cualquier fuente de diseño asistida por computadora. *Mastercam* incluye una gran selección de importadores de modelos CAD, por lo que no importa dónde se haya creado un modelo, puede importar y modificar según sea necesario para sus fines de mecanizado. *Mastercam* puede leer archivos usar (CNC *Software*, 2020):

- CAD de ASCII.
- CADL.
- DWG.
- DXF.
- EPS.
- IGES.
- Inventor (IPT, IDW, IAM).
- 3DM.
- SOLIDWORKS (SLDPRT, SLDASM, SLDDRW).
- SAT (ACIS sólidos).
- Solid Edge (PAR & PSM).
- STL.
- VDA.

2.6.3.2 Módulos de *Mastercam*

Mastercam es un *software* que proporciona funcionalidad CAD y CAM para manejar máquinas CNC de manera eficiente para optimizar la productividad. El *software* CAD / CAM controla máquinas CNC como: fresadoras, enrutadores, tornos y electroerosiones por hilo. *Mastercam* se compone por los siguientes módulos (CNC *Software*, 2020):

- **Módulo de diseño (*Design*).** Poderoso CAD modelador de sólidos 3D y superficies diseñado para programadores CAM. Incluido en *Mastercam Mill, Lathe, Router* y *Wire*. Algunas de sus características son:
 - Estructura alámbrica. Incluye todo lo que necesita para la creación y edición de líneas, arcos, *splines* y puntos. Más allá de la creación de bocetos 2D, las capacidades 3D ofrecen una flexibilidad ilimitada para crear la geometría que se necesita con facilidad.
 - Superficies. El modelado de superficies es una manera excelente de crear, editar y mostrar formas, desde superficies simples de revolución hasta formas orgánicas complejas que no se pueden hacer fácilmente con *wireframe*. *Mastercam* ofrece un poderoso conjunto de herramientas de diseño de superficies para un control directo sobre cada detalle de su trabajo.
 - Sólidos de edición directa. Este conjunto de herramientas que se encuentra en la cinta *Model Prep* permite modificar sólidos que no tienen historial para editar. Puede seleccionar caras de un cuerpo sólido para cambiar la longitud, puede modificar el radio de los empalmes o eliminarlos todos juntos.
- **Módulo de fresado (*Mill*).** Programación CAD/CAM de 2½ a 5 ejes. Optimiza las trayectorias de fresado gracias a la exclusiva tecnología *Dynamic Motion*. Algunas de sus características son:
 - *Dynamic Motion*. Extienda la vida útil de la herramienta con estrategias de trayectoria patentadas que maximizan la tasa de remoción de material y reducen los tiempos de ciclo.
 - Acabado Acelerado. Aprovecha las herramientas y los procesos de perfil innovadores destinados a una mayor eficiencia y una mayor productividad de mecanizado.

- Trayectorias avanzadas. Reduce los costos y el tiempo de programación con trayectorias de herramientas avanzadas como *Desbarbar* e *Igual Scallop*.
- **Módulo de torno (*Lathe*)**. Torneado en 2 ejes, con herramienta viva o con eje C y Y, mediante trayectorias asociativas basadas en la verificación del modelo. Algunas de sus características son:
 - Desbaste inteligente de ID y OD. Incluye desbaste hasta un límite para piezas fundidas.
 - Herramientas en vivo. Mecaniza cualquier trabajo con la potencia combinada del mecanizado de los ejes C e Y.
 - Inspección de herramientas. Detiene automáticamente el mecanizado para comprobar la plaquita durante sus operaciones de desbaste, acabado y ranurado.
- **Módulo de enrutador (*Router*)**. CAD/CAM asociativo diseñado para *routers*. Programación de 2 a 5 ejes, barrenos múltiples y soporte para cabezales. Algunas de sus características son:
 - Simulación de máquina. Detecta colisiones entre sus existencias, herramientas y componentes de la máquina antes de enviar el código a la máquina herramienta. La simulación de máquina es una forma segura de probar trayectorias de herramientas de enrutador de 3, 4 o 5 ejes para crear programas limpios, eficientes y precisos.
 - Opciones de anidamiento. El anidamiento estándar ofrece una forma rápida, eficiente y fácilmente identificable de anidar. El anidamiento avanzado brinda una variedad de herramientas adicionales.
 - Grabado CNC. Puede crear letreros, tallas artísticas, moldes y más.

2.6.3.3 Requerimientos mínimos de hardware

Cualquier *software* necesita de requerimientos mínimos en el equipo de cómputo (*hardware*) para trabajar adecuadamente. El *software Mastercam* no es la excepción y las especificaciones recomendadas por el desarrollador y mínimas requeridas para que *Mastercam* funcione adecuadamente se muestran en la Tabla 2. 26.

Tabla 2. 26 Requerimientos mínimos de Mastercam (CNC Software, 2020)

<i>Hardware</i>	Mínimo	Recomendado
LA	Windows 10 profesional de 64 bits	Windows 10 (versión 1903 o posterior) de 64 bits Professional
Procesador	Procesador Intel o AMD de 64 bits, 2.4 GHz o más.	Intel i7 o Xeon E3, 3.2 GHz o más
Memoria	8 GB	32 GB
Video	Compatibilidad con Open GL 3.2 y OpenCL 1.2 con 1 GB de memoria. Sin gráficos integrados.	Tarjeta NVIDIA Quadro o AMD FirePro Radeon Pro con memoria dedicada de 4GB (o más)
Monitor	Resolución 1920 x 1080	Resolución 1920 x 1080, monitores duales
Almacenamiento	Disco duro con al menos 20 GB libres de USB y/o unidad de DVD (según el medio de instalación y el método de licencia).	Unidad de estado sólido (SSD) con al menos 20 GB libres
Ratón 3D		Ratón 3D de 3Dconnexion

2.7 Prueba de hipótesis

En la actualidad, la gran mayoría de los problemas de ingeniería, ciencia y administración requieren la aceptación o el rechazo sobre la proposición de algún parámetro en particular. Partiendo de esta afirmación, el nombre de "hipótesis" se le asigna a la proposición en cuestión. El procedimiento mediante el cual se toma la decisión de rechazar o aceptar dicha proposición se denomina "prueba de hipótesis" (Hines y Montgomery, 1996).

Una definición exacta de lo que se entiende por "prueba de hipótesis estadística" es la siguiente (Canavos, 1988):

“Una prueba de una hipótesis estadística con respecto a alguna característica desconocida de la población de interés es cualquier regla para decidir si se rechaza la hipótesis nula con base en una muestra aleatoria de la población”.

La prueba de hipótesis suele comenzar con alguna teoría, afirmación o aseveración sobre un parámetro específico de una población. En el planteamiento existen dos hipótesis: una hipótesis nula denotada por H_0 y una hipótesis alternativa denotada por H_1 que es opuesta a

la hipótesis nula. La hipótesis alternativa representa la conclusión obtenida al rechazar la hipótesis nula.

En la metodología de prueba de hipótesis, la hipótesis nula se rechaza cuando la evidencia muestral sugiere que es más probable la hipótesis alternativa. Cuando a partir de la información de la muestra existe suficiente evidencia de que es falsa, se rechaza la hipótesis nula.

La verdad o falsedad de una hipótesis alternativa nunca se sabe con absoluta certeza, a menos que se examine toda la población, esto por supuesto es poco práctico. En su lugar, se toma una muestra aleatoria de la población de interés y se utilizan los datos contenidos de esa muestra para proporcionar que apoye o no la hipótesis. La evidencia de la muestra que es inconsistente con la hipótesis conduce al rechazo de ésta, mientras que la evidencia que la apoya conduce a su aceptación. Sin embargo, debe quedar claro que la aceptación de una hipótesis simplemente implica que los datos estudiados no proporcionaron suficiente evidencia para rechazarla. Por otro lado, implica que la evidencia muestral la refuta. Puesto de otra forma, el rechazo significa que existe una pequeña probabilidad de obtener la información muestral observada, cuando de hecho, la hipótesis es verdadera (Walpole et al., 1999).

A grandes rasgos las pruebas de hipótesis se dividen en (Hines y Montgomery, 1996):

- Pruebas de hipótesis para una población:
 - Para una media con varianza conocida.
 - Para una media con varianza desconocida.
 - Para varianzas.
 - Para una proporción.
- Pruebas de hipótesis para dos poblaciones:
 - Para comparación de medias con varianzas conocidas.
 - Para comparación de medias con varianzas desconocidas.
 - Para comparación de varianzas.
 - Diseño de experimentos.

- Para comparación de proporciones.

En la Sección 2.7.3 se explicarán las pruebas de hipótesis para la comparación de medias con varianzas conocidas, ya que ésta se utilizará para validar los resultados obtenidos del presente trabajo.

2.7.1 Hipótesis nula y alternativa

La estructura de una hipótesis estadística se formula con el uso del término "hipótesis nula", la cual representa cualquier hipótesis que se quiera probar y se denota con H_0 . Por otro lado, cuando H_0 es rechazada, de forma automática se acepta una hipótesis alternativa simbolizada por H_1 , la cual regularmente expresa lo contrario a la H_0 (Walpole et al., 1999).

Para determinar cuál hipótesis se debe establecer como H_0 , y cual como H_1 , se debe prestar atención a la afirmación de la hipótesis que se quiere probar; si la afirmación sugiere una sola dirección como "mayor que", "menor que", "superior a" e "inferior a", entonces H_1 se debe establecer con el uso del símbolo de desigualdad que corresponda ($<$ ó $>$). Alternativamente si la afirmación no sugiere ninguna dirección, entonces H_1 se establece con el signo "diferente" (\neq).

2.7.2 Errores tipo I y tipo II en una prueba de hipótesis

La decisión de aceptar o rechazar una hipótesis nula se basa en el cálculo de un estadístico de prueba obtenido a partir de los datos de una muestra aleatoria. Por tal motivo, la decisión que se tome a partir de ésta está sujeta a un error estadístico, el cual está clasificado en dos tipos (Hines y Montgomery, 1996):

- Error tipo I. Ocurre cuando se rechaza la hipótesis nula cuando ésta es verdadera.
- Error tipo II. Ocurre cuando se acepta la hipótesis nula cuando ésta es falsa.

Al probar cualquier hipótesis estadística, hay cuatro situaciones posibles que determinan si la decisión es correcta o errónea. Estas cuatro situaciones se resumen en la Tabla 2. 27.

Tabla 2. 27 Situaciones posibles al probar una hipótesis (Walpole et al., 1999).

	H_0 es verdadera	H_1 es verdadera
Aceptar H_0	Decisión correcta	Error tipo II
Aceptar H_1	Error tipo I	Decisión correcta

La probabilidad de cometer un error tipo I, también llamada nivel de significancia, se denota con la letra griega α . Algunas veces al nivel de significancia se le llama tamaño de la región de rechazo (Walpole et al., 1999).

La región de rechazo, llamada región crítica, especifica el rango de números que provocarán que H_0 sea rechazada en caso de que el estadístico de la prueba caiga en esta región. Es definida antes de que se tome la muestra, de tal forma que el estadístico de la prueba tendrá una probabilidad de α de caer en la región de rechazo, si la hipótesis nula es verdadera.

Por otra parte, la región de aceptación es el rango de valores que provocarán que no sea rechazada la hipótesis nula (H_0) si el estadístico de la prueba cae dentro de esta región. La región de aceptación se define, antes de que la muestra se tome, de tal forma que el estadístico de la prueba tendrá una probabilidad de $1-\alpha$ de caer en la región de aceptación si H_0 es verdadera (Moras Sánchez, 2019).

2.7.3 Prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas

La prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas consiste en probar la igualdad de las medias de dos distribuciones en donde la varianza se desconoce. Si los tamaños muestrales n_1 y n_2 no exceden de 40, se dice que es una prueba para la comparación de medias de muestras pequeñas y se emplea la denominada prueba t (Montgomery et al., 2003).

Siendo $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}$ una muestra aleatoria n_1 , observaciones tomadas de una población, y X_{21}, X_{22}, X_{2n_2} una muestra aleatoria n_2 observaciones tomadas de una segunda población, se obtienen las medias y varianzas muestrales de ambas muestras (\bar{X}_1, \bar{X}_2 y s_1^2, s_2^2).

Considerando que la varianza muestral es un estimador de la varianza común σ^2 , se deben combinar las dos varianzas muestrales para formar un solo estimador: S_p^2 el cual se obtiene a través de la ecuación 2.15 (Montgomery et al., 2003).

$$S_p^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{(n_1+n_2-2)} \dots\dots\dots (Ec. 2.15)$$

Donde:

S_p^2 = Estimador combinado de las varianzas muestrales.

S_1^2 = Varianza de la muestra número uno.

S_2^2 = Varianza de la muestra número dos.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

Después de obtener el estimador combinado S_p^2 , se debe calcular el estadístico de prueba t apareada dado por la ecuación 2.16, con la finalidad de probar la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (Montgomery et al., 2003).

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \dots\dots\dots (Ec. 2.16)$$

Donde:

t = Estimador de prueba (t).

S_p = Estimador combinado de las desviaciones estándar muestrales.

\bar{X}_1 = Media de la muestra número uno.

\bar{X}_2 = Media de la muestra número dos.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

El estimador combinado de las desviaciones estándar muestrales, denotado por S_p , para su uso en la Ecuación 2.16 queda definido por la Ecuación 17:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{(n_1+n_2-2)}} \dots\dots\dots (Ec. 2.17)$$

Una vez obtenido el estadístico de prueba se procede a calcular la zona o región de rechazo (Figura 2. 39), que de acuerdo con la hipótesis alternativa $H_1: \mu_1 < \mu_2$, se determina a través de la Ecuación 2.18.

$$t < -t_{\alpha, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots (Ec. 2.18)$$

Donde:

α = Nivel de significancia.

$n_1 + n_2 - 2$ = Grados de libertad.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

Finalmente, se realiza una comparación entre el estadístico de prueba t y la zona de rechazo $-t_{\alpha, n_1+n_2-2}$. Si la desigualdad $t < -t_{\alpha, n_1+n_2-2}$, entonces se establece que no existen evidencias suficientes para afirmar que las medias son iguales, por lo tanto, se rechaza H_0 y de esta forma la prueba de hipótesis queda concluida.

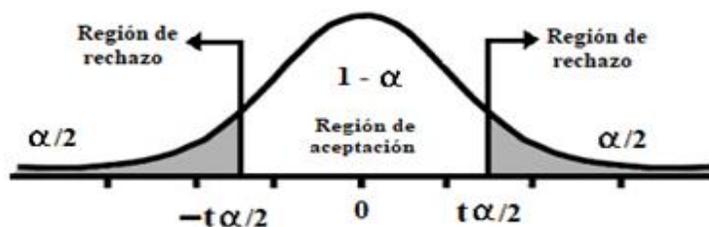


Figura 2. 39 Zona de aceptación y rechazo, comparación de medias con varianzas desconocidas (Elaboración propia).

En función de lo anterior, se ha seleccionado utilizar el indicador de evaluación de TPM conocido como la Eficacia Global del Equipo como principal herramienta de este trabajo.

2.8 Eficacia global del equipo (OEE)

De acuerdo con Suzuki (2017), la eficacia de una planta de producción depende de la eficacia con que se utiliza el equipo, materiales, personas y métodos. Por lo tanto, la mejora de la eficacia de la producción en las industrias arranca maximizando los siguientes temas vitales:

- La eficacia global del equipo (planta).
- La eficacia de las materias primas y energéticos (materiales).
- La eficacia de las tareas (personal).
- De la gestión (métodos).

Para maximizar esta eficacia se deben examinar los *inputs* del proceso de producción (equipos, materiales, personas y métodos) e identificando y eliminando las pérdidas asociadas a cada *input* para así maximizar los *outputs* (productividad, calidad, costos, entregas, seguridad, entorno y moral).

La eficacia global del equipo (OEE por sus siglas en inglés de *Overall Equipment Effectiveness*) es un indicador que las compañías usan comúnmente en su camino hacia un sistema de producción *lean*. La OEE se obtiene del producto de tres factores: disponibilidad, la tasa de rendimiento y la tasa de calidad; es un indicador que brinda una retroalimentación sobre las condiciones del equipo de acuerdo con las seis grandes pérdidas; mostrando donde se necesita mejorarlo. El principal objetivo para medir OEE es hacer que los equipos que tengan una capacidad menor que la demanda que se les impone, funcionen de manera más efectiva, identificando las causas de las pérdidas y tratar de reducirlas (Högfeldt, 2005).

La eficacia global del equipo (OEE) es un indicador global que se obtiene del producto de la disponibilidad, la tasa de rendimiento, y la tasa de calidad (Suzuki, 2017), como se muestra en la Ecuación 2.19.

$$OEE = Disponibilidad \times Tasa \ de \ rendimiento \times Tasa \ de \ calidad \dots\dots (Ec. \ 2.19)$$

Los estándares de los tres factores son: disponibilidad del 90%, tasa de rendimiento del 95% y tasa de calidad del 99% (Levitt, 2005).

2.8.1 Disponibilidad

El componente de disponibilidad incluye dos de las seis grandes pérdidas de Suzuki (2017), descritas en la Sección 2.8.4: por descomposturas y configuración y ajustes de producción. Todas estas pérdidas detienen el proceso y hacen que no se produzca en el tiempo de producción planeado. El factor de disponibilidad se calcula mediante el cociente entre el tiempo de operación de la máquina sobre el tiempo de producción planeado (Urquiza y Arellano, 2018), como se muestra en la Ecuación 2.20.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo de operación}}{\text{Tiempo disponible}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.20})$$

El tiempo de operación es el tiempo en que la máquina ha trabajado produciendo piezas durante un período de tiempo determinado, este tiempo se ve disminuido debido a los fallos de las máquinas. El tiempo disponible es el tiempo que se planifica que la máquina trabaje durante un período de tiempo determinado.

2.8.2 Tasa de rendimiento

El componente de rendimiento incluye dos grandes pérdidas que corresponden al ralentí y paradas menores y la pérdida de velocidad. El rendimiento considera todo aquello que hace que el proceso produzca por debajo de la velocidad máxima establecida para la máquina (Urquiza y Arellano, 2018).

La tasa de producción estándar es equivalente a la capacidad de diseño de la planta y es la capacidad intrínseca de una planta particular. Puede expresarse como producción por hora (en toneladas) (t/h), o por día (t/día). La tasa de producción real media actual se expresa como una media; para calcularla se utiliza la Ecuación 2.21, la cual establece que se divida la producción real por el tiempo de operación (Suzuki, 2017).

$$\text{Tasa de producción media actual} = \frac{\text{Producción real (t/h)}}{\text{Tiempo de operación}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.21})$$

La tasa de rendimiento de una planta, definida por la Ecuación 2.22, expresa la tasa de producción real media como porcentaje de la tasa de producción estándar.

$$\text{Tasa de rendimiento} = \frac{\text{Tasa de producción media actual (t/h)}}{\text{Tasa de producción estándar (t/h)}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.22})$$

2.8.3 Tasa de calidad

El componente de calidad mide la cantidad de productos que no cumplen con las especificaciones de calidad definidas para el producto, incluidas aquellas que necesitan ser reprocesadas. Este componente se calcula mediante el cociente entre la cantidad de piezas buenas producidas sobre la cantidad de piezas producidas (Urquiza y Arellano, 2018), tal y como se muestra en la Ecuación 2.23.

$$\text{Tasa calidad} = \frac{\text{Cant. producción} - (\text{produccion con defectos} + \text{reprocesamiento})}{\text{Cantidad de producción}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2.23})$$

2.8.4 Principales pérdidas para no alcanzar la eficiencia global

Las industrias deben maximizar la eficacia de su planta elevando al máximo las posibilidades de sus funciones y rendimiento, eliminando cuidadosamente todo lo que tienda a perjudicarla; para ello se tienen identificadas seis principales pérdidas que impiden que una planta alcance la máxima eficacia (Nakajima, 1988):

1. Descomposturas.

Son el tiempo perdido cuando se detiene la producción porque un equipo pierde súbitamente sus funciones específicas y se realiza mantenimiento no planificado.

2. Configuración y ajustes.

Corresponden al tiempo que se pierde cuando los cambios en los suministros o en la demanda requieren ajustes en los planes de fabricación. Los ajustes de producción son inevitables para los productores, por ello se deben realizar en el menor tiempo posible.

3. Ralentí y paradas menores.

Son las pérdidas de rendimiento que ocurren durante la producción normal en el arranque, parada o cambio de utillaje. Estas pérdidas se producen cuando la producción se interrumpe por un flujo lento de material, por un mal funcionamiento temporal como atascamiento de componentes o de material en la banda transportadora.

4. Velocidad reducida.

Estas pérdidas se refieren a la diferencia entre la velocidad de diseño del equipo y la velocidad de funcionamiento real debido a la falta de capacidad o experiencia del operador.

5. Rechazos de inicio.

Incluyen el tiempo perdido en la producción de productos con parámetros inferiores a los establecidos por mal funcionamiento en el arranque de producción o después de hacer un cambio de configuración.

6. Rechazos de reprocesamiento.

Surgen cuando un producto rechazable se recicla en un proceso previo; el reproceso genera enormes pérdidas, incluyendo pérdidas de tiempo, físicas y de energía, por lo que es importante minimizarlas.

Por lo tanto, maximizar la eficacia de la planta implica llevarla a condiciones óptimas de operación y mantenerla en ese estado eliminando o minimizando factores tales como los fallos, defectos, o problemas que perjudiquen su rendimiento.

En la Figura 2. 40 se muestra la estructura de las seis pérdidas mayores y la fórmula para calcular la eficacia global del equipo. Esta estructura de pérdidas se ha preparado considerando las seis pérdidas desde la perspectiva del tiempo y en unidades.

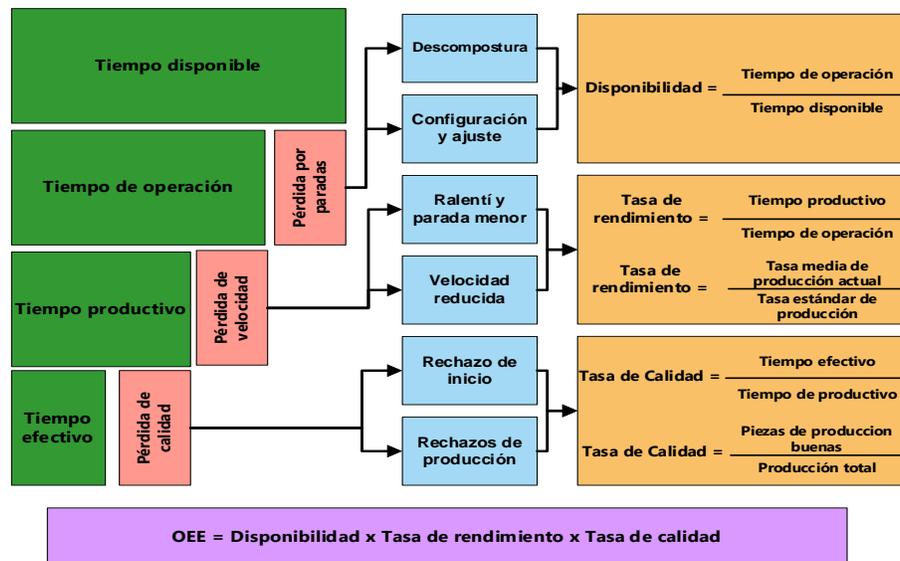


Figura 2. 40 Cálculo de la eficacia global del equipo (OEE) y sus factores (Nakajima, 1989).

La relación entre las seis grandes pérdidas y los factores que usa el OEE para reducirlas (Vijayakumar y Gajendran, 2014) se muestran en la Tabla 2. 28.

Tabla 2. 28 Seis grandes pérdidas del OEE (Vijayakumar y Gajendran, 2014).

Factor	Clase de pérdidas	Seis grandes pérdidas	Ejemplos de pérdidas	Comentarios
Disponibilidad	Pérdida por paradas	Descompostura	Falla en el equipo. Mantenimiento no planificado. Mantenimiento general.	Pérdida por avería de equipos (más de 10 min).
		Configuración y ajuste	Configuración / Cambio. Material escaso. Escasez de operadores.	Tiempo perdido por ajustes en los equipos (menos de 10 min).
Tasa de rendimiento	Pérdida de velocidad	Ralentí y paradas menores	Lento flujo de material. Atascos de componentes. Atascos de material.	Ocurren cuando los equipos se detienen por un corto tiempo como resultado de un problema temporal.
		Velocidad reducida	Ineficiencia del operador. Bajo capacidad de diseño.	Se refiere a la diferencia entre la velocidad de diseño y la velocidad de funcionamiento real.
Tasa de calidad	Pérdida de calidad	Rechazo de inicio	Lenta estabilización durante primeras horas.	Algunos equipos requieren un tiempo de calentamiento y ajustes para un rendimiento óptimo.
		Rechazos de producción	Chatarra y retrabajo.	Los productos no se ajustan a la especificación durante la producción en estado estable.

2.8.5 Clasificación de la OEE

De acuerdo con Ruiz (2009), el valor de la OEE permite clasificar una o más líneas de producción o una toda una fábrica con respecto a las mejores de su clase y que han entrado en la excelencia. La Tabla 2. 29 muestra la clasificación de valor de la OEE.

Tabla 2. 29 Clasificación de la OEE (Ruiz, 2009).

OEE	Clasificación	Consecuencias
OEE<65%	Inaceptable	Importantes pérdidas económicas. Baja competitividad.
65%<OEE<75%	Regular	Pérdidas económicas. Aceptable sólo si se está en proceso de mejora.
75%<OEE<85%	Aceptable	Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
85%<OEE<95%	Buena	Buena competitividad. Se encuentra ya en valores considerados <i>World Class</i>
OEE>95%	Excelente	Competitividad excelente.

Disponer de un valor de OEE, por ejemplo, del 60%, significa que de cada 100 piezas buenas que la máquina podría haber fabricado, sólo han producido 60 piezas. Este tipo de cálculo hace que la OEE se convierta en una prueba muy severa. Por ejemplo, si los tres factores tienen un valor del 90%, la OEE será del 72,9%. En general, se considera que una muy buena OEE se situaría por encima del 85%. En la práctica, se acepta el establecimiento de objetivos distintos para cada factor, y así, por ejemplo, se podría plantear una disponibilidad del 90%, una tasa de rendimiento del 95% y una tasa de calidad del 99,9%, lo que representa una OEE del 85% (Hernández y Vizán, 2013).

2.8.6 Ventajas de la OEE

El cálculo de la OEE es importante porque en un único indicador se evalúan todos los parámetros fundamentales de la producción industrial y constituye una de las claves de *Lean*. De acuerdo con lo expuesto, la mejora de la eficacia con la que trabajan los equipos y las instalaciones permite el incremento de la eficacia de todo el sistema productivo (Hernández y Vizán, 2013).

OEE es un estándar internacional reconocido en todo el mundo. Su implementación supone grandes ventajas en el proceso productivo ya que repercute directamente en el rendimiento que se va a obtener. Gracias a la OEE, se pueden (Touron, 2016):

- Reducir las paradas de las máquinas.
- Identificar las causas por las que hay pérdidas de rendimiento (cuellos de botella y velocidades reducidas).
- Aumentar el índice de calidad del producto, minimizando la elaboración de productos defectuosos.

De ahí que es de vital importancia su monitorización y seguimiento, y ahí radica precisamente la importancia de este proyecto.

2.9 Conclusión

En este capítulo se documentó el marco teórico en que se desenvuelven las técnicas de ingeniería industrial utilizadas en este trabajo de tesis. La información mostrada permite comprender la importancia de utilizar un indicador de evaluación de TPM como lo es la Eficiencia Global del Equipo (OEE), el diagrama de Pareto para identificar los problemas más importantes en función del tiempo de producción, el funcionamiento y creación de un VSM, la utilidad del diagrama de pescado para determinar las posibles causas de pérdidas de la OEE, los pasos para el desarrollo de un modelo de simulación, las características y entorno del *software* de simulación *Flexsim*, la importancia de las pruebas de bondad para determinar las distribuciones de las actividades del proceso con el *software* *Expertfit* y, finalmente, las características para desarrollar una prueba de hipótesis de comparación de medias.

Capítulo 3

Mejora de la eficacia global (OEE)

En este capítulo se muestra la aplicación de la metodología utilizada para mejorar la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado en una línea de lima triangular dentro de una fábrica de herramientas manuales. Se obtuvo un panorama general de la fábrica, se realizó un diagnóstico de las líneas de herramientas, se seleccionó la línea en función del tiempo de producción, se creó un VSM para seleccionar el proceso crítico; una vez seleccionado el proceso se midió la OEE, se analizaron las pérdidas de la OEE y se definieron las técnicas y herramientas a implementar. Finalmente se realizó una comparación y validación de los resultados y un análisis de los resultados.

3.1 Metodología

Para dar enfoque en el cumplimiento del objetivo de mejorar la eficacia global (OEE) en el proceso de rectificado de la línea de limas de la fábrica de herramientas manuales “████████”, mediante el desarrollo e implementación de una estrategia basada en la aplicación de técnicas de ingeniería industrial, fue necesario el desarrollo de la metodología siguiente:

1. Obtener un panorama general de la fábrica de herramientas manuales “████████”.
2. Realizar diagnóstico de las líneas de herramientas manuales.
3. Crear mapa de cadena de valor (VSM) del estado presente de la línea de lima triangular 6.
4. Describir el proceso seleccionado de la línea de lima triangular 6 a mejorar.
5. Calcular la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado.
6. Realizar análisis de la eficacia global (OEE) y de sus factores.
7. Definir técnicas y herramientas a implementar en el proceso de rectificado.
8. Construir modelo de simulación para evaluar propuestas de mejora.
9. Comparación de los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos de la propuesta de mejora.

3.2 Obtener un panorama general de la fábrica de herramientas manuales

“██████████”.

Para obtener un panorama general de la fábrica de herramientas manuales “██████████” se realizaron las actividades siguientes:

- Conocer los aspectos generales de la fábrica.
- Conocer las áreas que integran la fábrica.

La realización de las actividades mencionadas proporcionó conocimiento sobre el funcionamiento de la fábrica, su organización, el personal involucrado y las actividades realizadas para la satisfacción de sus clientes.

3.2.1 Conocer los aspectos generales de la fábrica

Para obtener información, que permitiera conocer los aspectos generales de la fábrica de herramientas manuales “██████████”, se realizó lo siguiente:

- Revisión de documentos de la fábrica. Los documentos, que fueron otorgados por el gerente general y por personal de producción de la fábrica, eran documentos de texto, presentaciones en PowerPoint e imágenes. Estos documentos proporcionaron información acerca la ubicación geográfica, antecedentes, estrategia organizacional, misión, visión, valores, política de calidad y ventajas competitivas de la fábrica, la cual fue detallada en la Sección 1.2.
- Recorridos por la fábrica. Los recorridos fueron realizados con el personal de producción y calidad en las principales áreas de producción de fábrica. Los recorridos fueron realizados de manera estratégica, con el fin de conocer el proceso general de los diversos productos que tienen, desde la recepción de materia prima hasta el embarque del producto terminado (Sección 1.2.9 y 1.2.10).
- Pláticas con el gerente general de la fábrica. Se realizaron cuatro reuniones con el gerente general de la fábrica de herramientas manuales “██████████” con el propósito de conocer, de manera general, las instalaciones y procesos que integran a la fábrica y

los productos que obtiene. En el presente reporte la fábrica sólo permitió que se describiera el proceso de lima triangular (Sección 1.2.11)

- Pláticas con personal de ingeniería y supervisores de producción. Las pláticas con el personal de producción de la fábrica se realizaron en las áreas de producción de los diversos productos que tienen, con el fin de conocer y verificar con mayor detalle la integración de las áreas, las operaciones y los procesos de las herramientas manuales (Sección 1.2.11).

3.2.2 Conocer las áreas que integran la fábrica.

Esta actividad, que se llevó a cabo con el propósito de conocer cómo está integrada la fábrica de herramientas manuales “████████”, permitió determinar que en la empresa laboran aproximadamente 200 personas, realizando diferentes actividades en las siguientes seis áreas:

- Área de operaciones.
- Área de administración y finanzas.
- Área de recursos humanos.
- Área de cadena de suministros
- Área de comercio y marketing.

La descripción de las actividades que se realizan en cada área, de forma detallada, se presentó en la Sección 1.2.8

3.3 Realizar diagnóstico de las líneas de herramientas manuales

En esta sección se describen los pasos que muestran cómo se realizó el diagnóstico de las líneas de herramientas manuales de la fábrica “████████”:

1. Seleccionar familia de productos con mayor tiempo de producción. Para la selección de la familia de productos se elaboró un diagrama de Pareto para determinar qué familia utiliza el 80% del tiempo de producción de la fábrica, para enfocar esfuerzos en esa familia de productos. La Sección 3.3.1 describe con detalle cómo se realizó este paso.

2. Identificar necesidades de la fábrica. En este paso se realizaron pláticas con el gerente general para conocer necesidades de las líneas de la familia de productos seleccionada. La Sección 3.3.2 describe con detalle los resultados de las pláticas.
3. Identificar problemáticas de la fábrica. En este paso se realizaron recorridos, se trabajó en conjunto con los operadores y supervisores y, se aplicó un cuestionario piloto para conocer problemáticas que existen dentro las líneas de la familia de productos seleccionada. La Sección 3.3.3 describe con detalle este paso.

La realización del diagnóstico fue importante, ya que conocer la situación actual de la fábrica, su forma de trabajar, las necesidades e inquietudes en ella fueron el punto de partida para comenzar el proyecto.

3.3.1 Seleccionar familia de productos con mayor tiempo producción

Para la selección de la familia de productos con mayor tiempo de producción, en la fábrica de herramientas, se elaboró un diagrama de Pareto para determinar la(s) familia(s) que utilizan el 80% del tiempo de la producción de la fábrica. La creación del diagrama de Pareto consideró, como punto de interés, las horas trabajadas de cinco familias de productos: limas, cucharas, palas, azada y carretillas. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1. Se recolectó información acerca de las horas trabajadas en la fabricación de las cinco familias. El gerente general de la fábrica de herramientas manuales “██████████” proporcionó la información de las horas trabajadas, por año, para cada familia de productos en el año 2019, la cual se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Horas trabajadas del año 2019 de cada familia de productos de la fábrica “██████████”.

Familia de productos	Tiempo anual de la producción (Hr.)	Porcentaje
Limas	201,746	87.30%
Palas	18,374	7.95%
Cucharas	8,857	3.83%
Carretillas	2,071	0.90%
Azadas	40	0.02%
	231,088	100%

2. Se ordenaron los datos de la Tabla 3. 1, mediante los pasos del análisis de Pareto descritos en la Sección 2.3.1.2, para determinar qué familias de productos utilizan el 80% del tiempo anual de la producción de la fábrica.
3. Se realizó un diagrama de Pareto, mediante los pasos del análisis de Pareto descritos en la Sección 2.3.1.2, para visualizar la relación entre los productos y los porcentajes de contribución al tiempo producción (Figura 3. 1).

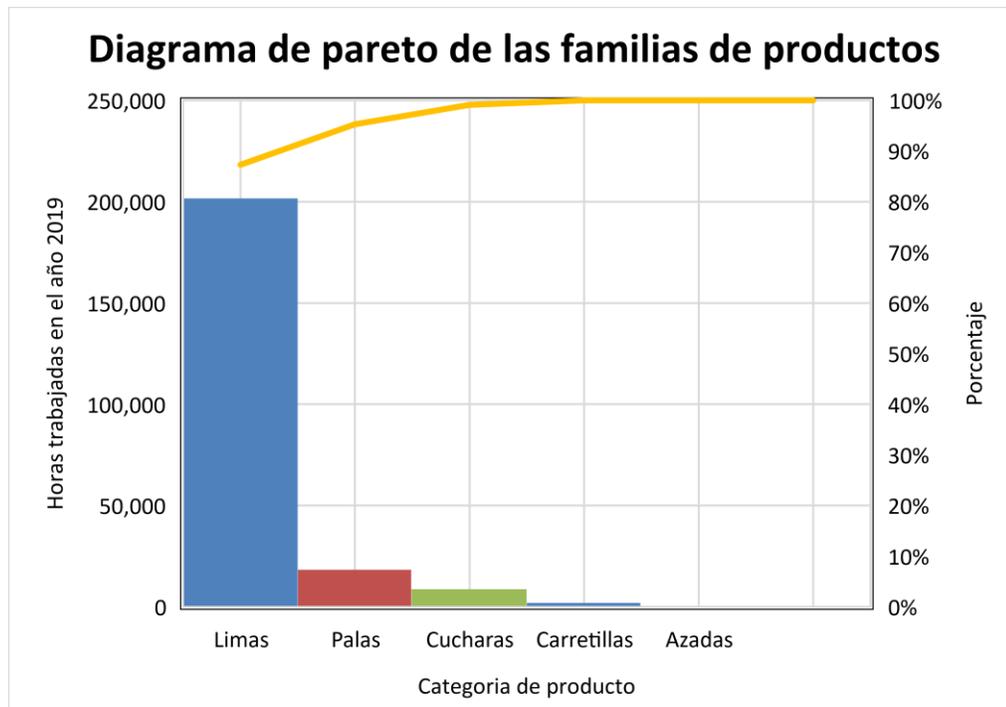


Figura 3. 1 Diagrama de Pareto de las familias de productos de la fábrica “XXXXXXXXXX”.

4. Se analizó el diagrama de Pareto obtenido y se **determinó que la familia de productos** que utiliza más del 80% del tiempo de producción de la fábrica **es la familia de limas**. Por lo tanto, en esta familia de productos se canalizarán los esfuerzos para mejorar sus problemáticas.

3.3.2 Identificar necesidades de la fábrica

Para conocer las necesidades e inquietudes dentro de la fábrica de herramientas manuales “XXXXXXXXXX” se tuvieron tres pláticas informales con el gerente general de la fábrica. Las pláticas

se realizaron en un periodo de 2 semanas (enero 2020). Las necesidades externadas a través de las pláticas fueron los siguientes:

- Mejorar la productividad de la fábrica que se encuentra por debajo de los indicadores establecidos.
- Mejorar el tiempo medio entre fallas y la disponibilidad de las máquinas de la fábrica.
- Disminuir la cantidad de inventario entre procesos para reducir los costos de manejo de material y el espacio.
- Mejorar la calidad y la inspección en los procesos de forja, rectificado, raspado y picado de la línea de lima triangular 6.
- Mejorar la tasa de calidad de la línea de lima triangular 6, disminuyendo los defectos de lima blanca y vibrada.
- Mejorar la capacitación de los trabajadores recién ingresados.

3.3.3 Identificar problemáticas de la fábrica

Para conocer las problemáticas dentro de las áreas de la fábrica de herramientas manuales “████████” se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizaron recorridos guiados, y personales, por la fábrica, con el fin de encontrar áreas de oportunidad en los procesos. Esta actividad se realizó en un periodo de un mes (enero-febrero 2020) para obtener una vista alterna mediante la observación y el análisis de los procesos involucrados en la fabricación de herramientas manuales. Las problemáticas identificadas, por la realización de estas actividades, fueron las siguientes:
 - Las áreas de trabajo de la fábrica están desordenadas y sucias.
 - En el proceso de pulido de cucharas existen problemas de ergonomía que pueden afectar la salud del personal.
 - Cuando una máquina falla, el operador deja de atender las máquinas que tiene a cargo, disminuyendo su rendimiento.
 - Los procesos de corte y raspado en la línea de lima triangular tienen grandes distancias de recorrido.

- Falta de capacitación de los operadores para intervenir su máquina cuando requiere mantenimiento.
- La mayoría de las máquinas requieren una alimentación manual por parte del operador; no están automatizadas.
- El mantenimiento preventivo no está estandarizado.
- El cambio de muelas de las máquinas rectificadoras requiere de mucho tiempo de preparación.
- Se trabajó en conjunto con el personal obrero y de supervisión en el área de producción. Las problemáticas identificadas mediante la realización de esta actividad fueron las siguientes:
 - Hay variaciones en las dimensiones de la lima escofina, debido a los moldes que se utilizan.
 - Las cuchillas de las máquinas de picado no están correctamente afiladas, provocando que la lima tenga el defecto de lima vibrada.
 - Las pisadoras de las máquinas de picado no están rectificadas y provoca que la lima tenga defectos.
 - El cambio de molde de las máquinas de picado requiere estandarización.
 - El número de rectificadas se puede disminuir para obtener una mayor producción.
 - El tiempo de desgaste de las muelas de las máquinas de rectificado no está calculado.
 - El volteo de la lima en las máquinas rectificadoras no se encuentra automatizado.
 - El personal se distrae por distintas situaciones en la fábrica de herramientas manuales.

3.4 Crear mapa de cadena de valor (VSM) del estado presente de la línea de lima triangular 6

Una vez determinada la familia de limas (Sección 3.3.1) se identificó la línea de limas y el proceso donde la implementación de técnicas de ingeniería industrial pudiera proporcionar

un mayor beneficio para la fabricación de limas, mediante la realización de un mapeo de la cadena de valor (VSM).

Para la elaboración del VSM se realizaron las etapas siguientes, las cuales están basadas en la metodología propuesta por Cabrera Calva (2011) descrita en la Sección 2.2.3:

1. **Crear grupo de trabajo para elaborar VSM.** En esta etapa se creó un equipo de trabajo conformado por 10 operadores de las líneas de lima y el supervisor del turno matutino, para que ayudaran en la determinación de los procesos y a la determinación de indicadores necesarios para la creación de un VSM de estado presente.
2. **Realizar pláticas y reuniones con el grupo de trabajo.** Se realizaron pláticas con el personal para dar a conocer la importancia del VSM y externar la necesidad de su apoyo para que el VSM fuera lo más preciso posible.
3. **Seleccionar línea de producto objetivo.** En esta etapa se definió la línea de producto objetivo a mapear, mediante herramientas gráficas, que pudiera proporcionar un mayor beneficio para la fábrica de herramientas.
4. **Determinar los procesos a mapear en el VSM del estado presente.** Se delimitaron los procesos a involucrar de la línea de producto objetivo seleccionada.
5. **Seleccionar y calcular indicadores para el VSM del estado presente.** En esta etapa se definieron y se seleccionaron los indicadores que serían relevantes para la realización del VSM y con ellos realizar un análisis del proceso.
6. **Elaborar mapa de estado presente de la línea de producto objetivo.** En esta etapa se realizó el VSM, de estado presente, para obtener una visión general del proceso de producción de la línea de producto objetivo en la fábrica de herramientas. Esta etapa ayudó a identificar procesos que tienen actividades que no agregan valor y en los cuales es factible mejorar la eficacia global de sus equipos.
7. **Analizar VSM del estado presente de la línea de producto objetivo.** En esta etapa se realizó un análisis del VSM de estado presente de la línea del producto objetivo para resaltar problemáticas en cada etapa del proceso.

3.4.1 Crear grupo de trabajo para elaborar VSM

La primera acción para elaborar el VSM, de estado presente, del procesamiento de una línea de limas de la familia de limas seleccionada, fue la creación de un equipo de trabajo para realizar el VSM. Para conformarlo se realizó lo siguiente:

1. Se realizaron pláticas con el gerente general de la fábrica sobre la elaboración del mapeo de la cadena de valor y el beneficio que se obtiene al realizarlo.
2. Se solicitó al gerente general, el apoyo de personal de las líneas de lima para que se involucraran en la elaboración del VSM, debido a que serían requeridos datos e información sobre operaciones, procesos de producción y ventas.
3. Se conformó el grupo de mapeo basado en las pláticas con el gerente general y se concluyó que el grupo de mapeo estaría conformado por 10 personas de producción de la línea, 1 supervisor y dos tesistas que realizan estancia en la fábrica de herramientas manuales.

3.4.2 Realizar pláticas y reuniones de trabajo con el grupo de trabajo

El grupo de trabajo realizó pláticas y reuniones con el personal de producción perteneciente a las líneas de lima, para externar el motivo de la formación del equipo de trabajo, el beneficio y la finalidad de la elaboración de un VSM, además de solicitar su apoyo para la recopilación de información requerida para su desarrollo.

De las pláticas realizadas se concluyó que el personal estaría dispuesto a apoyar, atender dudas y brindar información para conocer datos de ventas, operaciones y los procesos de producción que se desarrollan para el procesamiento de las limas para la elaboración del VSM.

De las reuniones de trabajo con el personal de producción se concluyó que:

- El personal de producción no tuvo inconveniente en atender consultas sobre las operaciones y procesos de producción que son realizados dentro de las líneas de lima, la única condición impuesta por el personal fue que, si existía alguna tarea dentro de

sus actividades de trabajo con mayor prioridad, sería atendida antes de proporcionar la información requerida por el grupo de trabajo.

- El personal de producción no tuvo inconveniente con que el grupo de trabajo se acercara a las máquinas para el análisis del producto obtenido entre procesos, la única condición impuesta por el personal fue que se siguieran las normativas de seguridad impuestas por la fábrica de herramientas manuales, utilizando el equipo apropiado para el manejo de las limas.

3.4.3 Seleccionar línea de producto objetivo

En la Sección 3.3.1 se concluyó que en la familia de limas se canalizaran todos los esfuerzos para dar solución a sus problemas, debido a que es la familia de productos con mayor tiempo de producción dentro de la fábrica “██████████”. La familia de limas cuenta con las siguientes líneas de productos:

- Línea de triangular 6.
- Línea de triangular 8 y trimec.
- Línea de triangular peq. y delg.
- Línea de raspas.
- Línea de planas mecánicas.
- Línea de mediacañas.
- Línea de escofinas.
- Línea de redonda.
- Línea de centro.
- Línea de cubana y *Mill*.

Con base en la metodología para seleccionar un producto objetivo, propuesta por (Cabrera Calva, 2011) y descrita en la Sección 2.2.3.2, se realizaron los siguiente dos pasos:

- Elaborar una matriz de clasificación.
- Seleccionar la línea de producto objetivo.

3.4.3.1 Elaborar matriz de priorización

Para la realización de la matriz de priorización se platicó con el gerente general de la fábrica “████████” para obtener las horas de fabricación anuales de las líneas de limas e información de las líneas de limas que cumplen o no con sus indicadores. Posteriormente se ordenó descendientemente la información con base en las horas de fabricación; el resultado se muestra en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2 Horas de fabricación e información de problemas de las líneas de limas.

Líneas de limas	Horas anuales de fabricación	Cumple con indicadores
Triangular 6	120,414	No cumple
Triangular 8 y Trimec.	21,918	Si cumple
Triangular peq. y delg.	20,578	Si cumple
Raspas	18,152	Si cumple
Planas mecánicas	5,770	Si cumple
Mediacañas	5,609	Si cumple
Escofinas	4,336	Si cumple
Redonda	3,402	Si cumple
De centro	806	No cumple
Cubana y <i>Mill</i>	760	No cumple

Con la información de la Tabla 3. 2 se elaboró la matriz de priorización que se muestra en la Figura 3. 2. En esta figura al eje de la X se le asignó la leyenda “problemas con indicadores” y al eje de la Y se le asignó la leyenda “volumen de horas de fabricación”. Dentro de este sistema de coordenadas las líneas de limas se agruparon en cuatro familias: productos estrella, productos magia, productos abeja y productos a desaparecer.

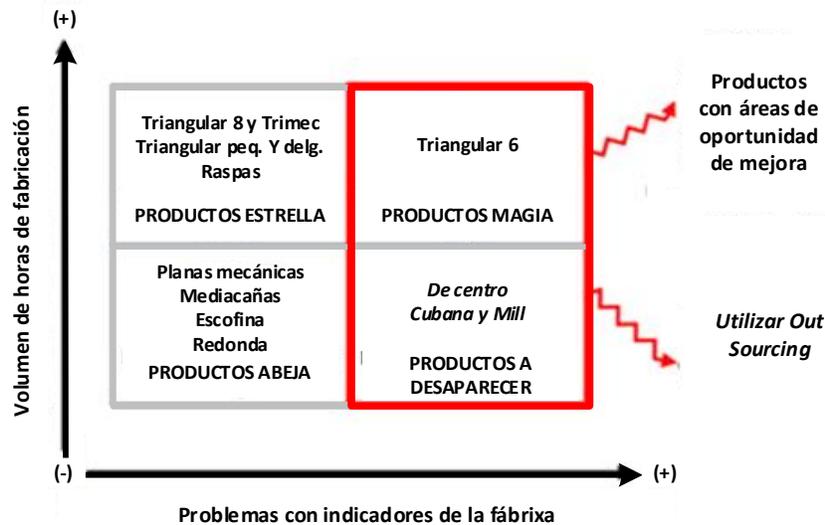


Figura 3. 2 Matriz de priorización de productos líneas de limas.

El resultado de la agrupación de la matriz de priorización (Figura 3. 2) fue el siguiente:

- Productos estrella. En esta familia se ubicaron a las líneas de lima pequeña y delgada, triangular 8 y *trimec* y raspas, ya que son las líneas de lima con una gran demanda en horas de fabricación y, además, no presentan problemas frecuentes de sus indicadores.
- Productos magia. En esta familia se ubicó a la línea de lima triangular 6. Este tipo de lima es la que tiene mayor demanda, pero actualmente presenta problemas de no cumplimiento de sus indicadores.
- Productos abeja. En esta familia se ubicaron a las líneas de producción de lima plana mecánica, escofina, mediacaña y redonda. Estas líneas de limas que, a pesar de no tener problemas con sus indicadores, no tienen una gran demanda en horas de fabricación.
- Productos por desaparecer. En esta categoría se ubicaron a las líneas de producción de lima cubana y *mil*, y lima centro. Estas líneas de limas tienen menor volumen de horas trabajadas en comparación a las otras tres familias, debido a su uso poco común en la industria de la agricultura y presentan bajo cumplimiento de sus indicadores.

3.4.3.2 Seleccionar producto objetivo

Posterior a la realización de la matriz de Priorización, de la Figura 3. 2, se efectuó una plática con el gerente general de la fábrica de herramientas manuales, con el fin de presentar las conclusiones obtenidas de las actividades realizadas y se determinó lo siguiente para el enfoque del VSM:

- Que la familia objetivo sería "Limas", con base en el análisis del diagrama de Pareto de la Figura 3. 1, realizado en la Sección 3.3.1, debido a que utiliza más del 80% del tiempo de producción de la fábrica.
- Que el producto objetivo de la familia "Limas" sería la "Triangular 6" con base en lo que propone Cabrera Calva (2011): utilizar los productos "magia" como una primera opción.

La razón de las determinaciones previas se debió a las siguientes consideraciones:

- El gerente general de la fábrica de herramientas manuales concuerda con los resultados obtenidos del diagrama de Pareto y con la matriz de priorización, ya que la experiencia del área de trabajo en la fábrica le dice que la línea de línea triangular 6 tiene más problemas que las demás líneas.
- El personal de la fábrica de herramienta manuales dedica más esfuerzo y horas de trabajo en la línea de lima triangular 6, tal y como se mostró en la Tabla 3. 2.
- Los tiempos de trabajo para la línea de lima triangular 6 son más extensos que las demás líneas de la fábrica de herramientas manuales.
- Existen defectos de calidad en los procesos de la línea de lima triangular 6. Los principales son dos: lima plana y lima vibrada.
- Los operadores consideran que el procesamiento de lima triangular 6 necesita ser mejorado.

3.4.4 Determinar los procesos a mapear en el VSM del estado presente

Posterior a la selección de la familia de productos (Sección 3.3.1) y de la línea del producto objetivo (Sección 3.4.3) se desarrolló, en colaboración con el equipo de trabajo, el diagrama

de proceso de la línea de lima triangular 6 que se muestra en la Figura 3. 3. Estos procesos, que se utilizaran para la elaboración del VSM del estado presente, se describieron de manera detallada en la Sección 1.2.11.

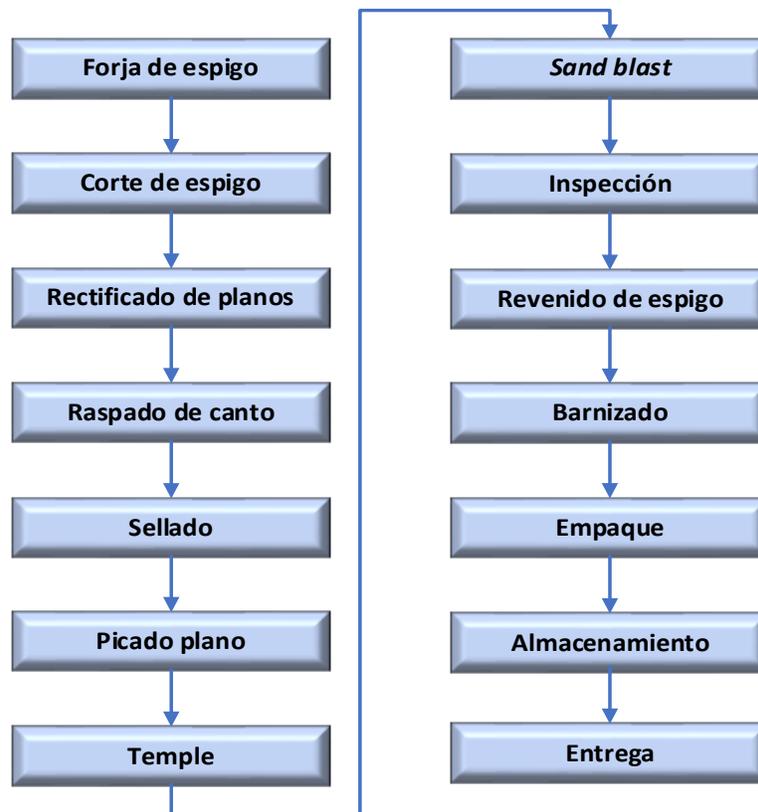


Figura 3. 3 Diagrama de proceso de la línea de lima triangular 6.

3.4.5 Seleccionar y calcular de indicadores para el VSM del estado presente

Para determinar los indicadores a utilizar en el VSM del estado presente de la línea de lima triangular 6 se analizaron los indicadores utilizados comúnmente en la elaboración de VSM's, así como los indicadores que se utilizan dentro de la fábrica de herramientas manuales; con base en este análisis, el grupo de trabajo seleccionó varios indicadores y realizó la recolección de datos (Anexo 1), para calcular cada uno de ellos, durante 15 días del mes de enero de 2020 en el turno matutino.

Los indicadores seleccionados, por el grupo de trabajo, para cada uno de los procesos se mencionan a continuación:

- **Tiempo de ciclo (TC).** En cada proceso el tiempo de ciclo se consideró como el tiempo en segundos que toma procesar una pieza y empezar con la siguiente. Para determinar el TC promedio, se tomaron y registraron los tiempos de procesamiento de cada proceso y se obtuvo el promedio de todos los tiempos registrados.
- **Tiempo máquina (TM).** El tiempo máquina se consideró como el tiempo promedio en segundos en que la(s) máquina(s) está(n) ocupada(s) procesando una lima o un lote de limas. Para determinar el TM promedio se promediaron los tiempos registrados durante 15 días. En la fábrica de herramientas algunos procesos son realizados por los trabajadores, por esta razón, el TM se consideró como cero, ya que no trabaja ninguna máquina.
- **Tiempo operador (TO).** El tiempo del operador estuvo dado por el tiempo promedio en segundos en que el operador está ocupado procesando una lima triangular 6. Para determinar el TO se tomaron, registraron y promediaron los tiempos de cada actividad manual que el operador realizó durante 15 días. En la fábrica de herramientas algunos procesos son realizados automáticamente por la máquina, por esta razón, el TO se consideró como cero.
- **Tiempo de traslado (TT).** El tiempo de traslado representó el tiempo promedio en segundos que tarda un operador en llevar el carro de transporte con limas, de un proceso a otro. Para calcular el TT se tomaron y registraron los tiempos de traslado durante 15 días.
- **Tiempo de actividades que agregan valor (AV).** El tiempo de las actividades que agregan valor es el tiempo promedio en segundos dedicado a las actividades de los procesos que son necesarias y que el cliente final está dispuesto a pagar por ellas. Para tener un estimado del tiempo de las actividades que agregan valor se tomaron, registraron y promediaron los tiempos de procesamiento de cada actividad durante 15 días.
- **Tiempo de actividades que no generan valor (NAV).** El tiempo de actividades que no generan valor es el tiempo promedio en segundos dedicado a las actividades de los procesos que no tienen un valor para el cliente final. Este indicador se calculó con la Ecuación 3.1.

$$NAV = TC - AV \dots\dots\dots (Ec. 3.1)$$

Donde:

NAV = Tiempo actividades que no agregan valor a la lima (seg. / lima)

TC = Tiempo de ciclo (seg. / lima)

AV = Tiempo de actividades que agregan valor a la lima (seg. / lima)

- **Tasa de salida (TS):** La tasa de salida se tomó como el número promedio de limas triangulares 6 que son procesadas por hora en cada etapa del proceso. Para calcular la TS se dividieron 3600 segundos, que tiene una hora, entre el tiempo de ciclo (TC), tal y como se muestra en la Ecuación 3.2.

$$TS = \frac{3600}{TC} \dots\dots\dots (Ec. 3.2)$$

Donde:

TS = Tasa de salida (lima / hora)

TC = Tiempo de ciclo (seg. / lima)

3600 = 3,600 segundos / hora

- **Número de operadores (NO).** El número de operadores fue considerado en el VSM del estado presente como la cantidad de personas que son necesarias para realizar el procesamiento de las limas triangulares en cada etapa del proceso. El registro del número de operadores se hizo en un periodo de 15 días para obtener el promedio del número de operadores que se necesitan en cada operación.
- **Inventario en procesos (Δ).** El inventario en proceso se consideró como la cantidad promedio de limas que se encuentran entre procesos, el cual, se identificó mediante un triángulo para representar la acumulación de limas que no están siendo procesadas y que representan un desperdicio. Para determinar el Δ se registró el número de limas de cada proceso.

- **Número de máquinas (NM).** Es la cantidad de máquinas o equipos que hay en cada uno de los procesos de la línea de lima triangular 6.
- **Capacidad de máquina (CM).** Es la cantidad de limas que pueden ser procesadas al mismo tiempo en una misma máquina
- **Lote de transferencia (Lote).** El lote se consideró como la cantidad de limas que se necesitan para poder transferir las limas de un proceso al siguiente.
- **Tiempo disponible (TD).** El tiempo disponible en horas por turno se calculó como la resta del tiempo de un turno (8 horas), menos el tiempo de comida (0.5 horas) y menos el tiempo de ajustes planeado a las máquinas al final de cada turno (0.25 horas), tal como se ilustra en la Ecuación 3.3

$$TD = T - C - A \dots\dots\dots (Ec. 3.3)$$

Donde:

- TD = Tiempo disponible por turno (horas/turno).
- T = Turno de 8 horas.
- C = Tiempo de comida (horas/turno).
- A = Tiempo de ajustes (horas/turno).

- **Demanda diaria (DD).** Es la cantidad de lima triangular 6 que se deben fabricar diariamente, es decir 51,000 limas diarias.
- \sum **L. T.** La sumatoria de *Lead time* se consideró como el tiempo que transcurre desde que se recibe el pedido del producto hasta la entrega al cliente. Se calculó con sumatoria de la fórmula de la ley de Little, como se muestra en la Ecuación 3.4.

$$L. T. = \frac{Inventario}{D.D} \dots\dots\dots (Ec. 3.4)$$

- \sum **T. C.** La sumatoria de ciclo de tiempo se consideró como el tiempo en que sale una lima y/o un lote de limas.

En la Tabla 3. 3 se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los indicadores mencionados anteriormente.

Tabla 3. 3 Tabla resumen de información de indicadores para procesamiento de lima triangular 6.

Procesos	Indicadores seleccionados para el VSM del estado presente											
	TC	TM	TO	TT	AV	NAV	TS	NO	Δ	NM	CM	Lote
	Seg/ lima	Seg/ lima	Seg/ lima	Seg/ lima	Seg/ lima	Seg/ lima	Limas/ hr	Op / proc	Limas/ proc	Máq/ proc	Limas/ máq.	Pza
Recepción	0.85	0.00	0.27	0.78	0.00	0.85	4257	1	350000	0	0	4000
Forja	1.01	0.46	1.01	0.10	0.46	0.55	3553	3	2500	3	1	4000
Corte	1.19	0.67	0.91	0.02	0.39	0.80	3003	1	8000	1	13	4000
Rectificado	1.60	0.81	0.80	0.06	0.81	0.80	2248	4	8600	8	21	4000
Raspado y sello	1.36	0.77	0.63	0.04	0.83	0.56	2585	2	1800	2	1	2000
Picado plano	1.48	0.99	0.48	0.02	0.99	0.48	2439	4	4100	8	4	1000
Tratamiento Térmico	0.99	1.77	1.28	0.04	1.77	1.28	3624	4	2050	2	13	1000
Sand blast	0.73	2.61	1.31	0	4.91	1.31	4944	2	1840	1	6	300
Inspección	1.05	0.00	1.05	0.00	0.65	0.40	3441	2	1600	0	0	300
Pavonado	0.74	1.01	0.59	0.00	1.01	0.59	4836	1	1050	1	40	300
Barnizado	1.00	0.81	0.00	0.59	0.81	0.00	3589	0	100	1	40	300
Empaque	1.26	0.00	1.26	0.00	1.04	0.22	2855	2	1600	0	0	300
Armado de caja y tapa	3.76	0.00	3.76	0.00	3.76	0.00	--	2	--	0	0	--
Embalaje	0.16	0.00	0.16	0.01	0.14	0.02	22332	1	9000	0	0	300
Armado de caja	12.16	0.00	12.16	0.00	12.16	0.00	--	1	--	0	0	--

3.4.6 Elaborar mapa de estado presente del procesamiento de lima triangular 6

Una vez determinados la familia (Sección 3.3.1), el producto objetivo (Sección 3.4.3.2), los procesos (Sección 3.4.4) y los indicadores relevantes (Sección 3.4.5), se realizaron los siguientes pasos para la elaboración del VSM del estado presente del procesamiento de la lima triangular 6, con base en la metodología de descrita en la Sección 2.2.3:

1. Se dibujaron los símbolos correspondientes al cliente y proveedor, el símbolo de control de producción, el medio de transporte utilizado para recibir su materia prima y enviar el producto terminado al cliente y se colocó la demanda diaria (DD) de 51,000 piezas de lima triangular 6 que debe satisfacer la fábrica de herramientas manuales, como se muestra en la Figura 3. 4.

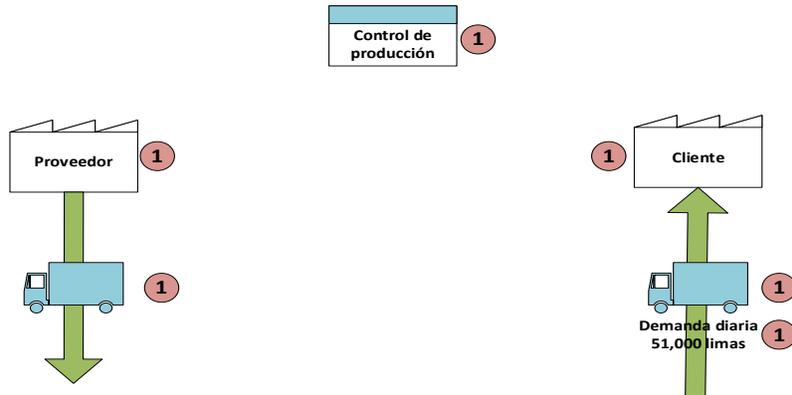


Figura 3. 4 Paso 1 de la elaboración del VSM del estado presente.

2. Se dibujaron los símbolos correspondientes a cada uno de los procesos de la línea de lima triangular 6 con su respectiva caja de datos, de izquierda a derecha con base en la Figura 3. 3, al igual que el símbolo de inventario entre procesos, tal y como se muestra en la Figura 3. 5.

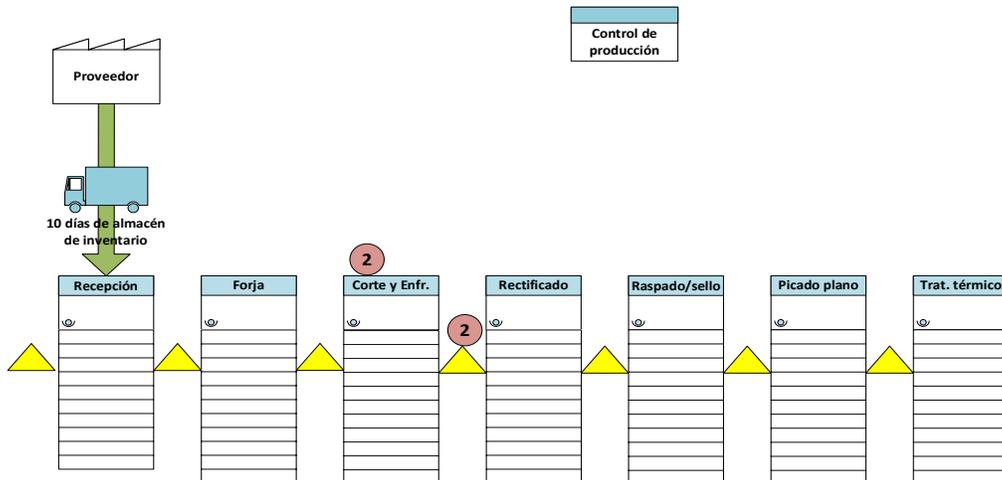


Figura 3. 5 Paso 2 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).

- Se llenaron las cajas y cuadros de datos con la información de los indicadores TM, TO, TT, TC, TS, AV, NAV, NO, TD, Lote, Δ y NM, en cada proceso, calculados en la Sección 3.4.5 y mostrados en la Figura 3. 6.

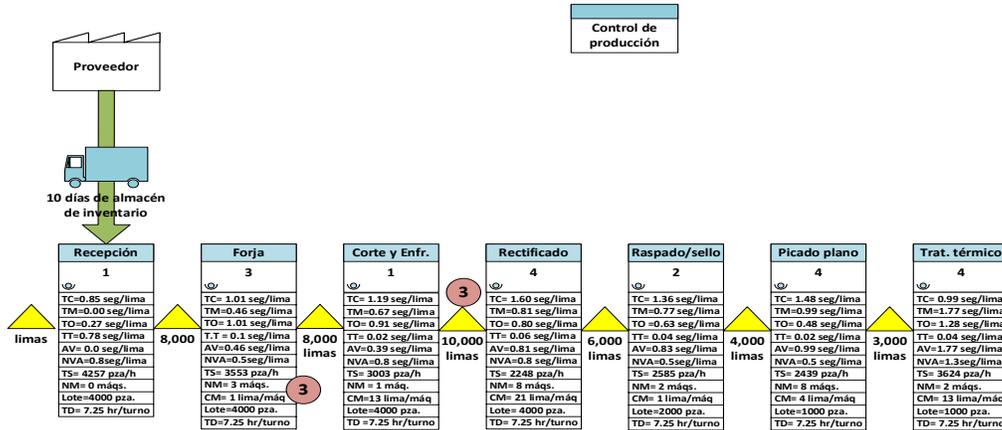


Figura 3. 6 Paso 3 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).

- Se dibujaron las flechas correspondientes, de cada medio de información utilizado en la línea (personal y electrónica), colocando sobre las flechas su frecuencia diaria, y las flechas del flujo del proceso, las cuales, de acuerdo con el grupo de mapeo (Sección 3.4.1) siguen un sistema *push*, tal y como se muestra en la Figura 3. 7.

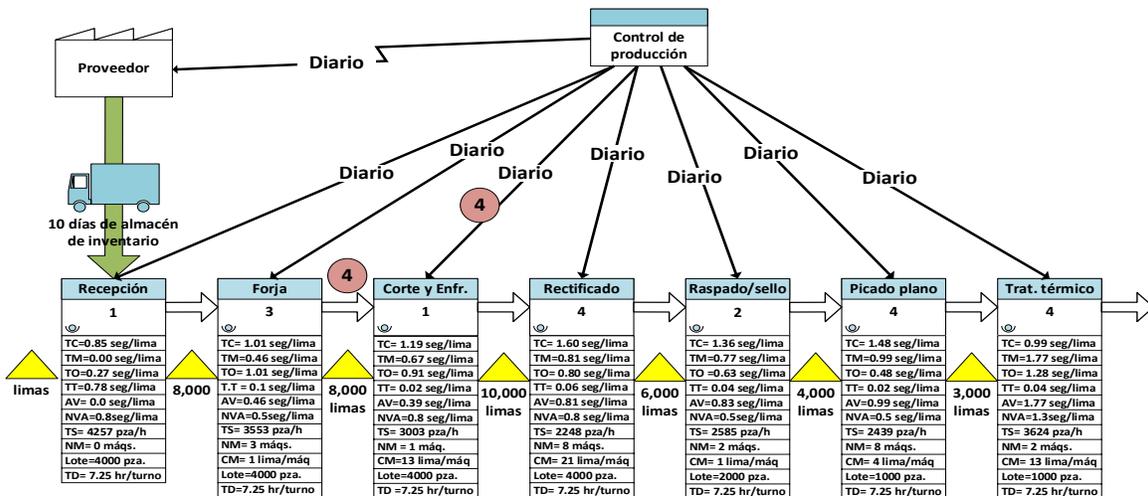


Figura 3. 7 Paso 4 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).

5. Se dibujaron dos líneas de tiempo debajo de las cajas de datos de los procesos. Ambas líneas de tiempo se muestran en la Figura 3. 8.
 - a) En la primera línea de tiempo se escribieron los tiempos de ciclo (TC), calculados en la Tabla 3. 3 (Sección 3.4.5), suponiendo un lote de transferencia de 1 lima.
 - b) En la segunda línea de tiempo se colocó el resultado de multiplicar el TC en minutos (Tabla 3. 3) por el lote de transferencia real de cada uno de los procesos (Ecuación 3.5).

$$TC (lote) = \frac{TC \times Lote}{60 \frac{seg}{min}} \dots\dots\dots (Ec. 3.5)$$

Donde:

TC (Lote) = Tiempo de ciclo de lote (min. / lote).

TC = Tiempo de ciclo (seg. / limas)

Lote = Tamaño de lote de transferencia (limas / lote)

6. Se calculó el *Lead Time* (LT) de cada proceso con la Ecuación 3.4 y el resultado se colocó sobre la línea de tiempo (Figura 3. 8).

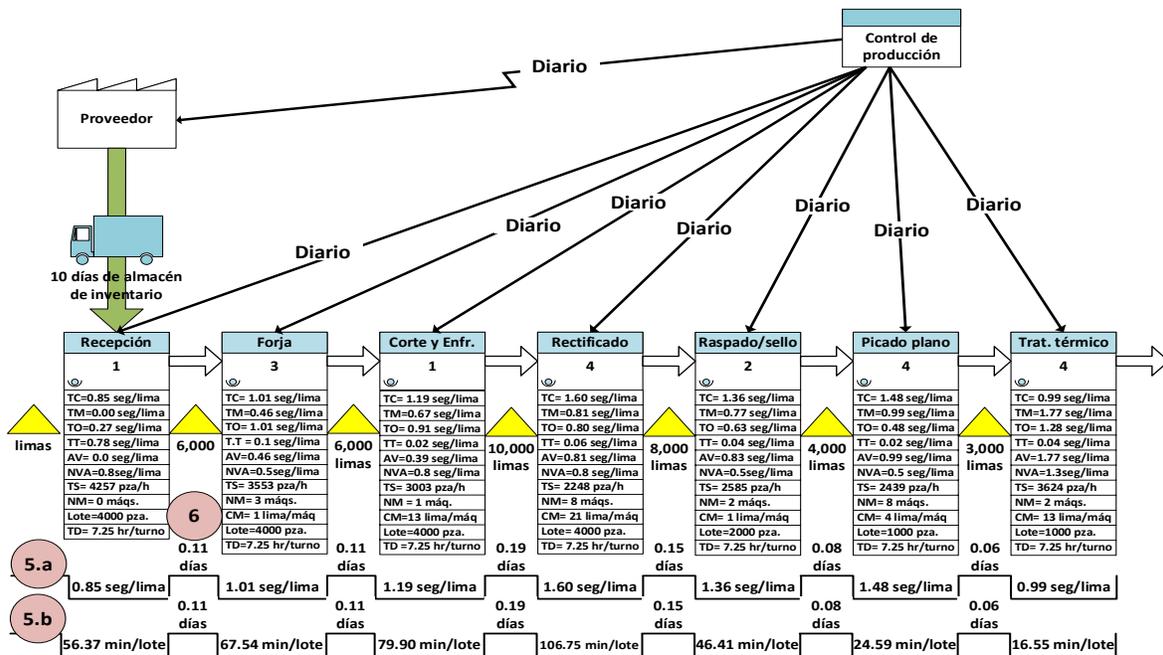


Figura 3. 8 Pasos 5-6 de la elaboración del VSM del estado presente (recepción a tratamiento térmico).

7. Se hizo la sumatoria del *lead time* de cada proceso ($\sum LT$) y se colocó el resultado al final de las dos líneas de tiempo; tal como se representa en la Figura 3. 9.
8. Se sumaron los tiempos de ciclo ($\sum TC$) de los procesos para obtener el tiempo de fabricación de una lima y de un lote de limas (300 limas) y se colocó el resultado al final de las dos líneas de tiempo respectivamente; como se observa en la Figura 3. 9.

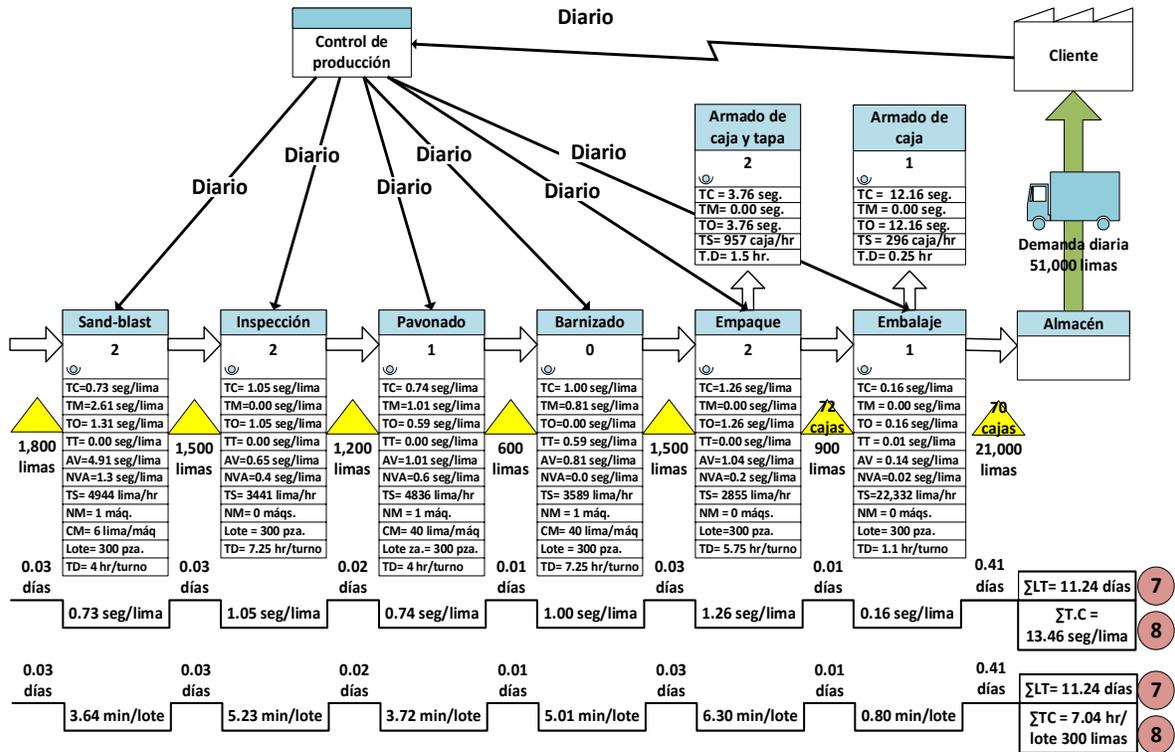


Figura 3. 9 Pasos 7-8 de la elaboración del VSM del estado presente parcial (inspección a embalaje).

El VSM del estado presente de la línea de lima triangular 6, que se obtuvo al realizar los pasos anteriormente descritos se muestra en la Figura 3. 10 y Figura 3. 11.

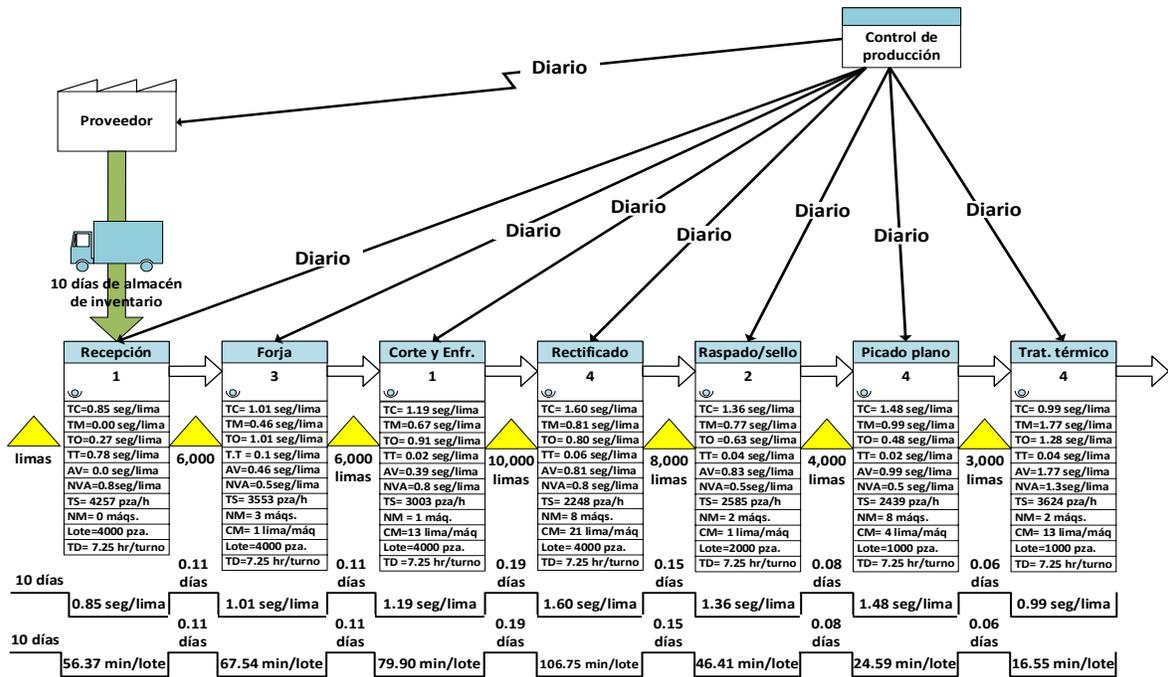


Figura 3. 10 VSM del estado presente: línea de lima triangular 6 (recepción a tratamiento térmico).

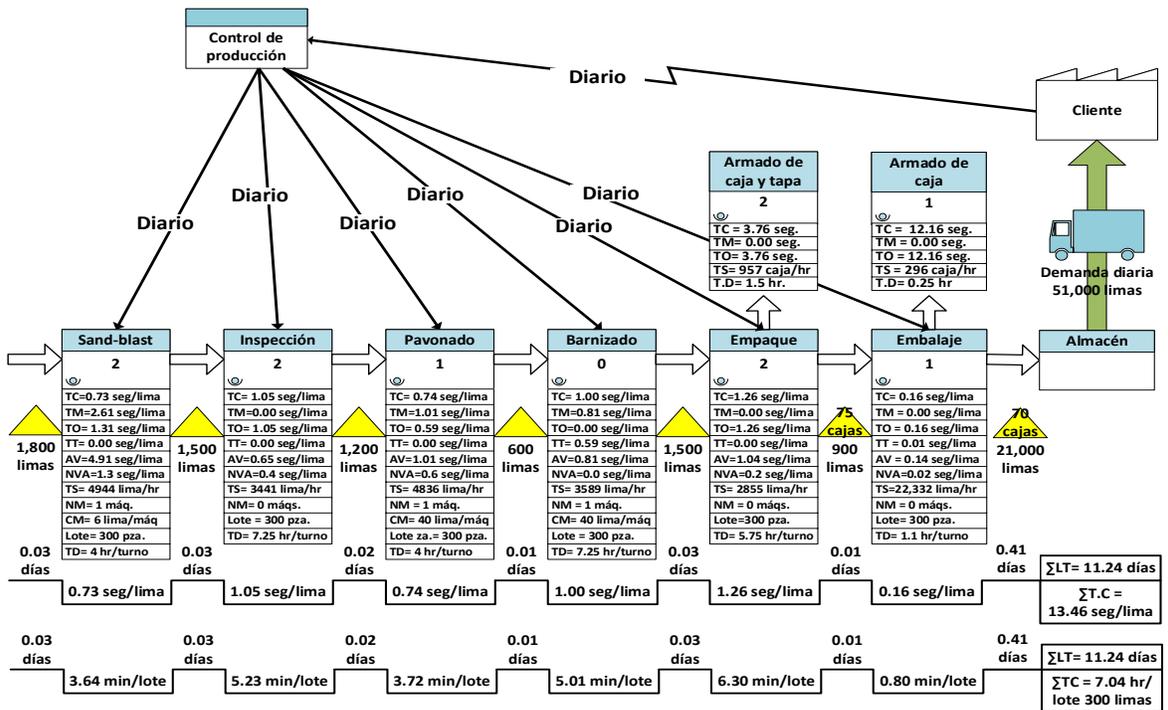


Figura 3. 11 VSM del estado presente: línea de lima triangular 6 (sand blast a embalaje).

3.4.7 Analizar VSM del estado presente del procesamiento de lima triangular 6

Con base en el análisis del VSM del estado presente de la línea de lima triangular 6 (Figura 3. 10 y Figura 3. 11) se determinó lo siguiente:

- Que hay exceso de inventario en la mayoría de los procesos de fabricación de la lima triangular 6 debido a que existe un lote de transferencia muy grande.
- Que los procesos que tienen un mayor tiempo de inventario fueron:
 - Corte con 0.19 días.
 - Rectificado con 0.15 días.
 - Forja con 0.11 días.
- Que los procesos con mayor tiempo de ciclo, suponiendo un lote de transferencia unitario, fueron:
 - Rectificado con 1.60 segundos/lima.
 - Picado con 1.48 segundos/lima.
- Que los procesos con mayor tiempo de ciclo, con lotes de transferencia diferentes y que provocan un cuello de botella fueron:
 - Rectificado con 106.75 minutos/lote.
 - Corte y enfriamiento con 79.90 minutos/lote.
- Que los procesos con menor tasa de salida de limas por hora son rectificado y picado:
 - Rectificado con 2248 limas/hora.
 - Picado con 2440 limas/hora.
- Que el tiempo de traslado no presentó un problema ya que los procesos están muy cerca uno del otro y los tiempos son muy cortos. El único problema en este indicador fue la cantidad elevada de limas que se transportan de un proceso a otro, lo cual requiere mucha fuerza para desplazar el carro.
- Que la sumatoria de tiempo de ciclo, suponiendo un lote de transferencia unitario de lima triangular 6, fue de 13.46 segundos.
- Que la sumatoria de tiempo de ciclo, con lotes de transferencia diferentes, fue de 7.04 horas.
- Que el *lead time* es de 11.24 días, el cual indica que se tienen en promedio 11 días de inventario de limas en el proceso.

Se organizó una reunión con el gerente general de la fábrica “██████████”, donde se reportó el resultado del análisis del VSM del estado presente de la línea de lima 6. Considerando el diagnóstico mostrado en la Sección 3.3, el gerente y el grupo de trabajo, determinaron que el proceso con mayor oportunidad de mejora es el proceso denominado “rectificado”, por las siguientes razones:

- Rectificado es el segundo proceso con mayor cantidad de inventario.
- El tamaño de lote de transferencia del proceso de rectificado es el más grande en la línea, junto con recepción, forja y corte, con 4000 limas.
- El proceso de rectificado es un cuello de botella, ya que tiene el mayor tiempo de ciclo (TC), por lo tanto, tiene la menor tasa de salida de limas.
- Las máquinas rectificadoras no trabajan todo el tiempo, debido a que un solo operador maneja dos máquinas al mismo tiempo, dejando siempre una de las dos máquinas inactiva por ajuste o revisión de la otra. Esto ocasiona un rendimiento bajo.
- El número de rectificadas se puede disminuir para disminuir el tiempo de ciclo (TC) y obtener una mayor producción.
- El volteo de la lima en las máquinas rectificadoras no es una actividad que agregue valor a la lima y se puede eliminar automatizándolo.
- Las dimensiones incorrectas en la lima pueden afectar a los dos procesos que continúan: raspado/sello y picado plano; disminuyendo la tasa de calidad.
- El gerente externó la necesidad de mejorar el proceso de rectificado por la deficiente calidad del mismo y porque se han perdido clientes.
- Las máquinas rectificadoras requieren una alimentación manual por parte del operador; no están automatizadas.
- El cambio de muelas de las máquinas rectificadoras requiere de mucho tiempo de preparación.
- El tiempo de desgaste de las muelas de las máquinas de rectificado no está calculado, por lo que el cambio de muela no se encuentra programado
- Falta de capacitación de los operadores para intervenir su máquina cuando requiere mantenimiento.
- El mantenimiento preventivo no está estandarizado.

3.5 Descripción del proceso de rectificado

El proceso crítico seleccionado, mediante el análisis del VSM del estado presente del procesamiento de lima triangular 6 (Sección 3.4.7), es rectificado. Para tener un mejor panorama del proceso de rectificado de limas triangulares, mostrado en la Figura 3. 12, se describirán brevemente las actividades:

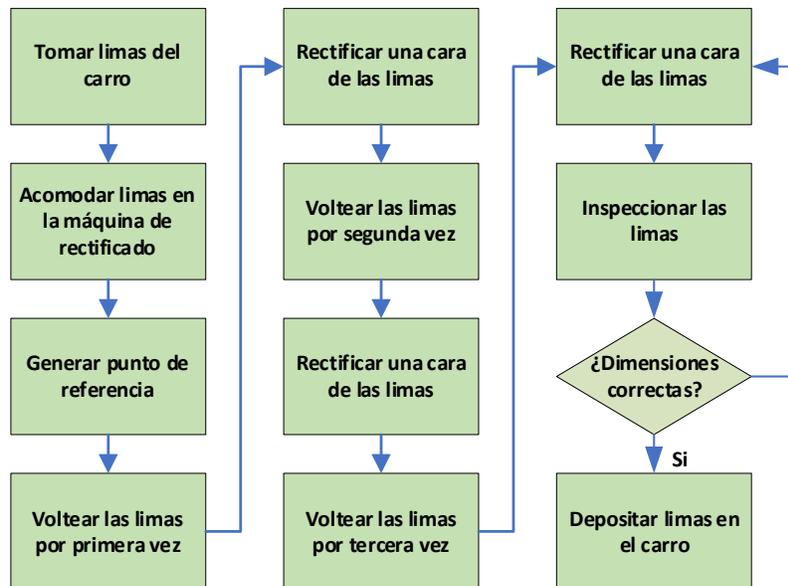


Figura 3. 12 Proceso de rectificado de lima triangular 6.

1. **Tomar limas del carro:** El operador toma un lote de 21 limas triangulares de un carro procedente del proceso de corte de espigo.
2. **Acomodar limas en la máquina de rectificado:** El operador acomoda el lote de 21 limas en la base de la rectificadora, asegurando que queden correctamente alineadas para evitar cualquier defecto.
3. **Generar punto de referencia:** El operador enciende la máquina y empieza el proceso de rectificado del lote de las 21 limas triangulares. Esta primera rectificadora funciona para generar el punto de referencia de la máquina.
4. **Voltear limas por primera vez:** Una vez que la máquina termina de rectificar las limas triangulares, el operador voltea de cara las limas para rectificarlas.
5. **Rectificar primera cara de las limas:** El operador pone en marcha la máquina y empieza el proceso de rectificado en la primera cara del lote de las 21 limas.

6. **Voltear limas por segunda vez:** Una vez que la máquina termina de rectificar las limas triangulares, el operador voltea de cara las limas para rectificarlas.
7. **Rectificar segunda cara de las limas:** El operador pone en marcha la máquina y empieza el proceso de rectificado en la segunda cara del lote de las 21 limas.
8. **Voltear limas por tercera vez:** Una vez que la máquina termina de rectificar las limas triangulares, el operador voltea de cara las limas para rectificarlas.
9. **Rectificar tercera cara de las limas:** El operador pone en marcha la máquina y empieza el proceso de rectificado en la tercera cara del lote de las 21 limas.
10. **Inspeccionar limas:** Al terminar de rectificar la máquina, el operador toma un par de limas y las inspecciona con un aparato que tiene las dimensiones estándar de las limas triangulares, si no tienen las dimensiones correctas se vuelven a rectificar.
11. **Depositar limas en el carro del proceso siguiente:** Las limas triangulares que tienen las dimensiones correctas son colocadas en el carro para el siguiente proceso.

3.6 Calcular la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado

La eficacia global del equipo (OEE) muestra el resultado de 3 factores importantes: la disponibilidad, la tasa de rendimiento y la tasa de calidad (Sección 2.8); los cuales fueron evaluados con base en lo que se mostró en la Figura 2. 40. Para determinar estos 3 factores se determinó lo siguiente:

- **El tiempo de calendario (TDC)** se consideró como el producto de los días hábiles de cada mes, las horas de operación de cada día y el número de máquinas que hay en el proceso de rectificado. Para calcular este tiempo se utilizó la Ecuación 3.6 y los resultados de cada mes se concentraron en la Tabla 3. 4.

$$TDC = dh \times ho \times nm \dots\dots\dots (Ec. 3.6)$$

Donde:

- TDC = Tiempo de calendario (h/mes).
- dh = Días hábiles de cada mes (h/mes).
- ho = Horas de operación (h/día).
- nm = Número de máquinas rectificadoras.

Tabla 3. 4 Tiempo de calendario del proceso de rectificado.

Año	Mes	Días hábiles (día/mes)	Horas de operación (h/día)	Número de máquinas	Tiempo de calendario (h/mes)
		dh	ho	nm	TDC
2019	Jul	24	24	8	4608
2019	Ago	26	24	8	4992
2019	Sep	25	24	8	4800
2019	Oct	26	24	8	4992
2019	Nov	23	24	8	4416
2019	Dic	17	24	8	3264
2020	Ene	23	24	8	4416
2020	Feb	24	24	8	4608

- **El tiempo disponible (TD)** se consideró como el TDC menos el tiempo de limpieza, comida y arranque. Para calcular este tiempo se utilizó la Ecuación 3.7 y los resultados de cada mes se concentraron en la Tabla 3. 5.

$$TD = TDC - tc - tl - tr \dots\dots\dots (Ec. 3.7)$$

Donde:

- TD = Tiempo disponible (h/mes).
- TDC = Tiempo de calendario (h/mes).
- tc = Tiempo de comidas (h/mes).
- tl = Tiempo de limpieza (h/mes).
- tr = Tiempo de reuniones (h/mes).

Tabla 3. 5 Tiempo disponible del proceso de rectificado.

Año	Mes	Tiempo de calendario (h/mes)	Tiempo de comida (h/mes)	Tiempo de limpieza (h/mes)	Tiempo de reuniones (h/mes)	Tiempo disponible (h/mes)
		TDC	tc	tl	tr	TD
2019	Jul	4608	324	54	108	4122
2019	Ago	4992	324	54	108	4506
2019	Sep	4800	300	50	100	4350
2019	Oct	4992	324	54	108	4506
2019	Nov	4416	312	52	104	3948
2019	Dic	3264	276	46	92	2850
2020	Ene	4416	312	52	104	3948
2020	Feb	4608	288	48	96	4176

- **El tiempo de operación (TO)** se consideró como el TD menos el tiempo de pérdidas por paradas. Este tiempo sirve para calcular el factor de disponibilidad de las máquinas del proceso de rectificado. Para calcular este tiempo se utilizó la Ecuación 3.8 y los resultados de cada mes se concentraron en la Tabla 3. 6.

$$TO = TD - TPP \dots\dots\dots (Ec. 3.8)$$

Donde:

- TO = Tiempo de operación (h/mes).
- TD = Tiempo disponible (h/mes).
- TPP = Tiempo de pérdidas por paradas (h/mes).

Tabla 3. 6 Tiempo de operación del proceso de rectificado.

Año	Mes	Tiempo disponible (h/mes)	Tiempo de pérdidas por paradas (h/mes)	Tiempo de operación (h/mes)
		TD	TPP	TO
2019	Jul	4122	7.65	4114.35
2019	Ago	4506	110.27	4395.73
2019	Sep	4350	12.25	4337.75
2019	Oct	4506	36.88	4469.12
2019	Nov	3948	8.36	3939.64
2019	Dic	2850	7.55	2842.45
2020	Ene	3948	10.41	3937.59
2020	Feb	4176	17.29	4158.71

- **El tiempo productivo (TP)** se consideró como el TO menos el tiempo de pérdidas de velocidad por paradas menores o ineficacia de los operadores. Este tiempo sirve para calcular el factor de tasa de rendimiento de las máquinas del proceso de rectificado. Para calcular este tiempo se utilizó la Ecuación 3.9 y los resultados de cada mes se concentraron en la Tabla 3. 7.

$$TP = TO - TPV \dots\dots\dots (Ec. 3.9)$$

Donde:

- TP = Tiempo productivo (h/mes).
- TPV = Tiempo de pérdidas de velocidad (h/mes).

Tabla 3. 7 Tiempo productivo del proceso de rectificado.

Año	Mes	Tiempo de operación (h/mes)	Tiempo de pérdidas de velocidad (h/mes)	Tiempo productivo (h/mes)
		TO	TPV	TP
2019	Jul	4114.35	430.25	3684.10
2019	Ago	4395.73	928.52	3467.21
2019	Sep	4337.75	972.41	3365.34
2019	Oct	4469.12	1065.47	3403.65
2019	Nov	3939.64	2081.95	1857.69
2019	Dic	2842.45	2311.54	530.91
2020	Ene	3937.59	1306.61	2630.98
2020	Feb	4158.71	804.46	3354.25

- **El tiempo efectivo (TE)** se consideró como el TP menos el tiempo dedicado a las piezas defectuosas y el tiempo de piezas reprocesadas. Este tiempo sirve para calcular el factor de tasa de calidad de las máquinas del proceso de rectificado. Para calcular este tiempo se utilizó la Ecuación 3.10 y los resultados de cada mes se concentraron en la Tabla 3. 8.

$$TE = TP - TPC \dots\dots\dots (Ec. 3.10)$$

Donde:

- TE = Tiempo efectivo (h/mes).
- TP = Tiempo productivo (h/mes).
- TPC = Tiempo de pérdidas de calidad (h/mes).

Tabla 3. 8 Tiempo efectivo del proceso de rectificado.

Año	Mes	Tiempo de productivo (h/mes)	Tiempo de pérdidas de calidad (h/mes)	Tiempo efectivo (h/mes)
		TP	TPC	TE
2019	Jul	3684.10	8.23	3675.87
2019	Ago	3467.21	7.50	3459.71
2019	Sep	3365.34	6.59	3358.75
2019	Oct	3403.65	7.48	3396.17
2019	Nov	1857.69	4.89	1852.80
2019	Dic	530.91	5.30	525.61
2020	Ene	2630.98	4.85	2626.13
2020	Feb	3354.25	7.40	3346.85

3.6.1 Cálculo del factor disponibilidad

Para calcular el factor de disponibilidad mensual del proceso de rectificado se utilizaron los datos del tiempo de operación (TO) y el tiempo disponible (TD) de las máquinas de rectificado, para el periodo de julio de 2019 a febrero de 2020, mostrados previamente en la Tabla 3. 6.

El factor de disponibilidad mensual que se calculó con el cociente del tiempo de operación de las máquinas y el tiempo disponible (TO/TD) -tal como se indicó en la Figura 2. 40 (Sección 2.8.4)- se concentraron en la Tabla 3. 9. En la Figura 3. 13 se puede observar que el factor de disponibilidad fluctuó entre el 97.56 y 99.81%, siendo agosto el mes donde se presentó menor disponibilidad debido a que existieron mayores pérdidas por paradas de las máquinas rectificadoras.

Tabla 3. 9 Cálculo de factor disponibilidad.

Año	Mes	Tiempo de operación (h/mes)	Tiempo disponible (h/mes)	Disponibilidad
		TO	TD	TO/TD
2019	Jul	4114.35	4122	99.81%
2019	Ago	4395.73	4506	97.56%
2019	Sep	4337.75	4350	99.72%
2019	Oct	4469.12	4506	99.18%
2019	Nov	3939.64	3948	99.79%
2019	Dic	2842.45	2850	99.74%
2020	Ene	3937.59	3948	99.74%
2020	Feb	4158.71	4176	99.60%

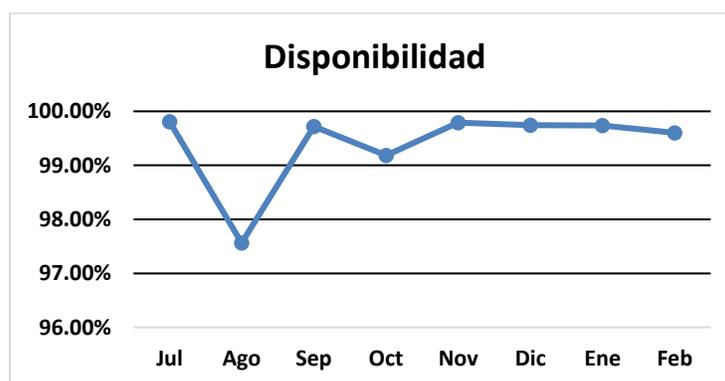


Figura 3. 13 Fluctuación del factor disponibilidad.

3.6.2 Cálculo del factor tasa de rendimiento

El factor tasa de rendimiento mensual del proceso de rectificado, durante el periodo de julio de 2019 a febrero de 2020, se obtuvo de dos formas equivalentes:

- **En términos de tiempo.** Se utilizaron los datos del tiempo productivo mensual (TP) y el tiempo de operación (TO) de las máquinas de rectificado mostrados previamente en la Tabla 3. 7. El factor de tasa de rendimiento mensual en términos de tiempo, que se calculó con el cociente de TP/TO -tal como se indicó en la Figura 2. 40 (Sección 2.8.4)- se concentró en la Tabla 3. 10.

Tabla 3. 10 Cálculo del factor tasa de rendimiento en términos de tiempo.

Año	Mes	Tiempo productivo (h/mes)	Tiempo de operación (h/mes)	Tasa de rendimiento
		TP	TO	TP/TO
2019	Jul	3364.10	3994.35	84.22%
2019	Ago	3095.72	4413.73	70.14%
2019	Sep	3365.34	4337.75	77.58%
2019	Oct	3391.65	4487.12	75.59%
2019	Nov	2293.69	3993.64	57.43%
2019	Dic	1689.91	2950.45	57.28%
2020	Ene	2604.98	3991.59	65.26%
2020	Feb	3343.25	4332.71	77.16%

- **En términos de producción de limas.** Se obtuvieron datos de la tasa media de producción actual (TMP) y la tasa estándar de producción (TEP). El factor de tasa de rendimiento mensual en términos de producción de limas que se obtuvo del cociente de TMP/TEP -tal como se indicó en la Figura 2. 40 (Sección 2.8.4)- se concentró en la Tabla 3. 11.

En la Figura 3. 14 se puede observar que el factor de tasa de rendimiento, en términos de limas, fluctuó entre el 57.28 y 84.22%, siendo diciembre el mes donde se presentó la menor tasa de rendimiento debido a que existieron mayores pérdidas de velocidad de las máquinas rectificadoras.

Tabla 3. 11 Cálculo de factor tasa de rendimiento en términos de limas.

Año	Mes	C. Tasa media de producción (limas/h)	D. Tasa estándar de producción (limas/h)	Tasa de rendimiento
		TMP	TEP	(TMP/TEP)
2019	Jul	317.574	420	75.61%
2019	Ago	294.582	420	70.14%
2019	Sep	290.243	420	69.11%
2019	Oct	283.823	420	67.58%
2019	Nov	216.158	420	51.47%
2019	Dic	215.459	420	51.30%
2020	Ene	246.668	420	58.73%
2020	Feb	289.561	420	68.94%

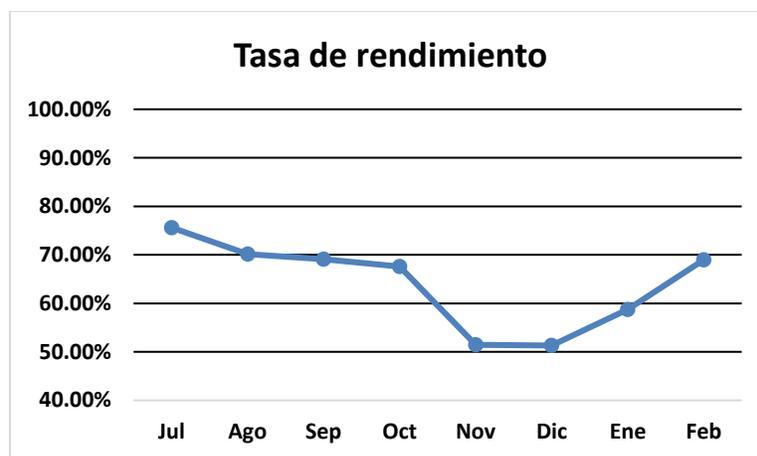


Figura 3. 14 Fluctuación del factor tasa de rendimiento.

3.6.3 Cálculo del factor tasa de calidad

El factor tasa de rendimiento mensual del proceso de rectificado, durante el periodo de julio de 2019 a febrero de 2020, se obtuvo de dos formas equivalentes:

- **En términos de tiempo.** Se utilizaron los datos del tiempo productivo (TP) y el tiempo efectivo mensual (TE) de las máquinas de rectificado mostrados previamente en la Tabla 3. 8. El factor de tasa de calidad mensual en términos de tiempo, que se calculó con el cociente de TP/TE -tal como se indicó en la Figura 2. 40 (Sección 2.8.4)- se concentró en la Tabla 3. 12.

Tabla 3. 12 Cálculo de factor tasa de calidad en términos de tiempo.

Año	Mes	Tiempo efectivo (h/mes)	Tiempo productivo (h/mes)	Tasa de calidad
		TE	TP	TE/TP
2019	Jul	3355.87	3364.10	99.76%
2019	Ago	3088.22	3095.72	99.76%
2019	Sep	3358.75	3365.34	99.80%
2019	Oct	3384.17	3391.65	99.78%
2019	Nov	2288.80	2293.69	99.79%
2019	Dic	1684.61	1689.91	99.69%
2020	Ene	2600.13	2604.98	99.81%
2020	Feb	3335.85	3343.25	99.78%

- **En términos de producción de limas.** Se obtuvieron datos de la producción total de limas (PTL) y las limas rectificadas no conformes (LNC), la diferencia de ambos datos proporcionó las limas rectificadas buenas (LB). El factor de tasa de rendimiento mensual en términos de producción de limas que se obtuvo del cociente de LB/PTL -tal como se indicó en la Figura 2. 40 (Sección 2.8.4)- se muestra en la Tabla 3. 13.

Tabla 3. 13 Cálculo de factor tasa de calidad en términos de limas.

Año	Mes	Producción total de limas (limas/mes)	Limas no conformes (limas/mes)	Limas buenas (limas/mes)	Tasa de calidad
		PTL	LNC	LB	LB/PTL
2019	Jul	1378502	3167	1375335	99.77%
2019	Ago	1300204	2887	1297317	99.78%
2019	Sep	1259002	2502	1256500	99.80%
2019	Oct	1273548	2830	1270718	99.78%
2019	Nov	693258	1864	691394	99.73%
2019	Dic	197700	2020	195680	98.98%
2020	Ene	984597	1888	982709	99.81%
2020	Feb	1254582	2822	1251760	99.78%

En la Figura 3. 15 se observa que el factor de tasa de calidad, en términos de limas, fluctuó entre el 99.69 y 99.81%, siendo diciembre el mes donde se presentó la menor tasa de calidad debido a que existieron mayores pérdidas de calidad de las máquinas rectificadoras.

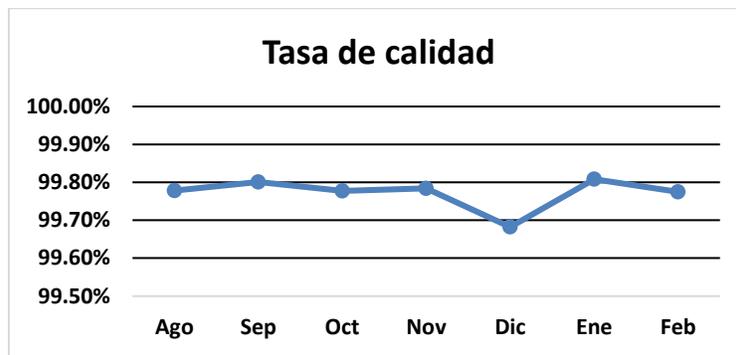


Figura 3. 15 Fluctuación del factor tasa de calidad.

3.6.4 Cálculo de OEE

Para calcular el OEE, del periodo de julio de 2019 a febrero de 2020, se realizó el producto de los tres factores calculados: disponibilidad (A), tasa de rendimiento (B) y tasa de calidad (C); que se muestran en la Tabla 3. 14. La gráfica de estos datos (Figura 3. 16) muestra que el OEE fluctuó entre el 56.95 y 83.85%, siendo diciembre el mes donde se registró el OEE más bajo de las máquinas rectificadoras.

Tabla 3. 14 Cálculo de OEE.

Año	Mes	Disponibilidad	Tasa de rendimiento	Tasa de calidad	OEE
		A	B	C	A*B*C
2019	Jul	99.81%	84.22%	99.76%	83.85%
2019	Ago	97.56%	70.14%	99.76%	68.26%
2019	Sep	99.72%	77.58%	99.80%	77.21%
2019	Oct	99.18%	75.59%	99.78%	74.80%
2019	Nov	99.79%	57.43%	99.79%	57.19%
2019	Dic	99.74%	57.28%	99.69%	56.95%
2020	Ene	99.74%	65.26%	99.81%	64.97%
2020	Feb	99.60%	77.16%	99.78%	76.69%
Promedio		99.39%	70.58%	99.77%	69.99%

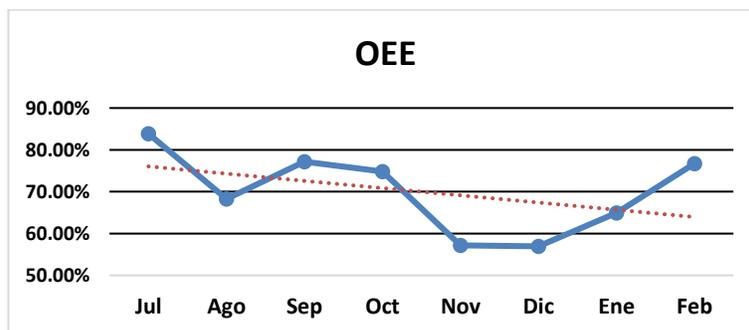


Figura 3. 16 Fluctuación de OEE.

3.7 Realizar análisis del OEE y sus factores

Una vez calculado el OEE del proceso de rectificado, mediante la multiplicación de los factores de disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad; se realizó un análisis de cada cálculo para determinar causas que provocaban pérdidas y para identificar el factor que no cumplía con los valores mínimos requeridos, mediante la ejecución de las siguientes actividades:

- 1. Analizar factor disponibilidad.** Se elaboró un diagrama de pescado para determinar las causas que generan pérdidas por paradas y que afectan el factor disponibilidad.
- 2. Analizar factor tasa de rendimiento.** Se elaboró un diagrama de pescado para determinar las causas que generan pérdidas de velocidad y que afectan el factor tasa de rendimiento.
- 3. Analizar factor tasa de calidad.** Se elaboró un diagrama de pescado para determinar las causas que generan pérdidas de calidad y que afectan el factor tasa de calidad.
- 4. Analizar OEE.** Se analizó e identificó el factor que no cumplía con los valores mínimos requeridos realizando una comparación con valores estándar establecidos.
- 5. Proponer soluciones de mejora.** Se realizaron propuestas de mejora para darle solución a las causas que generaban pérdidas en el factor que no cumplía con los valores mínimos requeridos.
- 6. Seleccionar la solución de mejora con mayor impacto.** Se seleccionó la solución de mejora, con mayor impacto en la pérdida del factor que no cumplía con los valores mínimos requeridos, por medio del método por puntos.

3.7.1 Analizar factor disponibilidad

De acuerdo con la Tabla 2. 28 (Sección 2.8.4), el factor “disponibilidad” está relacionado directamente con la clase “pérdida por paradas”. Con base en esto, se analizó la Tabla 3. 9 (Sección 3.6.1), concluyendo que hay problemas con el factor disponibilidad, debido a que existen pérdidas por paradas, por esta razón, el equipo de trabajo desarrolló un diagrama de

pescado (Figura 3. 17) para determinar causas que provocan estas pérdidas, las cuales, reducen el factor disponibilidad del proceso de rectificado. Las causas encontradas en cada una de las categorías del diagrama de pescado fueron las siguientes:

- **Máquina:** Las causas identificadas en la categoría “máquinas” que provocan pérdidas por paradas fueron las siguientes:
 - La muela que rectifica las limas tiene un desgaste por lo que en determinado tiempo se debe reemplazar y eso disminuye la disponibilidad de las máquinas de rectificado.
 - Existen algunos paros por atascamiento de elementos debido a que no se realiza limpieza en la máquina.
 - Los componentes de las máquinas son obsoletos, es decir, no tienen elementos de fijación que ayuden a reducir el tiempo de ajuste o cambio de muela.
- **Mano de obra:** La causa identificada en la categoría “mano de obra” fue que los operadores de las máquinas de rectificado provocan una pérdida por paradas debido a que no están capacitados para intervenir su máquina y deben esperar a que el personal de mantenimiento llegue al área de rectificado.

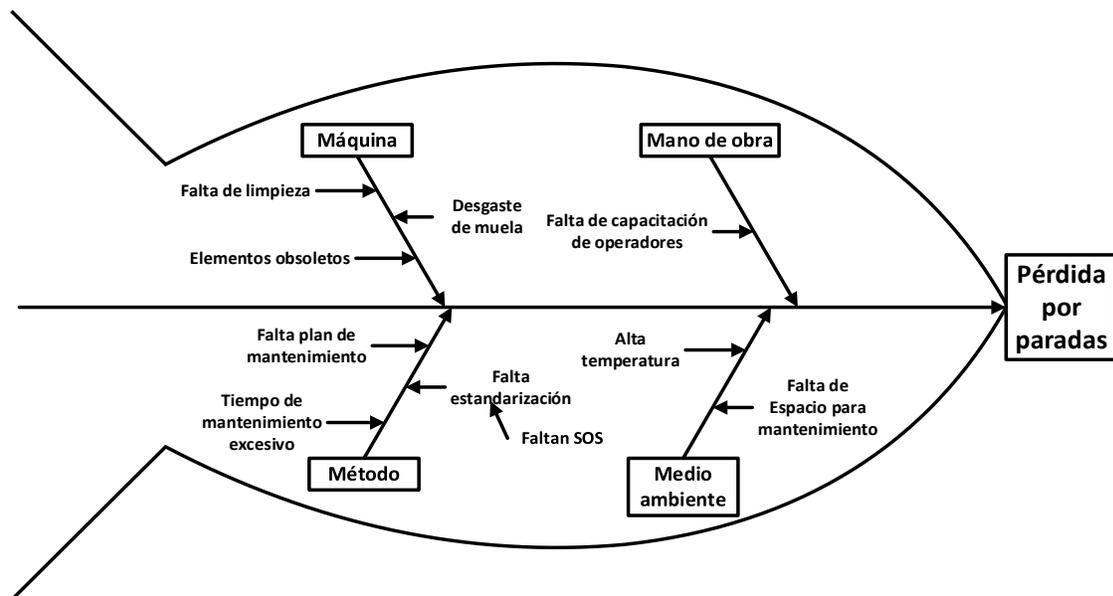


Figura 3. 17 Diagrama de pescado de las causas de pérdida por paradas.

- **Método:** Las causas identificadas en la categoría “métodos” que provocan una pérdida por paradas fueron las siguientes:
 - No existe un plan de mantenimiento predictivo y el mantenimiento preventivo no está completamente establecido.
 - El mantenimiento de las máquinas rectificadoras no suele realizarse de una manera continua, pero cuando se realiza el tiempo es muy excesivo.
 - Falta de estandarización en el mantenimiento; no se cuenta con hojas estándar de proceso (SOS) que indiquen el flujo del proceso de mantenimiento, materiales, herramientas, ajustes, etc.
- **Medio ambiente:** Las causas identificadas en la categoría “medio ambiente” que provocan una pérdida por paradas fueron las siguientes:
 - No se cuenta con el espacio suficiente para intervenir la máquina, ya que se requiere el uso de montacargas para desmontar y montar los componentes.
 - Debido a que rectificado es un proceso donde se utiliza una muela, la cual es una herramienta abrasiva, existen temperaturas muy elevadas que dificultan trabajar en ese proceso.

3.7.2 Analizar factor tasa de rendimiento

De acuerdo con la Tabla 2. 28 (Sección 2.8.4), el factor “tasa de rendimiento” está relacionado directamente con la clase “pérdida de velocidad”. Con base en esto, se analizó la Tabla 3. 11 (Sección 3.6.2), concluyendo que hay problemas en la tasa de rendimiento, debido a que no se alcanza la tasa estándar de producción por pérdidas de velocidad, por esta razón, el equipo de trabajo desarrolló un diagrama de pescado (Figura 3. 18) para determinar causas que provocan estas pérdidas, las cuales, reducen el factor tasa de rendimiento del proceso de rectificado. Las causas encontradas en cada una de las categorías del diagrama de pescado fueron las siguientes:

- **Medio ambiente:** La causa identificada en la categoría “medio ambiente” del proceso de rectificado fue que existen temperaturas elevadas, ya que rectificado es un proceso donde se utiliza una herramienta abrasiva que remueve material provocando que existan altas temperaturas, dificultando el trabajo en ese proceso.

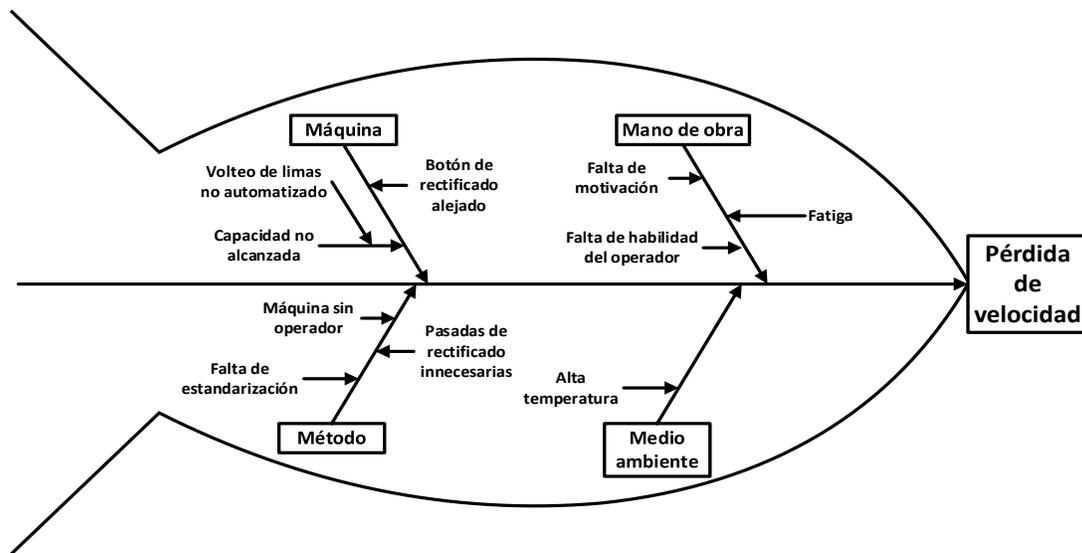


Figura 3. 18 Diagrama de pescado de las causas de pérdida de velocidad.

- **Máquina:** Las causas identificadas en la categoría “máquina” de rectificado que provocan pérdidas de velocidad fueron las siguientes:
 - La capacidad de diseño que tienen las máquinas rectificadoras no es alcanzada debido a que su mecanismo es obsoleto y los operadores deben voltear manualmente las limas 4 veces.
 - Los operadores deben oprimir un botón que activa un cilindro hidráulico, el cual se encarga de rectificar la muela para que su superficie sea uniforme. Sin embargo, este botón se encuentra alejado del área de trabajo del operador, por lo que el operador pierde tiempo al ir hasta ese lugar.
- **Mano de obra:** Las causas identificadas en la categoría “mano de obra” de rectificado que provocan pérdidas de velocidad fueron las siguientes:
 - La falta de habilidad del operador para manejar dos rectificadoras al mismo tiempo provoca que las máquinas se encuentren paradas gran parte del día laboral, generando pérdidas de velocidad.
 - El exhaustivo movimiento que realizan los trabajadores durante su jornada laboral provoca una fatiga en su cuerpo, reduciendo su rendimiento y disminuyendo su velocidad.
 - No hay suficientes incentivos dentro de la fábrica de herramientas manuales para los operadores, disminuyendo su compromiso.

- **Método:** Las causas identificadas en la categoría “método” de rectificado que provocan pérdidas de velocidad fueron las siguientes:
 - No existe un estándar de las actividades de rectificado, lo cual representa un problema crítico ya que no se está analizando con exactitud como deben ser realizadas. Los operadores se basan principalmente en su experiencia, lo que puede llevar a errores por exceso de confianza.
 - En el proceso de rectificado la lima se voltea 4 veces, incluso hasta 5 si no cumple con las dimensiones requeridas por el cliente, por lo que se puede reducir la primera pasada que genera el punto de referencia de las máquinas.
 - Las máquinas de rectificado tienen diversos paros debido a que el operador maneja dos rectificadoras al mismo tiempo.

3.7.3 Analizar factor tasa de calidad

De acuerdo con la Tabla 2. 28 (Sección 2.8.4), el factor “tasa de calidad” está relacionado directamente con la clase “pérdida de calidad”. Con base en esto, se analizaron los resultados de la Tabla 3. 13 (Sección 3.6.3), concluyendo que hay problemas en la tasa de calidad, debido a que hay limas no conformes por pérdidas de calidad, por esta razón, el equipo de trabajo desarrolló un diagrama de pescado (Figura 3. 19) para determinar causas que provocan estas pérdidas, las cuales, reducen el factor de tasa de calidad del proceso de rectificado. Las causas encontradas en cada una de las categorías del diagrama de pescado fueron las siguientes:

- **Máquina:** Las causas identificadas en la categoría “máquina” de rectificado que provocan pérdidas de calidad fueron las siguientes:
 - La muela que rectifica las limas puede llegar a tener imperfecciones en su superficie, provocando que las limas tengan defectos.
 - La muela se va desgastando conforme a su uso, por lo que su diámetro va disminuyendo, provocando que ya no exista el contacto suficiente para rectificar correctamente las limas.

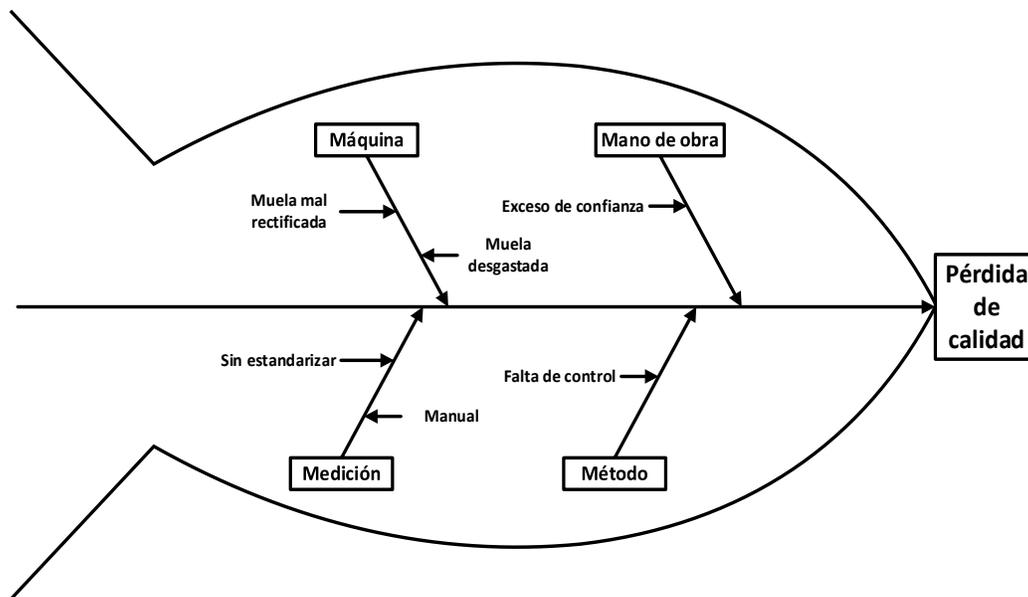


Figura 3. 19 Diagrama de pescado de las causas de pérdida de calidad.

- **Método:** La causa identificada en la categoría “método” del proceso de rectificado fue que hace falta control en la inspección, cada máquina rectifica 21 limas al mismo tiempo por lo que el operador no puede revisar todas las limas, provocando pérdidas de calidad.
- **Mano de obra:** La causa identificada en la categoría “mano de obra” del proceso de rectificado fue que algunos operadores tienen muchos años de experiencia, lo que provoca un exceso de confianza en la realización de sus tareas, no poniendo la debida atención provocando pérdidas de calidad.
- **Medición:** Las causas identificadas en la categoría “medición” de limas rectificadas que provocan pérdidas de calidad fueron las siguientes:
 - Actualmente no existe un estándar de la inspección, los operadores se basan principalmente en su experiencia, lo que puede llevar a errores por exceso de confianza.
 - La inspección se hace de manera manual, no existe un método electrónico.

3.7.4 Analizar OEE

Para realizar el análisis del OEE se obtuvieron los promedios de cada uno de los factores: disponibilidad 99.39%, tasa de rendimiento 70.58% y tasa de calidad 99.77%; mostrados en

la Tabla 3. 14 (Sección 3.6.4). Posteriormente, para ver si cumplían o no con los valores mínimos requeridos, se compararon con los estándares, mencionados en la Sección 2.8, propuestos por Levitt (2005). Este comparativo se muestra en la Figura 3. 20, donde el color verde representa los valores reales obtenidos en el proceso de rectificado y el color naranja los valores estándar.

Con base en el comparativo de la Figura 3. 20 se llegó a la conclusión que, de los tres factores calculados del OEE, el factor tasa de rendimiento es el factor más bajo, con un promedio de 70.58%, por lo que los esfuerzos se concentraran en este factor para elevar el valor de OEE del proceso de rectificado.

Al realizar el cálculo del indicador OEE del proceso de rectificado se observó lo siguiente:

- Que no se tiene un buen registro de los tipos de falla por los que se detienen las máquinas durante el turno de trabajo, únicamente se registra el tiempo que demoró el mantenimiento correctivo.
- Que no se tiene un registro en concreto del tiempo de paradas menores, haciendo un poco difícil el cálculo de este indicador.

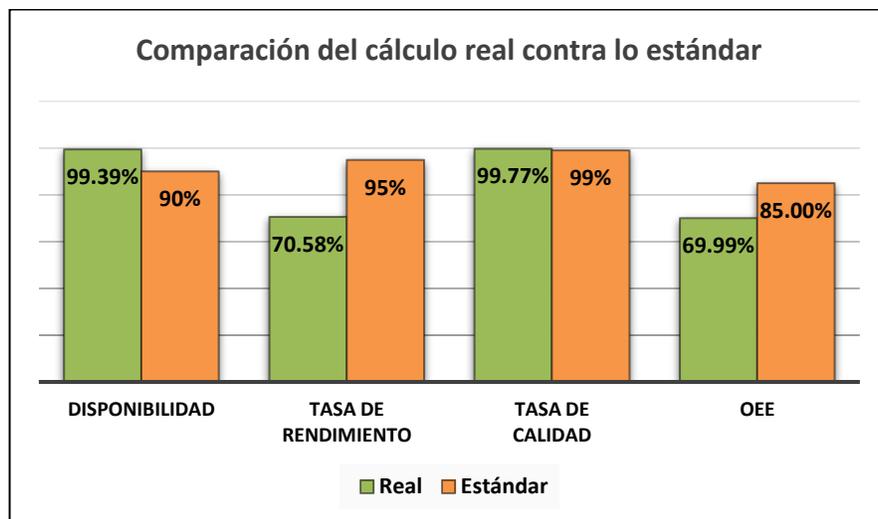


Figura 3. 20 Comparación del cálculo real contra lo estándar.

3.7.5 Proponer soluciones de mejora

En la Sección 3.7.4 se concluyó que el factor más bajo del OEE del proceso de rectificado es el factor “tasa de rendimiento”, el cual, es afectado directamente por las pérdidas de velocidad que existen en el proceso de rectificado, por lo que se concentraron los esfuerzos en encontrar soluciones de mejora para eliminar las principales causas de pérdida de velocidad que se determinaron en el diagrama de pescado, mostrado en la Figura 3. 18 (Sección 3.7.2).

El equipo de trabajo determinó que las principales causas de pérdidas de velocidad son las que se encuentran dentro de las categorías método y máquina del diagrama de pescado, debido a que son las que tienen el mayor número de ramificaciones. Con base en esto, se elaboró la Tabla 3. 15, donde se describen las causas principales de pérdida de velocidad, el tipo de categoría a la que pertenecen, el personal involucrado y las soluciones de mejora propuestas.

Tabla 3. 15 Soluciones para eliminar las principales causas que generan pérdidas de velocidad.

Causas principales que generan pérdidas de velocidad	Tipo de categoría	Personal involucrado	Soluciones de mejora
Las máquinas de rectificado tienen diversos paros debido a que el operador maneja dos rectificadoras al mismo tiempo.	Método	Operador	Colocar un operador en cada máquina de rectificado.
Los operadores deben oprimir un botón para rectificar la muela que se encuentra alejado del área de trabajo del operador, perdiendo tiempo al ir hasta ese lugar.	Máquina	Operador	Reubicar botón de rectificado de muela cerca del área de trabajo del operador.
La capacidad de diseño que tienen las máquinas rectificadoras no es alcanzada debido a que su mecanismo es obsoleto y los operadores deben voltear manualmente las limas 4 veces.	Máquina	Operador	Instalar mecanismo de volteo automático de las limas
La lima se voltea 4 veces, la primera es para generar el punto de referencia de las máquinas, actividad que no agrega valor.	Método	Operador, preparador y supervisor	Disminuir pasadas de rectificado, eliminando la generación de punto de referencia.
El proceso de rectificado no se encuentra estandarizado	Método	Operador y supervisor	Realizar hojas estándar de operación.

3.7.6 Seleccionar la solución de mejora con mayor impacto

Una vez que se realizaron las propuestas de solución de mejora, mostradas en la Tabla 3. 15 (Sección 3.7.5), se seleccionó la propuesta con mayor impacto para el factor “tasa de rendimiento” aplicando el método por puntos. Los pasos utilizados fueron los siguientes:

- **Definir factores críticos para la evaluación de las soluciones propuestas.**

Para la realización del método por puntos se seleccionaron factores críticos para la selección de la solución con mayor impacto con base en algunos requerimientos del gerente y limitaciones del tesista. Los factores críticos para la selección de la solución con mayor impacto se muestran a continuación:

- Importancia para el gerente de la fábrica. Este factor se seleccionó ya que el gerente de la fábrica de herramientas manuales tiene una visión general de la línea de lima triangular 6 y del proceso de rectificado, conociendo cuáles son sus necesidades y requerimientos más importantes.
- Alto impacto en la pérdida de velocidad. Este factor fue seleccionado por el hecho de que algunas soluciones propuestas tienen un mayor impacto que otras en la disminución de la pérdida de velocidad en el proceso de rectificado.
- Menor tiempo de presencia del tesista en fábrica. Este factor fue considerado debido a que durante el tiempo en que se realizó este trabajo, se presentó un problema de contingencia sanitaria global, restringiendo la entrada del tesista a la fábrica de herramientas manuales para evitar cualquier tipo de contagio, de acuerdo con lo establecido por las autoridades sanitarias.
- Menor tiempo de paro de producción para implementar solución. Este factor se seleccionó ya que, en las pláticas con el gerente, se solicitó que la implementación de las soluciones fuera en el menor tiempo posible para evitar paros de producción.
- Menor costo de implementación. Este factor fue seleccionado debido a que fue un requisito del gerente de la fábrica de herramientas, optimizar los costos de la implementación de la solución.

- **Asignar un peso para cada factor crítico.**

Para la asignación del peso de cada factor crítico se seleccionó una escala del 1 a 100. Se consideró que entre más importante es el factor, mayor será la puntuación asignada al factor correspondiente. Los pesos asignados a los factores críticos a evaluar se muestran en la Tabla 3. 16.

- **Elaborar una escala para calificar cada solución propuesta con base en los factores críticos.**

Posterior a la obtención del peso de los factores críticos de evaluación, se creó una escala para evaluar cada solución propuesta con base en los factores críticos. La escala definida se presenta en la Tabla 3. 17.

- **Calificar cada solución propuesta con base en el cumplimiento de los factores críticos.**

Una vez determinada la escala de evaluación ésta se usó para colocar una calificación a cada solución propuesta para conocer su capacidad en el cumplimiento de cada uno de los factores críticos definidos. En la Tabla 3. 18 se muestra la calificación de cada solución propuesta respecto a cada factor crítico.

Tabla 3. 16 Peso asignado para cada factor a evaluar.

Factores	Peso
1. Importancia para el gerente de la fábrica	100
2. Alto impacto en la pérdida de velocidad	90
3. Menor tiempo de presencia del tesista en fábrica	80
4. Menor tiempo de paro de producción para implementar solución	70
5. Menor costo de implementación	60

Tabla 3. 17 Escala de evaluación de las soluciones propuestas.

Letra	Descripción	Valor
A	Casi perfecto (excelente)	4
E	Especialmente bueno (muy bueno)	3
I	Importantes (bueno)	2
O	Ordinarios (mediano)	1
U	Sin importancia (mediocre)	0

- **Multiplicar la calificación de cada solución propuesta con respecto al peso de cada factor crítico.**

Una vez asignadas las calificaciones de cada solución propuesta con base en el cumplimiento de los factores críticos, se realizó la multiplicación del peso individual de cada factor por la calificación del cumplimiento de solución propuesta. Los resultados se muestran en la Tabla 3. 18.

Tabla 3. 18 Método por puntos para la selección de la solución con mayor impacto.

Método por Puntos														
Fábrica:		[REDACTED]										Fecha: 03/06/2020		
Proyecto:		Selección de mejor propuesta												
Descripción de las soluciones propuestas:														
A	Colocar un operador en cada máquina										Donde:			
B	Reubicar botón de rectificado de muela cerca de área de trabajo										A: Casi perfecto (4)			
C	Instalar mecanismo de volteo automático de las limas										E: Especialmente bueno (3)			
D	Eliminar generación del punto de referencia										I: Importantes (2)			
E	Realizar hojas estándar de operación										O: Ordinarios (1)			
F											U: Sin importancia (0)			
G														
Alternativas, ponderaciones y totales establecidas por: _____ Gerente y tesista														
Factores	Peso	Acotación bruta o ponderada										Comentarios		
		A		B		C		D		E			F	G
1. Importancia para el gerente de la fábrica	100	I	200	I	200	A	400	I	200	I	200			
2. Alto impacto en la pérdida de velocidad	90	E	270	I	180	A	360	A	360	I	180			
3. Menor tiempo de presencia del tesista en fábrica	80	I	160	I	160	A	320	I	160	E	240			
4. Menor tiempo de paro de producción para implementar solución	70	I	140	I	140	E	210	I	140	I	140			
5. Menor costo de implementación	60	I	120	I	120	E	180	E	180	E	180			
Total			890		800		1470		1040		940			La propuesta C es la ganadora

- **Realizar suma de la multiplicación de cada solución propuesta.**

Para la selección de la solución con mayor impacto se realizó la suma de los valores que se encuentran en cada columna. El resultado de cada columna se colocó en la sección de “Total” de la Tabla 3. 18. El valor obtenido representa, de forma cuantitativa, el nivel de impacto de cada solución propuesta con base en los diversos factores de evaluación.

- **Seleccionar la solución con mayor impacto.**

En la Tabla 3. 18 se muestra que la solución, con mayor impacto en el proceso de rectificado para disminuir la pérdida de velocidad, es la propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas) ya que ésta obtuvo la mayor calificación: 1470 puntos.

En la Tabla 3. 18 también se puede observar que la propuesta D (Eliminar generación de punto de referencia) tiene el segundo lugar en impacto; su calificación fue de 1040 puntos.

3.8 Definir técnicas y herramientas a implementar

Con base en los resultados obtenidos del análisis del factor “tasa de rendimiento” (Sección 3.7.2) y la selección de la solución de mayor impacto para reducir la pérdida de velocidad (Sección 3.7.6), se determinó utilizar las siguientes técnicas y herramientas de ingeniería industrial para disminuir las pérdidas de velocidad y mejorar el factor de tasa de rendimiento del proceso de rectificado:

- Simulación para construir el modelo mediante el *software Flexsim*.
 - La simulación se utilizará para evaluar, con base en su inversión y mejora del factor “tasa de rendimiento”, la solución de instalar un volteador automático de limas e implementado en cada máquina del proceso de rectificado. Con ayuda del *software Flexsim* para la construcción del modelo de simulación, permitirá una mejor visualización del proceso bajo estudio, debido a que su característica es modelar en tres dimensiones.
 - *Software Expertfit*. Este *software* se utilizará para realizar el ajuste de distribución de datos de tiempo del proceso de rectificado y determinar el tipo

de distribución de probabilidad al que se ajustan. La distribución de probabilidad determinada por *Expertfit* se utilizará en el modelo de simulación desarrollado con el *software Flexsim*.

- CAD y el *software* de diseño *Mastercam*
 - El diseño asistido por computadora permitirá realizar, por medio de entidades geométricas, figuras, planos o modelos 3D de los elementos que conforman el proceso de rectificado.
 - El *software Mastercam* permitirá utilizar las entidades geométricas de CAD en 3D que conforman el proceso de rectificado.

3.9 Construir modelo de simulación para evaluar la solución

Para la construcción del modelo de simulación de la situación actual y del modelo con la solución de mejora (Sección 3.7.6), se realizaron los siguientes pasos, los cuales están basados en la metodología que proponen Law y Associates (2007), mencionada en la Sección 2.4.3:

1. Formular el problema.
2. Planear desarrollo del modelo de simulación.
3. Recolectar datos para el modelo de simulación.
4. Construir modelo de simulación.
5. Realizar corridas piloto del modelo de simulación.
6. Validar modelo de simulación.
7. Experimentar en el modelo de simulación con la solución de mejora.
8. Documentar y presentar de resultados

3.9.1 Formular problema

En la fábrica de herramientas manuales “XXXXXXXXXX”, la línea de lima triangular 6 tiene un proceso crítico llamado “rectificado”, el cual, fue determinado mediante el análisis del VSM del estado presente, realizado en la Sección 3.4.7, con base en el mayor tiempo de ciclo (TC).

Una vez determinado que rectificado es el proceso crítico se calculó la OEE (Sección 3.6), obteniéndola del producto de tres factores: disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad.

El problema por resolver es que el proceso de rectificado tiene una OEE que no alcanza los valores mínimos requeridos; problemática detectada mediante el análisis de la eficacia global (OEE), realizado en la Sección 3.7.4, debido a que el valor del factor “tasa de rendimiento” es demasiado bajo por pérdidas de velocidad en el proceso.

Una de las causas principales de la pérdida de velocidad es que la capacidad de diseño que tienen las máquinas del proceso de rectificado no es alcanzada debido a que su mecanismo es obsoleto y los operadores deben voltear manualmente las limas triangulares 4 veces.

Para estudiar el problema se considerarán todas las actividades del proceso de rectificado para simular la propuesta de mejora con mayor impacto, seleccionada en la Sección 3.7.6, que consiste en analizar si el diseño de un volteador automático de limas aumenta el valor del factor “tasa de rendimiento” y, por consiguiente, que la OEE alcance los valores mínimos requeridos por la fábrica de herramientas manuales “██████████”.

3.9.2 Planear desarrollo del modelo de simulación

Para que el desarrollo del modelo de simulación sea lo más cercano al sistema real, se consideraron las siguientes acciones:

- **Definir el objetivo general del modelo de simulación**

El objetivo general del estudio es determinar si la propuesta de mejora: diseñar un volteador automático de limas; aumentará el valor del factor “tasa de rendimiento” para alcanzar los valores mínimos requeridos y justificar la inversión económica y de tiempo.

- **Plantear preguntas específicas que deben ser contestadas por el modelo de simulación**

Las preguntas específicas que fueron planteadas y que serán contestadas por el modelo de simulación se muestran a continuación:

- ¿Qué porcentaje aumentó la tasa de rendimiento con la propuesta de mejora?
- ¿Cuál es el nuevo TC del proceso de rectificado con la propuesta de mejora?
- ¿Cuál es la nueva TS del proceso de rectificado con la propuesta de mejora?

- **Determinar medidas de desempeño a evaluar**

Las medidas de desempeño que se definieron para la evaluación de desempeño de la simulación de la propuesta de mejora fueron las siguientes:

- Tiempo promedio de alimentar las máquinas de rectificado.
- Tiempo promedio de rectificado de limas.
- Tiempo promedio de volteo de limas.
- Tiempo promedio de inspección.
- Tiempo promedio del TC del proceso de rectificado.

- **Definir alcance y propósito del modelo de simulación**

El alcance del modelo de simulación para el presente proyecto abarcará únicamente el proceso de rectificado de la línea de lima triangular 6. La Figura 3. 12 de la Sección 3.5 mostró que el proceso inicia desde que el operador recoge las limas, del carro del proceso anterior (corte de espigo) y termina cuando el operador coloca las limas inspeccionadas en el carro del proceso siguiente (raspado y sello).

El propósito del modelo de simulación consiste en analizar si:

- Aumenta la OEE del proceso de rectificado.
- Aumenta la tasa de rendimiento del proceso de rectificado.
- Reduce el TC del proceso de rectificado.

- **Definir marco de tiempo, recursos y *software* a utilizar en modelo de simulación**

El marco de tiempo, los recursos necesarios para el estudio y el *software* a utilizar se muestran a continuación:

- El marco de tiempo para realizar el análisis de tiempos del proceso será de tres meses (2 veces por semana). Se definió de esta manera debido a que durante el tiempo en que se realizó este trabajo, se presentó un problema de contingencia sanitaria global, restringiendo la entrada del tesista a la fábrica

de herramientas manuales para evitar cualquier tipo de contagio, de acuerdo con lo establecido por las autoridades sanitarias.

- Los recursos requeridos para la realización del estudio fueron:
 - i. Un cronómetro para la toma de tiempos de las operaciones en el proceso de rectificado.
 - ii. Equipo de higiene y seguridad para permanecer en el área del proceso de rectificado.
 - iii. Apoyo por parte de los supervisores y operadores de las máquinas rectificadoras.
- El *software* de simulación seleccionado es *Flexsim* (Sección 3.8), ya que éste permitirá realizar una simulación 3D del sistema real y una evaluación de la solución de diseñar un volteador automático de limas en cada máquina del proceso de rectificado.

3.9.3 Recolectar datos para el modelo de simulación

Para la construcción del modelo de simulación para evaluar la solución propuesta se obtuvieron datos del sistema real bajo estudio, con el objetivo de que el modelo de simulación se apegue lo más cercano al proceso de rectificado. Para la recolección de datos se realizaron los tres pasos siguientes:

1. Definir los tipos de datos para el modelo de simulación.
2. Recolectar datos para el modelo de simulación.
3. Analizar estadísticos de los datos recolectados.

3.9.3.1 Definir los tipos de datos para el modelo de simulación

El primer paso para la recolección de datos es definir los tipos de datos para el modelo de simulación. En esencia, los datos a recolectar se definieron con base en la clasificación definida por Harrell et al. (2004), mostrada en la Sección 2.4.3.2:

- Datos estructurales.
 - *Layout* del sistema a simular.

- Número de operadores.
- Número de actividades del sistema a simular.
- Número de máquinas del proceso.
- Datos operacionales.
 - Tipo de material que se utiliza en el sistema.
 - Horarios de trabajo.
 - Tipo de sistema a simular (discreto).
 - Distribución de los operadores.
- Datos numéricos.
 - Capacidad de cada máquina dentro del sistema.
 - Tiempos de cada una de las máquinas dentro de los procesos.
 - Tiempos de las estaciones de trabajo dentro del sistema.

3.9.3.2 Recolectar datos para el modelo de simulación

Para hacer una correcta recolección de datos para el modelo de simulación, se realizaron los pasos siguientes:

1. Se realizaron formatos para facilitar la tarea de recolectar los datos de los tiempos definidos en la Sección 3.9.3.1.
2. Se estableció un lapso de tiempo en el cual se iba a realizar la recolección de datos el cual consistió en recolectar 2 veces por semana, en un periodo de 11 semanas, repartidas en tres meses, ya que en algunos días se interrumpió la recolección de datos por una restricción de entrada a la fábrica debido al problema de contingencia sanitaria global. Las semanas definidas fueron:
 - a. Semana 1. Del 4 al 5 de septiembre de 2020.
 - b. Semana 2. Del 11 al 12 de septiembre de 2020.
 - c. Semana 3. Del 18 al 19 de septiembre de 2020.
 - d. Semana 4. Del 25 al 26 de septiembre de 2020.
 - e. Semana 5. Del 2 al 3 de octubre de 2020.
 - f. Semana 6. Del 9 al 10 de octubre de 2020.
 - g. Semana 7. Del 16 al 17 de octubre de 2020.

- h. Semana 8. Del 23 al 24 de octubre de 2020.
 - i. Semana 9. Del 30 al 31 de octubre de 2020.
 - j. Semana 10. Del 6 al 7 de noviembre de 2020.
 - k. Semana 11. Del 13 al 14 de noviembre de 2020.
3. Se realizó la recolección de los datos del proceso de rectificado definidos en la Sección 3.9.3.1.
 - a. Se utilizó un cronómetro para contabilizar tiempos.
 - b. Se tomaron datos para determinar la distancia de recorrido promedio.
 - c. Se tomaron datos para determinar el tiempo promedio utilizado para cada actividad.
 - d. Se realizó el conteo de limas en el procesos y conteo del número de operadores.
 - e. Se tomaron medidas de las máquinas del proceso.
 4. Se capturó la información en un archivo de *Excel* (Anexo 2) con el objeto de tener un mejor control y orden de la información obtenida en el paso anterior. Los tiempos recolectados fueron estandarizados en segundos, ya que es la unidad de tiempo que se utilizará en el modelo de simulación.

3.9.3.3 Analizar estadísticos de los datos recolectados

El análisis estadístico de los datos fue realizado para determinar las distribuciones de probabilidad que se ajusten a los datos obtenidos. Dicho análisis estadístico se realizó con el *software Expertfit* el cual es una herramienta de análisis estadístico de datos incluida dentro de *Flexsim* (Sección 2.5.6).

Para determinar la distribución de probabilidad que mejor se ajustó a los datos recolectados, fue necesario llevar a cabo los pasos mostrados en la Sección 2.5.6.4.

El resultado del análisis estadístico de los datos se muestra en la Tabla 3. 19, en la cual se muestran las probabilidades de cada una de las actividades pertenecientes al proceso de rectificado.

Tabla 3. 19 Distribuciones obtenidas del análisis de los datos del proceso de rectificado.

Actividad	Distribución de probabilidad
Tomar limas del carro y acomodar	lognormal2 (5.668092, 6.975095, 0.731841, <stream>)
Generar punto de referencia	Beta (13.064340, 23.671195, 0.925605, 0.858095, <stream>)
Voltear limas por primera vez	lognormal2 (2.806553, 7.691113, 1.335319, <stream>)
Rectificar por primera vez	Erlang (0.000000, 0.429243, 95.000000, <stream>)
Voltear limas por segunda vez	Beta (2.571233, 20.635485, 1.713111, 2.565195, <stream>)
Rectificar por segunda vez	Loglaplace (0.000000, 42.200000, 19.769935, <stream>)
Voltear limas por tercera vez	Inversegaussian (1.910342, 43.522991, 4.691796, <stream>)
Rectificar por tercera vez	Weibull (25.691359, 10.086541, 3.467739, <stream>)
Inspeccionar y colocar en charola	Loglaplace (0.000000, 21.250000, 2.252831, <stream>)

3.9.4 Construir modelo de simulación

Una vez realizado la recolección y análisis de los estadísticos de los datos, se procedió a construir el modelo de simulación de la situación actual del proceso de rectificado de la línea de lima triangular 6, realizando los pasos siguientes:

1. Definir el sistema a simular.
2. Definir los supuestos del modelo.
3. Verificar el modelo conceptual.
4. Construir el *layout* y equipo en 3D involucrados en el proceso a simular.
5. Construir el modelo de simulación.
6. Verificar el modelo de simulación.

3.9.4.1 Definir el sistema a simular

El sistema a simular consiste en el proceso de rectificado realizado en la línea de lima triangular 6. El proceso de rectificado presenta los siguientes elementos:

- Se trabajan tres turnos al día: el primer turno es de 6 a 14 horas, el segundo turno es de 14 a 22 horas y el tercer turno es de 22 a 6 horas.
- Los domingos no se trabaja.
- El personal asignado al área de rectificado son 4 operadores en las máquinas rectificadoras (cuatro por cada turno).

- La materia prima que se utiliza en el proceso siempre está disponible.
- La materia prima que se procesa es lima triangular (sin rectificar).
- Sólo existen 9 carritos para transportar la materia prima.
- Las actividades del proceso de rectificado son las siguientes (Sección 3.5):
 - Tomar limas del carro del proceso anterior.
 - Acomodar limas en la máquina de rectificado.
 - Rectificar una cara de las limas (referencia).
 - Voltar limas por primera vez.
 - Rectificar primera cara de las limas.
 - Voltar limas por segunda vez.
 - Rectificar segunda cara de las limas.
 - Voltar limas por tercera vez.
 - Rectificar tercera cara de las limas.
 - Inspeccionar limas.
 - Depositar limas en el carro del proceso siguiente.
- A pesar de que el sistema a simular consiste en el proceso de rectificado, también se deberá considerar la parte final del proceso anterior (corte de espigo), ya que esta parte servirá como la fuente de origen de la materia prima.
- El diagrama de flujo de proceso de la Tabla 3. 20 corresponde al proceso de rectificado que va desde la llegada de limas del proceso anterior (corte de espigo) hasta la entrega de limas rectificadas al proceso siguiente (raspado y sello). Los tiempos promedios que están en el diagrama corresponde al tiempo de procesamiento de un lote de 21 limas que tarda una de las máquinas rectificadoras.
- En el diagrama de recorrido de la Figura 3. 21, se muestra lo siguiente:
 - El recorrido del operador del proceso de rectificado.
 - El recorrido de las limas desde el proceso anterior (corte de espigo) hasta la llegada al stock de entrada.
 - El recorrido de las limas desde el stock de salida al proceso posterior (raspado y sello).

Tabla 3. 20 Diagrama de flujo del proceso de rectificacido.

Diagrama de procesos				Operario	Material	Equipo		
					X			
Diagrama	1	Página	1	Resumen				
Proceso: Rectificado				Actividad	Actual	Propuesta	Economía	
Actividades involucradas: <ul style="list-style-type: none"> • Tomar limas del carro del proceso anterior • Acomodar limas en la máquina rectificadora • Rectificar una cara de las limas (referencia) • Voltar limas por primera vez • Rectificar primera cara de las limas • Voltar limas por segunda vez • Rectificar segunda cara de las limas • Voltar limas por tercera vez • Rectificar tercera cara de las limas • Inspeccionar limas • Depositar limas en carro del proceso posterior 				Operación		230.31		
				Transporte		0		
				Espera		0		
				Inspección		23.85		
				Almacén		0		
				Distancia (m)		24.6		
Método: Actual (X) Propuesto ()				Personas	1			
Lugar: Línea de lima triangular 6				Tiempo (seg)	254.17			
Descripción				Personas	Distancia (m)	Tiempo (seg)	Símbolos	
Tomar limas del carro del proceso anterior				1	0.5	3.01		
Acomodar limas en la máquina rectificadora				1	0	11.81		
Generar punto de referencia				1	2.5	18.57		
Voltar limas por primera vez				1	2.9	23.26		
Rectificar primera cara de las limas				1	2.5	40.77		
Voltar limas por segunda vez				1	2.9	9.82		
Rectificar segunda cara de las limas				1	2.5	41.68		
Voltar limas por tercera vez				1	2.9	45.43		
Rectificar tercera cara de las limas				1	2.5	34.76		
Inspeccionar limas				1	2.9	23.85		
Depositar limas en carro del proceso posterior				1	2.5	1.16		

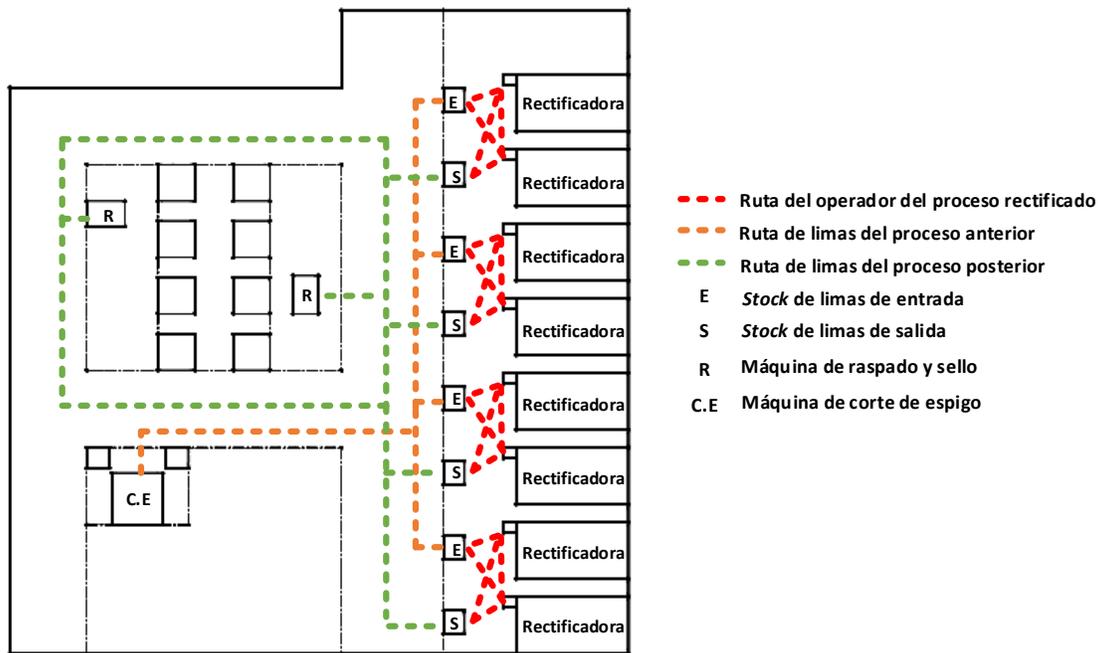


Figura 3. 21 Diagrama del recorrido del proceso de rectificado.

3.9.4.2 Definir los supuestos del modelo

Los supuestos del modelo de simulación son los siguientes:

- La familia objetivo es “Limas” y el producto objetivo de la familia es “Triangular 6”, tal y como se determinó en la Sección 3.4.3.2.
- Los tiempos de las operaciones, transportes e inspección del proceso de rectificado, fueron tomados de los resultados del análisis estadístico de los datos, mostrados en la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3).
- El tiempo en el proceso de rectificado puede variar dependiendo la urgencia del pedido del cliente.
- El tiempo de la actividad de volteo de limas puede variar dependiendo que otras actividades se encuentre realizando el operador.
- La simulación del procesamiento de lima triangular 6 se realizará desde que se reciben las limas sin rectificar del proceso anterior (corte de espigo), hasta que se colocan las limas rectificadas en el carro del proceso posterior (raspado y sello), para que el sistema simule la situación real (Sección 3.9.4.1).

- La cantidad de lima triangular 6 a ser modelada será con base en la cantidad procesada que se genere en el proceso de rectificado en tres turnos, restando el tiempo de reuniones, comida y limpieza.

Con base en estos supuestos, se desarrollará el modelo de simulación de la situación actual del sistema a simular.

3.9.4.3 Verificar el modelo conceptual

Una vez definidos los supuestos del modelo se verificó que el modelo conceptual del proceso a simular fuera una representación del proceso real a modelar. En este proceso de verificación se revisó con el personal de supervisión y el gerente de planta que el modelo conceptual no presentara ninguna anomalía. Para verificar el modelo, se realizó lo siguiente:

- Se verificó que la distribución del área del proceso de rectificado y la ruta de flujo de la lima triangular 6, mostrada en la Figura 3. 21, fuera una representación verdadera. El personal de supervisión determinó que el diagrama si representaba de forma adecuada al proceso real a simular.
- Se verificó que los supuestos del modelo (Sección 3.9.4.2), fueran correctos para asegurar una representación real del proceso de rectificado.
- Se verificó que los tiempos obtenidos en la toma de tiempos, así como los resultados del análisis estadístico de los datos (Sección 3.9.3.3), representaran la situación real a simular.

Con la verificación del modelo conceptual se obtuvieron los elementos necesarios para empezar con la construcción del modelo de simulación.

3.9.4.4 Construir el *layout* y máquinas en 3D involucrados en el proceso a simular

Para la construcción del modelo de simulación en *Flexsim* se requirió que las máquinas y el área de proceso de rectificado (*layout*) fueran representados en dibujos de 3 y 2 dimensiones, respectivamente, para representar el proceso apegado a la realidad.

El objetivo de la construcción del *layout* y las máquinas del proceso de rectificado fue el siguiente:

- El *layout* se construyó como referencia del modelo de *Flexsim* para facilitar la localización de las máquinas, del personal y de los carros dentro del proceso.
- Las máquinas y carros se construyeron para tener una mejor visualización del modelo de simulación apegado a la realidad y que sirvieran como apoyo en la toma de decisiones.

En la construcción del *layout*, y de las máquinas del procesamiento de lima triangular 6, en el proceso de rectificado, se utilizó el *software MasteCcam* el cual es compatible con el *software Flexsim* por lo que es fácil importar los diseños en 3D.

Para la construcción del *layout* se realizaron los siguientes pasos:

- Mediciones del área del proceso de rectificado, corte de espigo y raspado.
- Creación del dibujo de *layout* en 2D con el *software Mastercam*. Para este paso se dibujó el área del proceso de rectificado, corte de espigo y raspado (Figura 3. 22).
- Verificación de que el *layout* en 2D cumplía con las dimensiones especificadas.

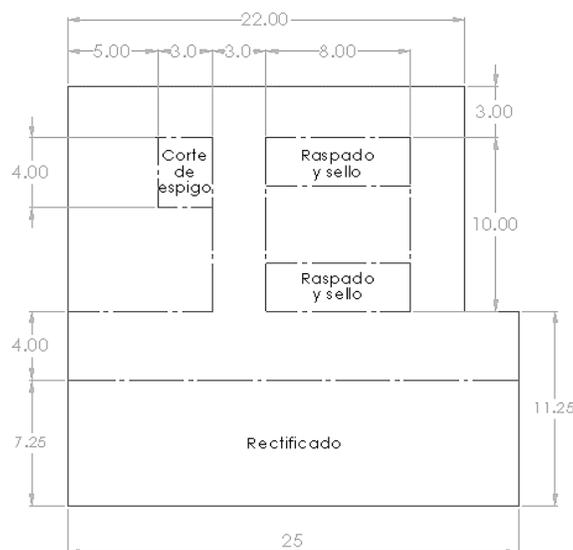
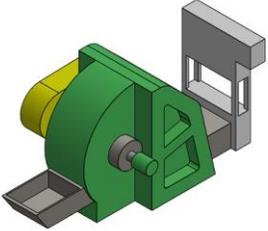
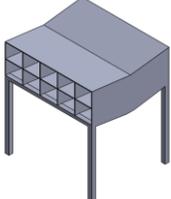


Figura 3. 22 Layout del proceso de rectificado.

Para la construcción de la maquinaria y equipo se realizaron los siguientes pasos:

- Definición de las máquinas y de los carros del proceso de rectificado necesarios a modelar.
- Medición de las máquinas y los carros del proceso de rectificado.
- Creación de las de las máquinas y carros en objetos 3D con el *software Mastercam*, que se muestran en la Tabla 3. 21.
- Verificación de que los objetos 3D cumplieran con las dimensiones especificadas.

Tabla 3. 21 Listado de objetos 3D del modelo de simulación.

Proceso	Equipo	Objeto 3D
Rectificado	Máquina rectificadora	
Rectificado	Mesa de trabajo	
Rectificado y Raspado-sello	Carro para limas rectificadas	
Rectificado y corte	Carro para limas sin rectificar	

3.9.4.5 Construir el modelo de simulación

Para iniciar la construcción del modelo de simulación primero se definió a cuál tipo de modelo pertenecía (Sección 2.4.2). Para el presente caso en particular, el modelo de simulación pertenece a un modelo discreto debido a que el modelo cambia en determinados puntos separados en el tiempo.

Una vez definido el tipo de modelo de simulación, el proceso bajo estudio se representó en el *Software Flexsim* realizando lo siguiente:

- Importar el *layout* del proceso de rectificado, corte y rapado-sello.
- Definir los *Objects* a utilizar en el modelo de simulación.
- Configurar las propiedades de los *Objects* del modelo de simulación.
- Conectar puertos de entrada, salida y centrales entre los *Objects*.
- Realizar la programación de los *Objects* del modelo de simulación.

3.9.4.5.1 Importar el *Layout* del proceso de rectificado, corte y rapado-sello

Para iniciar con la construcción del modelo de simulación del proceso de rectificado, el primer paso fue importar el *layout* de la Figura 3. 22, construido en la Sección 3.9.4.4, al *software Flexsim*.

Para importar el *layout* dibujado en *Mastercam* se exportó como un archivo DWG (*.dwg) y se importó a *Flexsim* con la herramienta *Backgrounds*. Se colocó en la coordenada de origen 0, 0, 0 y se ajustó a la escala requerida. El *layout* importado se muestra en la Figura 3. 23.

Este paso fue el primero debido a que el *layout* permite tener una referencia de las coordenadas donde se colocaran las máquinas y el personal del proceso de rectificado, así como del proceso de corte y raspado-sello.

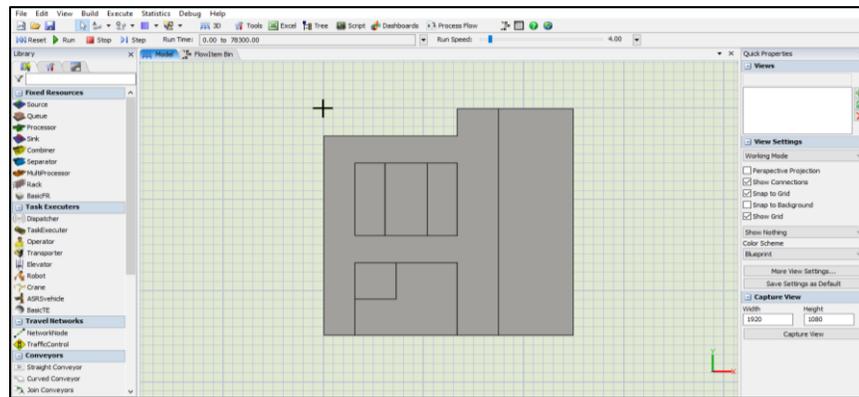


Figura 3. 23 Importación del Layout del proceso de rectificado a Flexsim.

3.9.4.5.2 Definir los tipos de *Objects* a utilizar en el modelo de simulación

El siguiente paso fue definir los tipos de *Objects* a utilizar en el modelo de simulación del proceso de rectificado. Como se describió en la Sección 2.5.2, existen 3 categorías de *Objects*: *Fixed resources*, *Flow items* y *Task executers*.

Los *Fixed resources* representan las máquinas del proceso de rectificado, corte y raspado sello. En la Tabla 3. 22 se enlistan los *Fixed resources* utilizados en el modelo de simulación y el nombre de la máquina o equipo al que representan en el proceso real.

Tabla 3. 22 Listado de *Fixed resources* utilizados en el modelo de simulación.

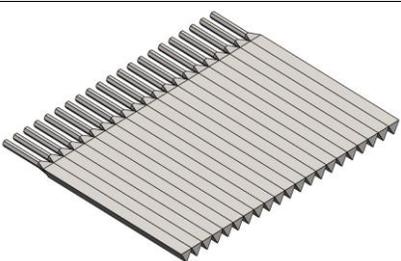
<i>Fixed resources</i>	Máquina o equipo que representa en el proceso real
<i>Source</i>	Fuente de limas que llegan al proceso de rectificado y corte. Genera limas rectificadas y sin rectificar
<i>Multiprocessor</i>	Máquina que simula varios procesos: <ul style="list-style-type: none"> • Máquinas rectificadoras
<i>Processor</i>	Máquina que simula un proceso: <ul style="list-style-type: none"> • Máquina de corte • Máquina de raspado/sello
<i>Queue</i>	Equipo que almacena limas <ul style="list-style-type: none"> • Carro para limas del proceso de forja • Carro para limas del proceso de corte • Carro para limas del proceso de rectificado • Mesa de trabajo del proceso de rectificado • Carro para limas del proceso de raspado/sello
<i>Combiner</i>	Máquina que junta lotes de 21 limas sin rectificar del proceso de corte al proceso de rectificado.
<i>NetworkNode</i>	Rutas de trabajo que siguen los operadores
<i>Sink</i>	Salida de las limas que se dirigen al proceso de picado.

Los *Task executers* representan los operadores de los procesos de rectificado, corte y raspado/sello, a quienes se les asignó tareas de operar las máquinas, cargar y descargar las limas con una secuencia establecida.

Los *Flow ítems*, que se muestran en la Tabla 3. 23, representan las limas que fluyen a través del modelo de simulación, desde que inicia el modelo hasta que termina. Las formas de los *Flow ítems* en los procesos fueron los siguientes:

- Limas sin corte de espigo, las cuales son la materia prima para el proceso de corte.
- Limas sin rectificado, las cuales son representadas por un lote de 21 limas para el proceso de rectificado.
- Limas rectificadas, las cuales son representadas por un lote de 21 limas para el proceso de raspado /sello.

Tabla 3. 23 Listado de *Flow ítems* del modelo de simulación.

Nombre del <i>Flow ítem</i>	Representación del <i>Flow ítem</i> en 3D
Limas sin corte de espigo	
Limas sin rectificado	
Limas rectificadas	

3.9.4.5.3 Configurar las propiedades de los *Objects* del modelo de simulación

El siguiente paso para la construcción del modelo de simulación del proceso de rectificado fue configurar las propiedades de los tipos de *Objects* a utilizar, realizando los siguientes puntos:

1. Agregar *Objects* al modelo de simulación, con base en la Tabla 3. 22. La forma en cómo se agregaron los *Objects* fue siguiendo los pasos que se describieron en la Sección 2.5.5.1.
2. Editar las propiedades de los *Objects* del modelo de simulación. Las propiedades de los *Objects* agregados a editar fueron: posición, rotación y tamaño; siguiendo los pasos descritos en la Sección 2.5.5.2.
3. Cambiar la apariencia de los *Objects* del modelo de simulación por otros dibujos 3D, mostrados en la Tabla 3. 21, que representa las máquinas y equipos del proceso real. Los pasos que se siguieron para cambiar la apariencia de los *Objects* fueron descritos en la sección 2.5.5.2.

En la Figura 3. 24 se muestran los *Objects* agregados sobre el *Layout* del modelo de simulación, con la posición, rotación, tamaño y apariencia requerida.

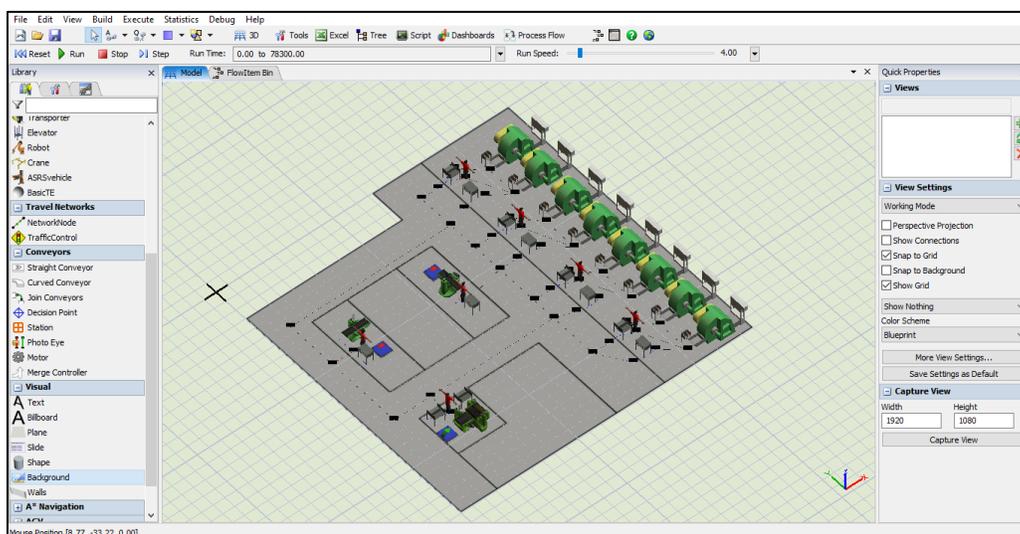


Figura 3. 24 *Objects* agregados y editados en el modelo de simulación.

3.9.4.5.4 Conectar puertos de entrada, salida y centrales entre los *Objects*

Una vez que se terminaron de configurar los *Objects* en el modelo de simulación, el siguiente paso fue conectar los puertos de entrada, salida centrales de cada uno de los *Objects*.

Para realizar las conexiones de los puertos de entrada, salida centrales de cada uno de los *Objects* se consideró:

- El diagrama del proceso de fabricación de la lima triangular 6, que se mostró en la Figura 1. 11 (Sección 1.2.11).
- El diagrama del proceso de rectificado, mostrado en la Figura 3. 12 (Sección 3.5).
- El diagrama de recorrido del proceso de rectificado, mostrado en la Figura 3. 21 (Sección 3.9.4.1).

Lo pasos que se siguieron para crear conexiones de puerto de entrada y salida entre *fixed resources* y de puerto central entre *fixed resources* y *task executers*, fueron descritos en la Sección 2.5.5.4.

En la Figura 3. 25 se muestran las conexiones de puertos de entrada, salida y centrales entre los *Objects* agregados sobre el *Layout* del modelo de simulación.

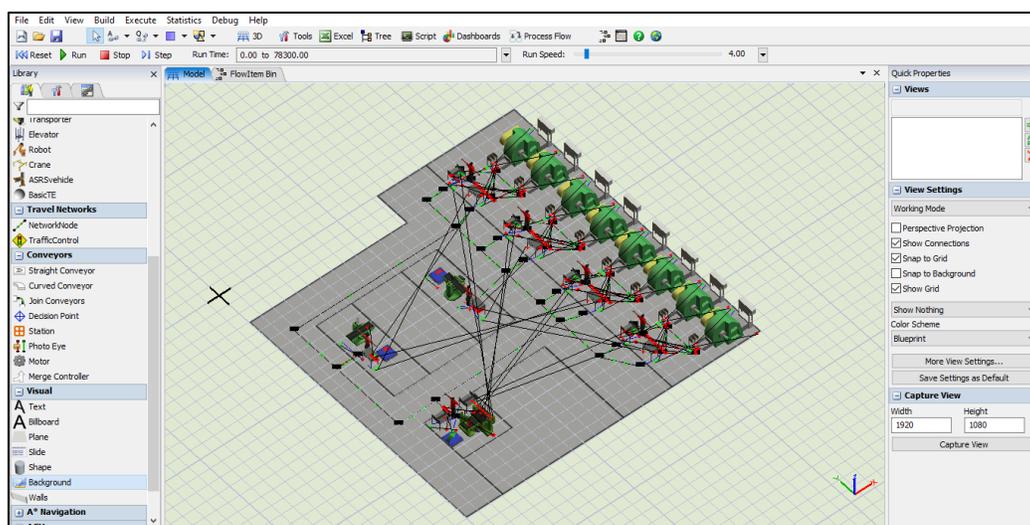


Figura 3. 25 Conexiones de puertos entre los *Objects*.

3.9.4.5.5 Realizar la programación de los *Objects* del modelo de simulación

Una vez conectados los puertos de entrada, salida y centrales entre los *Objects* del modelo de simulación, el siguiente paso fue realizar su programación. Para que la programación de los *Objects* de del modelo de simulación sean lo más cercano al sistema real, se consideraron los siguientes puntos:

- La definición del sistema a simular (Sección 3.9.4.1).
- La definición de los supuestos del modelo de simulación (Sección 3.9.4.2).
- La verificación del modelo conceptual (Sección 3.9.4.3).

Para realizar la programación de los *Objects* del modelo de simulación del proceso de rectificado, se realizaron los pasos siguientes:

1. Editar los nombres de los *Objects* del modelo de simulación (Tabla 3. 24), definidos en la Sección 3.9.4.5.2, para que tuvieran los nombres reales. Los pasos que se siguieron para cambiar el nombre de los *Objects* fueron descritos en la sección 2.5.5.2.

Tabla 3. 24 Nombre de los *Objects* del modelo de simulación.

<i>Objects</i>	Nombres de máquinas y equipos en el proceso real
<i>Source</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de lima • Fuente de lote lima
<i>Multiprocessor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina rectificadora
<i>Processor</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina de corte • Máquina de raspado/sello
<i>Queue</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Carro de forja • Carro de corte • Carro proceso de rectificado • Mesa de rectificado • Carro de raspado/sello
<i>Combiner</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Combinador corte
<i>Operator</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Operador corte • Operador rectificado • Operador raspado/sello
<i>Sink</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Salida

2. Programar cada uno de los *Source* considerando lo siguiente:
 - a. Que generen producto a partir del tiempo cero.
 - b. Que el *Source* “fuente de lima” genere 1260 limas cada 3600 segundos (Figura 3. 26).
 - c. Que el *Source* “fuente de lote de lima” genere 180 lotes de 21 limas una sola vez a partir del tiempo cero, simulando el inventario entre proceso que se generó en el turno anterior.
 - d. Que la forma 3D de los *Flow items* a la salida de cada *Source* sea el correcto, de acuerdo con la Tabla 3. 23.

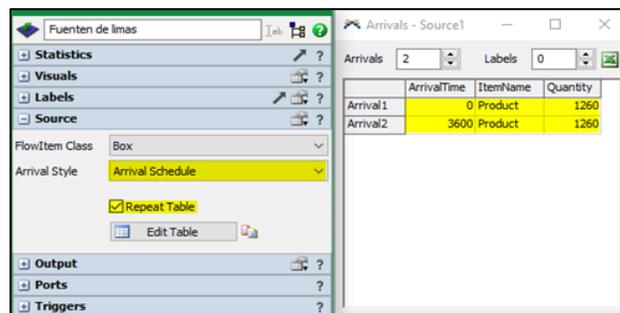


Figura 3. 26 Programación de los *Source*.

3. Programar el *Combiner* de corte para unir el *Flow items* en lotes de 21 limas, debido a que la capacidad de las máquinas de rectificado son 21 limas. Además, se programó un *trigger* para que cambie el tamaño y la forma del *Flow items* (Figura 3. 27).

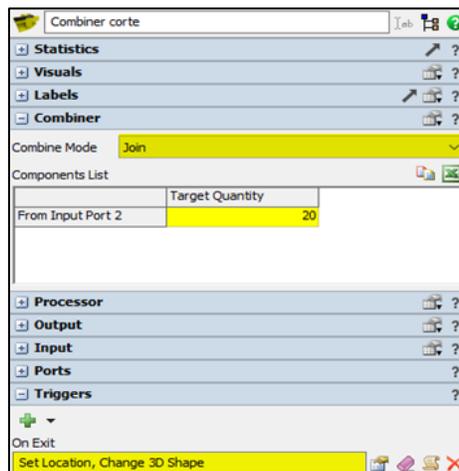


Figura 3. 27 Programación del *Combiner* corte.

4. Programar los *Multi processors* (Figura 3. 28) mediante los pasos siguientes:
 - a. Introducir las distribuciones obtenidas del análisis de los datos del proceso de rectificación de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3).
 - b. Colocar un contador de limas rectificadas en la pestaña *Labels*. Cada que sale un lote de 21 limas se incrementa el contador.
 - c. Escribir el número de limas rectificadas en una *Global table*.
 - d. Mandar un mensaje para que no entren más *Flow items* hasta que acabe de procesar un lote de 21 limas.
 - e. Activar el uso de transporte.

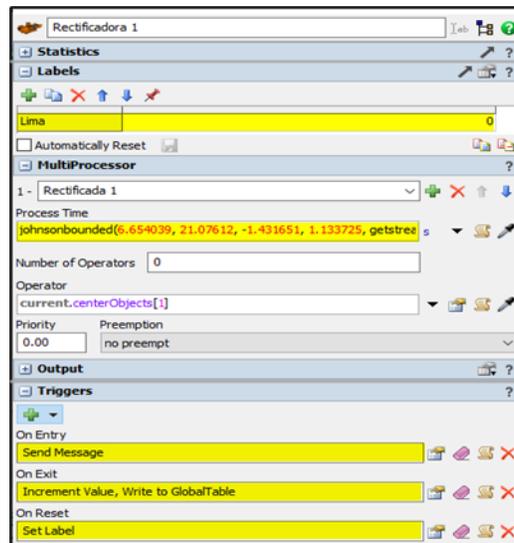


Figura 3. 28 Programación del *Multi processor* (rectificadoras).

5. Programar los *Queue* (Figura 3. 29), mediante los pasos siguientes:
 - a. Introducir el contenido máximo del *Queue* que son 180 lotes de 21 limas.
 - b. Definir la forma en que se va acomodar el *Flow items*, en todos los casos se apilan dentro de la *Queue*.
 - c. Introducir la altura en la que se va a acomodar el *Flow items*, en todos los casos son 0.7 metros.
 - d. Activar la casilla de *perform batching* y definir el tamaño del lote de 90.
 - e. Activar la casilla *Flush contents between batches* para que no entren más limas al *Queue* hasta que se haya terminado el lote de 90.
 - f. Activar el uso de transporte.

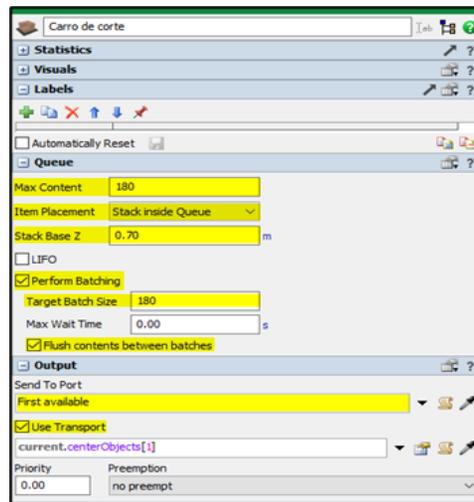


Figura 3. 29 Programación del Queue.

6. Programar los *Operators* (Figura 3. 30), con los siguientes pasos:
 - a. Introducir la capacidad del operador de 10 lotes de 21 piezas.
 - b. Introducir las distribuciones obtenidas del análisis de los datos de carga y descarga de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3).
 - c. Introducir la velocidad, la aceleración y desaceleración.
 - d. Definir la programación de ejecución de la tarea.

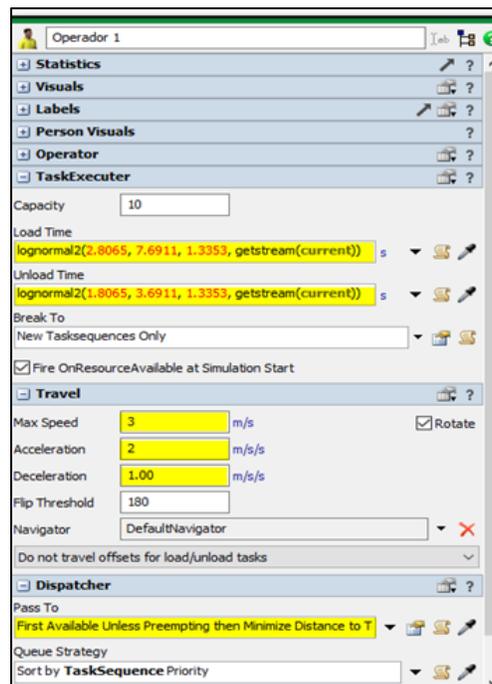


Figura 3. 30 Programación del Operator.

7. Agregar y programar una *Time Table* (Figura 3. 31), que realice lo siguiente:
 - a. Establecer los horarios de comida de los operadores.
 - b. Establecer los tiempos de limpieza de las máquinas.
 - c. Establecer los tiempos de reuniones.

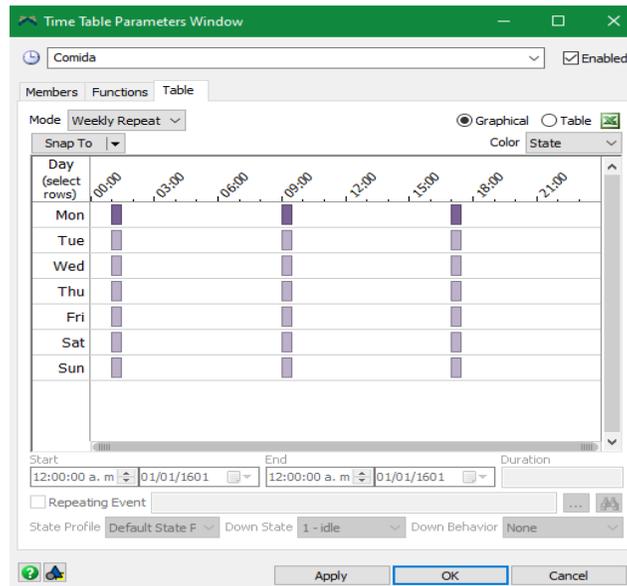


Figura 3. 31 Programación del *Time Table*.

8. Programar los tiempos medios entre fallas (MTBF) y los tiempos medios para reparar (MTTR) del proceso de rectificado para simular los paros por averías. Para programar estos tiempos se realizó lo siguiente:
 - a. Se dio clic en la pestaña *Toolbox*, localizada en el panel izquierdo de *Flexsim*.
 - b. Se dio clic en el botón “*add a tool to the model*” y se seleccionó la opción MTBF MTTR.
 - c. Se dio clic en el botón “*add objects to the list*” de la pestaña *Members*, y se seleccionaron todos los *Multi processors* que serían afectados por el evento MTBF/MTTR (Figura 3. 32).

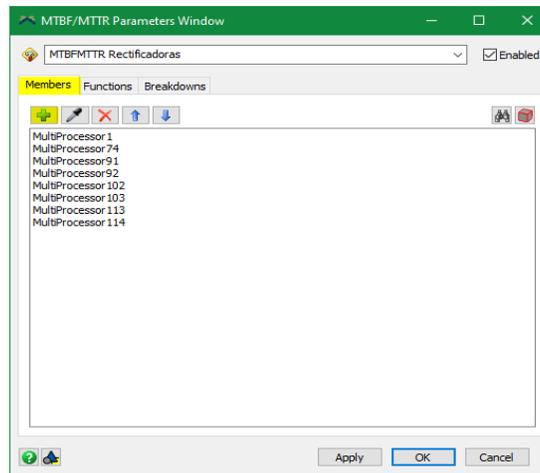


Figura 3. 32 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Members).

- d. Se agregaron las distribuciones de probabilidad en la sección *First Failure Time*, *Down Time* y *Up time* en la pestaña *Functions* (Figura 3. 33), de acuerdo con los tiempos “pérdidas por paradas” de la Tabla 3. 6 (Sección 3.6).

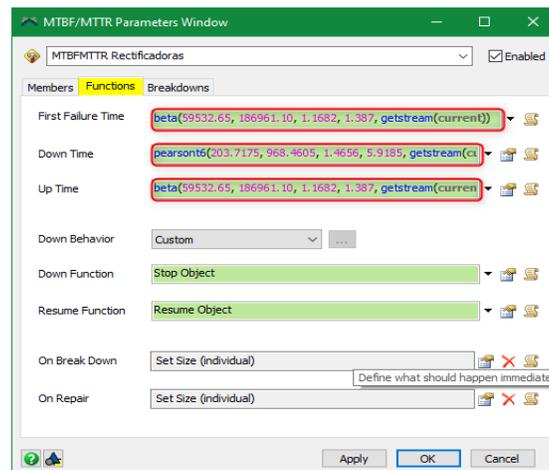


Figura 3. 33 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Functions).

- e. Se activó el botón “*break down members individually*” en la pestaña *Breakdown* (Figura 3. 34).
- f. Se dio clic en el botón de *Apply* y después en el botón *OK* para guardar la programación (Figura 3. 34).

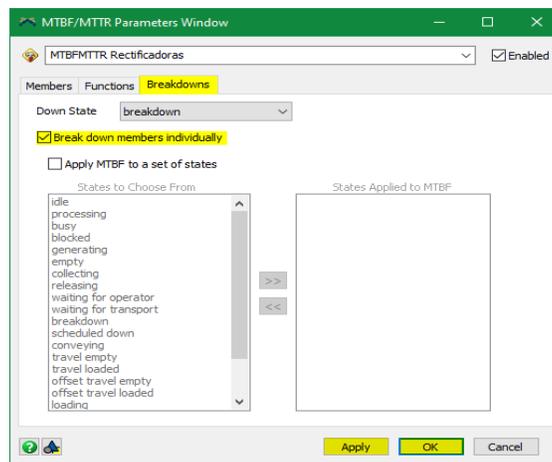


Figura 3. 34 Programación de MTBF/MTTR (Pestaña de Breakdowns).

3.9.4.6 Verificar el modelo de simulación

Una vez finalizada la construcción del modelo de simulación del proceso de rectificado, mostrado en el Anexo 3, el paso siguiente es la verificación del modelo de simulación, el cual, consistió en observar y analizar que el modelo de simulación se comporte cercano a la realidad. Este paso se realizó junto con el gerente de la fábrica de herramientas manuales “██████████” y con el supervisor del turno verificando lo siguiente:

- Los nombres de los *Objects*.
- El tamaño, la rotación y la posición de los *Objects*.
- Las conexiones de los puertos de los *Objects*.
- Las distribuciones de probabilidad de las actividades en cada uno de los *Objects*.
- La programación de los *Objects*.
- Las características de funcionamiento de los *Queues*.
- Los recorridos de los *Operators*

Con la realización de este paso el gerente de la fábrica aprobó el modelo de simulación. Con base en esto se pudo proceder al paso siguiente “Realizar corridas piloto”.

3.9.5 Realizar corridas piloto del modelo de simulación

Después de haber construido y verificado el modelo de simulación del proceso de rectificado, se realizaron 10 corridas piloto para determinar el número de corridas óptimo, basándose en lo mencionado por Law et al. (2000).

Los indicadores, medidos en las 10 corridas piloto del modelo de simulación, fueron la producción total de limas (limas/semana) y el tiempo de operación (h/semana). Con estos indicadores se calcularon la tasa estándar de producción (limas/h) y la tasa de rendimiento. Las corridas piloto iniciaron un lunes a las 6 AM y terminaron el domingo a las 6 AM, equivalentes a 518,400 segundos.

En la Tabla 3. 25 se muestran los resultados de los indicadores de las 10 corridas piloto.

Tabla 3. 25 Resultados de los indicadores de las corridas piloto.

Número de corrida	Producción total (limas/semana)	Tiempo de operación (h/semana)	Tasa media de producción (limas/h)	Tasa estándar de producción (limas/h)	Tasa de rendimiento
	PT	TO	TMP	TEP	TMP/TEP
1	282240	1041.47	271	420	65.15%
2	287017	1039.91	276	420	64.60%
3	289926	1042.89	278	420	65.90%
4	289926	1042.89	278	420	65.65%
5	286356	1041.29	275	420	65.56%
6	288141	1040.22	277	420	65.65%
7	287175	1040.48	276	420	65.80%
8	286587	1042.13	275	420	66.23%
9	286734	1038.89	276	420	65.07%
10	286965	1039.72	276	420	65.45%

Una vez realizadas las corridas piloto se determinó el número de corridas óptimas con la Ecuación 3.11.

$$n^*(\beta) = \min \left\{ i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s^2(n)}{i}} \leq \beta \right\} \dots\dots\dots (Ec. 3.11)$$

Donde:

- i = Número óptimo de corridas.
- β = Error absoluto.
- α = Nivel de significancia.
- $1 - \alpha$ = Nivel de confianza.
- $S^2(n)$ = Varianza de la medida de interés.
- t = Valor de las tablas de la distribución *t-student*
- n = Número de corridas piloto
- n^* = Número óptimo de corridas

Para aplicar la Ecuación 3.11 se requirió determinar los datos de la Tabla 3. 26:

- La varianza ($S^2(n)$). Con los resultados de la tasa de rendimiento de las 10 corridas piloto, mostrados en la Tabla 3. 25, se calculó la varianza.
- El error absoluto (β). Se propuso realizar el estudio para asegurar que la tasa de rendimiento promedio en el modelo de simulación tuviera a lo sumo 0.70% de error absoluto ($\beta = 0.650$), porque este valor representa menos del 1% del valor de la media de las diez corridas piloto ($\beta = \mu * 1 \% = 65.506 * 1\% = 0.655$).
- El nivel de confianza ($1 - \alpha$). El valor de significancia a utilizar fue de 5%, por consiguiente, el nivel de confianza será de 95%.
- El valor de *t-student* (t). El valor t se buscó en la tabla de *t-student*² con $i-1$ grados de libertad y con una prueba de 2 colas.

Tabla 3. 26 Estadísticos de la tasa de rendimiento del modelo de simulación.

Estadísticos	Valores
μ	65.506
S	0.464
$S^2(n)$	0.215
β	0.650

² La tabla de *t-student* se muestra en el Anexo 4.

La Tabla 3. 27 muestra los cálculos obtenidos al aplicar la Ecuación 3.11. En ella se puede observar que con 10 corridas del modelo de simulación el intervalo es menor que β y por lo tanto es suficiente para tomar decisiones. Para fines de estudio se fue disminuyendo el valor de i (número óptimo de corridas) para determinar el número de corridas optimas. La Tabla 3.27 muestra que el número de corridas optimas del modelo de simulación son 5 corridas ($0.576 < 0.650$).

Tabla 3. 27 Cálculo del número de corridas óptimas.

Corridas	$\min \left\{ t_{10-1,1-0.05/2} \sqrt{\frac{0.215}{i}} \leq 0.650 \right\}$
$i = 10$	$2.262 \sqrt{\frac{0.215}{10}} = 0.331 < 0.650$
$i = 9$	$2.306 \sqrt{\frac{0.215}{9}} = 0.356 < 0.650$
$i = 8$	$2.364 \sqrt{\frac{0.215}{8}} = 0.387 < 0.650$
$i = 7$	$2.446 \sqrt{\frac{0.215}{7}} = 0.429 < 0.650$
$i = 6$	$2.570 \sqrt{\frac{0.215}{6}} = 0.486 < 0.650$
$i = 5$	$2.776 \sqrt{\frac{0.215}{5}} = 0.576 < 0.650$
$i = 4$	$3.182 \sqrt{\frac{0.215}{4}} = 0.738 > 0.650$

3.9.6 Validar modelo de simulación

Para realizar el proceso de validación primero se determinó si uno o ambos conjuntos de datos se ajustaban a una prueba de normalidad. Posteriormente se realizó la prueba estadística *t-student* para la comparación de medias del sistema real y del modelo de simulación.

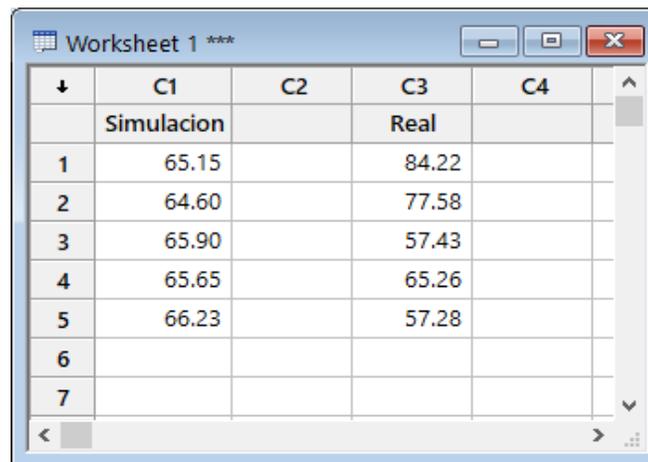
3.9.6.1 Determinar si los datos son normales

Para realizar la prueba de normalidad se utilizaron 5 datos de la tasa de rendimiento obtenidos del modelo de simulación (Tabla 3.25), y 5 datos obtenidos de mediciones en el sistema real.

Se utilizó el *software* estadístico *Minitab* ya que éste permite realizar análisis de datos de forma rápida y confiable.

Los pasos para realizar la prueba de normalidad de los datos fueron los siguientes:

1. Agregar los datos en la hoja de trabajo del *software* y colocar el nombre de la columna al que pertenecen los datos en la casilla correspondiente (Figura 3. 35).



	C1	C2	C3	C4
	Simulacion		Real	
1	65.15		84.22	
2	64.60		77.58	
3	65.90		57.43	
4	65.65		65.26	
5	66.23		57.28	
6				
7				

Figura 3. 35 Datos en la hoja de trabajo de Minitab.

2. Dar clic en la pestaña *Stat* del menú principal de *Minitab*, seleccionar la opción *Basic statistic* y dar clic en *Normality test*, como se muestra en la Figura 3. 36.

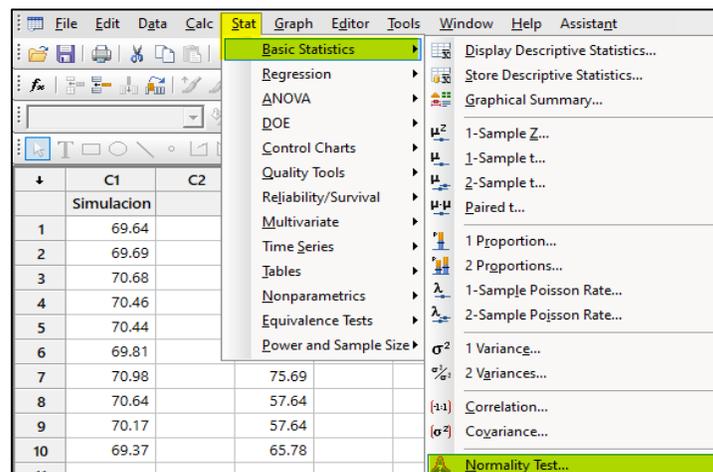


Figura 3. 36 Prueba de normalidad de Minitab.

3. Seleccionar en la columna *variable* el nombre de la columna a la que se le realizara la prueba de normalidad, seleccionar Anderson – Darling como prueba de Normalidad y Dar clic en *OK*, como se muestra en la Figura 3. 37.

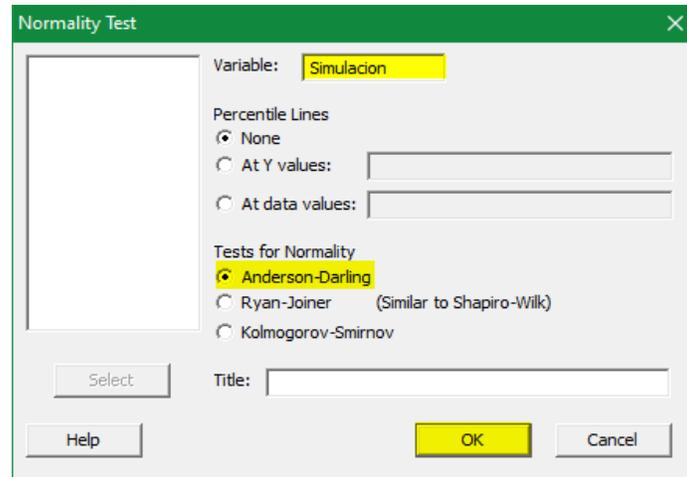


Figura 3. 37 Ventana de prueba de normalidad.

4. Verificar que el valor p de las gráficas del modelo de Simulación (Figura 3. 38) y del Sistema Real (Figura 3. 39) sean mayores que el nivel de significancia (5%).

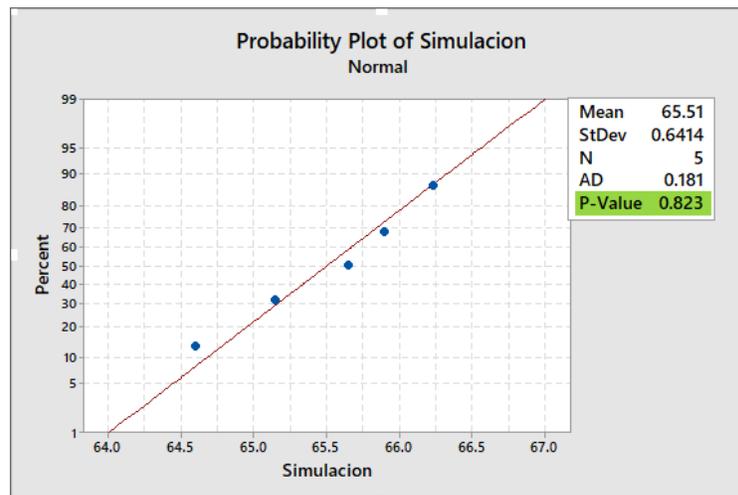


Figura 3. 38 Gráfica de probabilidad de la Simulación.

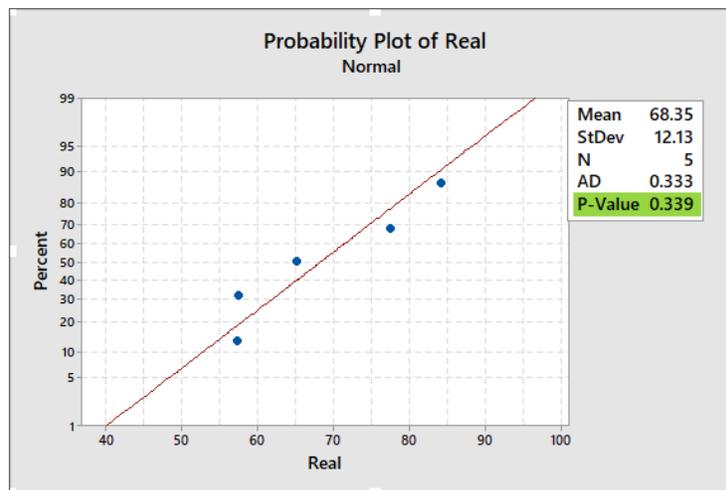


Figura 3. 39 Gráfica de probabilidad del Sistema Real.

De acuerdo con las gráficas de probabilidad de la Simulación (Figura 3. 38) y del Sistema Real (Figura 3. 39), los valores de p son 0.823 y 0.339 respectivamente. Por lo tanto, no se puede rechazar la idea de que los datos tienen un comportamiento normal, debido a que el valor p en ambos casos es mayor que el nivel de significancia ($p > \alpha$), por lo tanto, se realizó una prueba de *t-student* para la comparación de medias del sistema real y del modelo de simulación.

3.9.6.2 Validar modelo de simulación con la prueba *t-student*

Antes de realizar la prueba *t-student*, fue necesario que el grupo de datos del modelo de simulación y del sistema real cumplieran con las condiciones siguientes:

- Que el tamaño de la muestra sea menor a 30 datos.
- Que sea posible calcular su media y desviación estándar a partir de la muestra.
- Que los grupos de datos tengan un comportamiento “normal”.

En ambos casos se cumplían adecuadamente las condiciones, por lo que se continuo con la realización de la prueba.

Para realizar la prueba *t-student* se realizó lo siguiente:

1. Se definió la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1) de la siguiente manera:
 - $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$. La media de la tasa de rendimiento del sistema real (μ_1) es igual a la media de la tasa de rendimiento (μ_2) del modelo de simulación.
 - $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$. La media de la tasa de rendimiento del sistema real (μ_1) es diferente a la media de la tasa de rendimiento (μ_2) del modelo de simulación.
2. Se obtuvieron la media, desviación estándar y varianzas de los datos del modelo de simulación y del sistema real. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. 28.
3. Se obtuvo el valor del estimador S_p , que sirve para combinar las dos varianzas, utilizando la Ecuación 3.12.

Tabla 3. 28 Comparación de los estadísticos del sistema real contra el modelo de simulación.

Estadísticos	Sistema real	Modelo de simulación
	1	2
Tamaño de la muestra (n)	5	5
Media (\bar{X})	68.350	65.506
Desviación estándar (S)	12.130	0.464
Varianza (S^2)	147.136	0.215

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{(n_1+n_2-2)}} \dots\dots\dots (Ec. 3.12)$$

Donde:

S_p^2 = Estimador combinado de las varianzas muestrales.

S_1^2 = Varianza del sistema real.

S_2^2 = Varianza del modelo de simulación.

n_1 = Número de observaciones del sistema real.

n_2 = Número de observaciones del modelo de simulación.

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 28, fue $S_p = 7.959$ (Ecuación 3.13).

$$S_p = \sqrt{\frac{(5-1)(147136)(5-1)(0.464)}{(5+5-2)}} = 7.959 \dots\dots\dots (Ec. 3.13)$$

4. Se calculó el estadístico de la prueba *t-student* dada por la Ecuación 3.14, con la finalidad de probar la hipótesis nula H_0 .

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \dots\dots\dots (Ec.3.14)$$

Donde:

- t = Estadístico de prueba *t-student*
- S_p = Estimador combinado de las desviaciones estándar muestrales.
- \bar{X}_1 = Media de la muestra del sistema real.
- \bar{X}_2 = Media de la muestra del modelo de simulación.
- n_1 = Número de observaciones del sistema real.
- n_2 = Número de observaciones del modelo de simulación.

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 28, fue $t = 0.564$ (Ecuación 3.15).

$$t = \frac{(68.350 - 65.506)}{7.959 \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}}} = 0.564 \dots\dots\dots (Ec.3.15)$$

5. Se calculó la región de rechazo a través de la Ecuación 3.16, con un nivel de significancia del 5% para una prueba de dos colas.

$$t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots (Ec. 3.16)$$

Donde:

- α = Nivel de significancia.
- n_1 = Número de observaciones del sistema real.
- n_2 = Número de observaciones del modelo de simulación.

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 28 y buscar el valor t en la tabla de t -student³, fue $t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} = 2.306$ (Ecuación 3.17).

$$t_{0.05/2, 5+5-2} = t_{0.025, 8} = 2.306 \dots\dots\dots (Ec. 3.17)$$

- 6. Se realizó una comparación entre el estadístico de prueba t y la región de rechazo a través de la Ecuación 3.18.

$$-t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} < t > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots (Ec. 3.18)$$

Los valores de la comparación, que se obtuvieron al sustituir los valores de la Ecuación 3.15 y Ecuación 3.17, se muestran en la Ecuación 3.19.

$$-2.306 < 0.564 > 2.306 \dots\dots\dots (Ec. 3.19)$$

- 7. Se graficaron los valores obtenidos de la Ecuación 3.19, los cuales se muestran en la Figura 3. 40.

- 8. Se interpretaron los resultados. Con base en la comparación entre el estadístico de prueba t y la región de rechazo, se dice que existe evidencia suficiente para no rechazar la hipótesis nula H_0 , llegando a la conclusión de que la media de la tasa de rendimiento del sistema real (μ_1) es igual a la media de la tasa de rendimiento del modelo de simulación (μ_2), con una confianza del 95%.

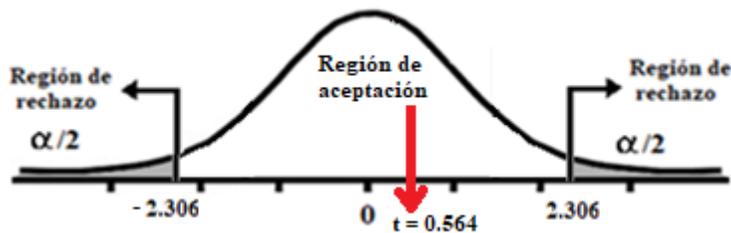


Figura 3. 40 Comparación de medias del modelo de simulación y el sistema real.

³ La tabla de t -student se muestra en el Anexo 4.

3.9.7 Experimentar en el modelo de simulación con la solución de mejora

Una vez que el modelo de simulación, del proceso de rectificado, fue validado se realizó la experimentación con la solución de mejora propuesta en la Sección 3.7.6: propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas). Sin embargo, también se decidió experimentar con la propuesta D (Eliminar generación de punto de referencia) ya que ésta propuesta estaba en segundo lugar.

3.9.7.1 Experimentación con un mecanismo de volteo automático de limas

El tiempo excesivo de espera por un operador para el volteo de cara de la lima triangular en el proceso de rectificado contribuye a la pérdida de velocidad en el proceso de rectificado, provocando que el factor tasa de rendimiento no tenga los valores mínimos requeridos. Por lo tanto, se simuló la instalación de un mecanismo de volteo automático de limas para determinar si éste mejora o elimina este tiempo de espera. El modelo de simulación se muestra en el Anexo 6.

Para realizar este experimento, de manera adecuada, se procedió a realizar los pasos siguientes:

1. Recolectar datos para la experimentación del proceso de rectificado con un mecanismo de volteo automático de limas. Para hacer una correcta recolección de datos, se realizaron los pasos siguientes:
 - a) Se realizaron formatos para facilitar la tarea de recolectar los datos de los tiempos de volteo de lima sin considerar la espera por un operador.
 - b) Se estableció el tiempo en el cual se iba a realizar la recolección de datos. La decisión fue recolectar datos 2 veces por semana, en un periodo de 11 semanas, repartidas en tres meses, ya que en algunos días se interrumpió la recolección de datos por una restricción de entrada a la fábrica debido al problema de contingencia sanitaria global.
 - c) Se realizó la recolección de los datos del volteo de lima sin considerar la espera por un operador.

2. Se capturó la información en un archivo de *Excel* (Anexo 5) con el objeto de tener un mejor control y orden de la información obtenida en el paso anterior. Los tiempos recolectados fueron estandarizados en segundos, ya que es la unidad de tiempo que se utilizó en el modelo de simulación.
3. Se realizó el análisis estadístico de los datos para determinar las distribuciones de probabilidad que se ajusten a los datos obtenidos. Dicho análisis estadístico se realizó con el *software Expertfit* llevando a cabo los pasos mostrados en la Sección 2.5.6.4. El resultado de la Tabla 3. 29, muestra las probabilidades de cada una de las actividades pertenecientes al volteo de limas del proceso de rectificado.

Tabla 3. 29 Distribuciones obtenidas del análisis de los datos del volteo de limas.

Actividad	Distribución de probabilidad
Voltear limas por primera vez	Erlang (2.997569, 0.371084, 4.000000, <stream>)
Voltear limas por segunda vez	pearsont6 (0.000000, 1.973466, 99.962285, 43.780764, <stream>)
Voltear limas por tercera vez	Inversegaussian (2.761746, 1.841587, 10.442554, <stream>)

4. Se programaron los *Multi processors* del modelo de simulación sustituyendo las distribuciones obtenidas del análisis de los datos del proceso de rectificado de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3), por los valores obtenidos de la Tabla 3. 29.
5. Se realizaron corridas de simulación. Los indicadores medidos en las 5 corridas del modelo de simulación fueron la producción total de limas (limas/semana) y el tiempo de operación (h/semana). Con estos indicadores se calcularon la tasa estándar de producción (limas/h) y la tasa de rendimiento. Las corridas iniciaron un lunes a las 6 AM y terminaron el domingo a las 6 AM, equivalentes a 518,400 segundos. En la Tabla 3. 30 se muestran los resultados de los indicadores de las 5 corridas con el mecanismo de volteo automático.

Tabla 3. 30 Resultados de los indicadores de las corridas con el mecanismo de volteo automático.

Número de corrida	Producción total (limas/semana)	Tiempo de operación (h/semana)	Tasa media de producción (limas/h)	Tasa estándar de producción (limas/h)	Tasa de rendimiento
	PT	TO	TMP	TEP	TMP/TEP
1	357252	1041.19	343	420	81.70%
2	363174	1041.24	348	420	83.05%
3	360738	1041.71	346	420	82.45%
4	357945	1041.83	343	420	81.80%
5	365547	1041.38	351	420	83.58%

La media de los valores resultantes de las corridas de la propuesta con el mecanismo de volteo automático de limas en el proceso de rectificado fue de 82.514 (Tabla 3. 31). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo del sistema actual, mostrado en la Tabla 3. 28 (Sección 3.9.6.2), la cual fue 65.506, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 25.97%, como se muestra en la Figura 3. 41.

Tabla 3. 31 Estadísticos de la tasa de rendimiento con el mecanismo de volteo automático.

Estadísticos	Valores
\bar{X}	82.514
S	0.805
S^2	0.648

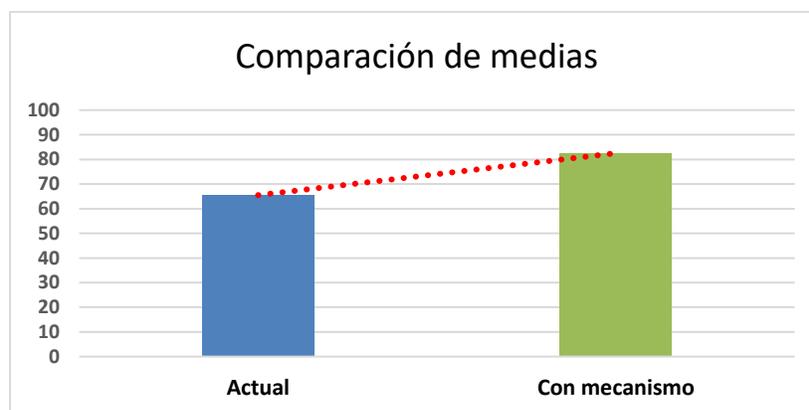


Figura 3. 41 Comparación de medias de tasa de rendimiento entre la modelación del sistema actual contra el mecanismo.

3.9.7.2 Experimentación eliminando generación de punto de referencia

En el proceso de rectificado la lima se voltea 4 veces, contribuyendo a la pérdida de velocidad en el proceso de rectificado, lo que provoca que el factor tasa de rendimiento no tenga los valores mínimos requeridos. Por lo tanto, se consideró eliminar la primera pasada que genera el punto de referencia de las máquinas rectificadoras. El modelo de simulación se muestra en el Anexo 6.

Para realizar este experimento de manera adecuada se procedió a realizar los pasos siguientes:

1. Se programaron los *Multi processors* del modelo de simulación eliminando la primer rectificadora que se encarga de generar de punto de referencia de la máquina rectificadora y eliminar el primer volteo de limas del proceso de rectificado de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3).
2. Se realizaron corridas de simulación. Los indicadores medidos en las 5 corridas del modelo de simulación fueron la producción total de limas (limas/semana) y el tiempo de operación (h/semana). Con estos indicadores se calcularon la tasa estándar de producción (limas/h) y la tasa de rendimiento. Las corridas iniciaron un lunes a las 6 AM y terminaron el domingo a las 6 AM, equivalentes a 518,400 segundos. En la
3. Tabla 3. 32 se muestran los resultados de los indicadores de las 5 corridas.

Tabla 3. 32 Resultados de los indicadores de las corridas eliminando generación de punto de referencia.

Número de corrida	Producción total (limas/semana)	Tiempo de operación (h/semana)	Tasa media de producción (limas/h)	Tasa estándar de producción (limas/h)	Tasa de rendimiento
	PT	TO	TMP	TEP	TMP/TEP
1	342762	1041.08	329	420	78.39%
2	341376	1041.03	328	420	78.08%
3	345723	1041.59	332	420	79.03%
4	341124	1041.85	327	420	77.96%
5	341145	1041.38	328	420	78.00%

La media de los valores resultantes de las corridas de la propuesta eliminando generación de punto de referencia en el proceso de rectificado fue de 78.290 (Tabla 3. 33). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo de

simulación actual, mostrado en la Tabla 3. 28 (Sección 3.9.6.2), la cual fue 65.506, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 19.52%, como se muestra en la Figura 3. 42.

Tabla 3. 33 Estadísticos de la tasa de rendimiento eliminando generación de punto de referencia.

Estadísticos	Valores
\bar{X}	78.290
S	0.446
S^2	0.198

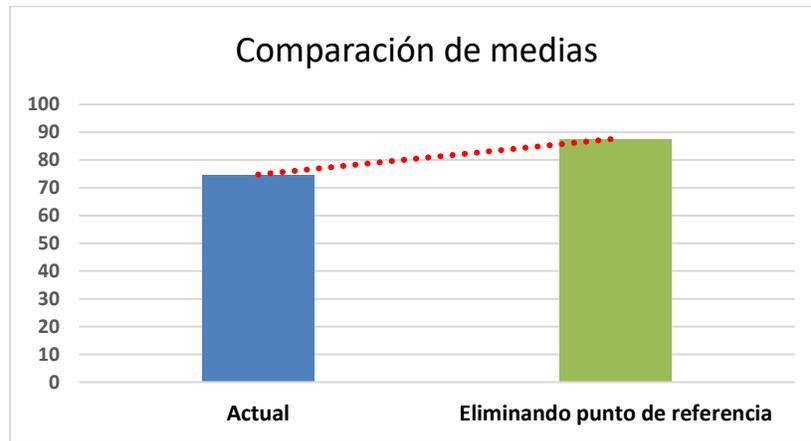


Figura 3. 42 Comparación de medias entre la modelación del sistema actual vs eliminando generación de punto de referencia.

3.9.7.3 Experimentación combinando las propuestas C y D

Esta experimentación consistió en combinar la propuesta C (simular la instalación de un mecanismo de volteo automático de limas) y la propuesta D (eliminar generación del punto de referencia) de las máquinas rectificadoras. El modelo de simulación se muestra en el Anexo 8.

Para realizar este experimento de manera adecuada se procedió a realizar los pasos siguientes:

1. Recolectar datos para la experimentación del proceso de rectificado con un mecanismo de volteo automático de limas.

2. Se capturó la información en un archivo de *Excel* (Anexo 5) con el objeto de tener un mejor control y orden de la información obtenida en el paso anterior.
3. Se realizó el análisis estadístico de los datos para determinar las distribuciones de probabilidad que se ajusten a los datos obtenidos. Dicho análisis estadístico se realizó con el *software Expertfit* llevando a cabo los pasos mostrados en la Sección 2.5.6.4. El resultado, de la Tabla 3. 29 (Sección 3.9.7.1), muestra las probabilidades de cada una de las actividades pertenecientes al volteo de limas del proceso de rectificado.
4. Se programaron los *Multi processors* del modelo de simulación sustituyendo las distribuciones obtenidas del análisis de los datos del proceso de rectificado de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3), por los valores obtenidos en la Tabla 3. 29 (Sección 3.9.7.1).
5. Se programaron los *Multi processors* del modelo de simulación eliminando la primer rectificadora que se encarga de generar de punto de referencia de la máquina rectificadora y eliminar el primer volteo de limas del proceso de rectificado de la Tabla 3. 19 (Sección 3.9.3.3).
6. Se realizaron corridas de simulación. Los indicadores medidos en las 5 corridas del modelo de simulación fueron la producción total de limas (limas/semana) y el tiempo de operación (h/semana). Con estos indicadores se calcularon la tasa estándar de producción (limas/h) y la tasa de rendimiento. Las corridas iniciaron un lunes a las 6 AM y terminaron el domingo a las 6 AM, equivalentes a 518,400 segundos. En la Tabla 3. 34 se muestran los resultados de los indicadores de las 5 corridas.

Tabla 3. 34 Resultados de los indicadores de las corridas combinando las propuestas C y D.

Número de corrida	Producción total (limas/semana)	Tiempo de operación (h/semana)	Tasa media de producción (limas/h)	Tasa estándar de producción (limas/h)	Tasa de rendimiento
	PT	TO	TMP	TEP	TMP/TEP
1	475713	1148.89	414	420	98.59%
2	474516	1148.21	413	420	98.40%
3	474642	1148.53	413	420	98.40%
4	474390	1148.33	413	420	98.36%
5	474243	1148.93	413	420	98.28%

La media de los valores resultantes de las corridas de la combinación de la propuesta C y D en el proceso de rectificado fue de 98.403 (Tabla 3. 35). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo del sistema actual, mostrado

en la Tabla 3. 28 (Sección 3.9.6.2), la cual fue 65.506, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 50.22%, como se muestra en la Figura 3. 41.

Tabla 3. 35 Estadísticos de la tasa de rendimiento combinando las propuestas C y D.

Estadísticos	Valores
\bar{X}	98.403
S	0.112
S^2	0.012

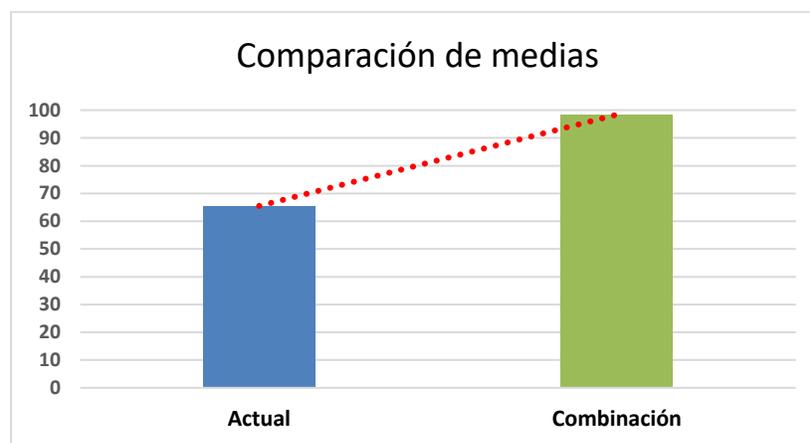


Figura 3. 43 Comparación de medias de tasa de rendimiento entre la modelación del sistema actual contra la combinación.

3.9.9 Documentar y presentar resultados

El último paso fue documentar y presentar, ante el gerente general de la fábrica de herramientas manuales “██████████”, los resultados obtenidos del modelo de simulación del sistema actual, de la experimentación con la propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas) y de la experimentación con la propuesta D (Eliminar generación de punto de referencia). Estos resultados fueron los siguientes:

- Se representaron los valores obtenidos de las 5 corridas de la tasa de rendimiento del modelo de simulación del sistema actual, de la propuesta C, de la propuesta D y de la combinación mediante la gráfica de la Figura 3. 44. Esta gráfica muestra que la propuesta C, la propuesta D y la combinación tienen una mejora considerable con respecto al sistema actual.

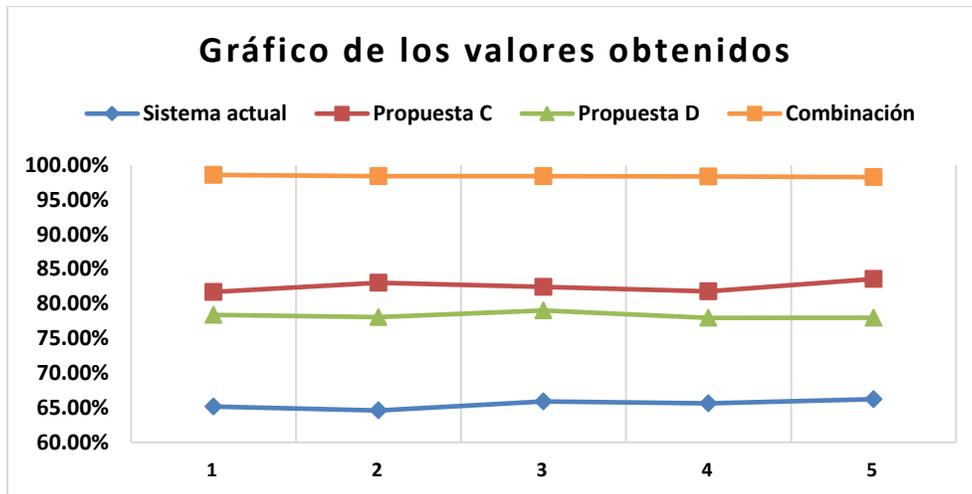


Figura 3. 44 Gráfico de los valores obtenidos en los modelos de simulación.

- Se representaron los valores obtenidos de la media de la tasa de rendimiento del modelo de simulación del sistema actual, de la propuesta C, de la propuesta D y de la combinación mediante la gráfica de la Figura 3. 45. Esta gráfica muestra claramente que quien tiene una mayor tasa de rendimiento es la Combinación, seguida de la propuesta C.

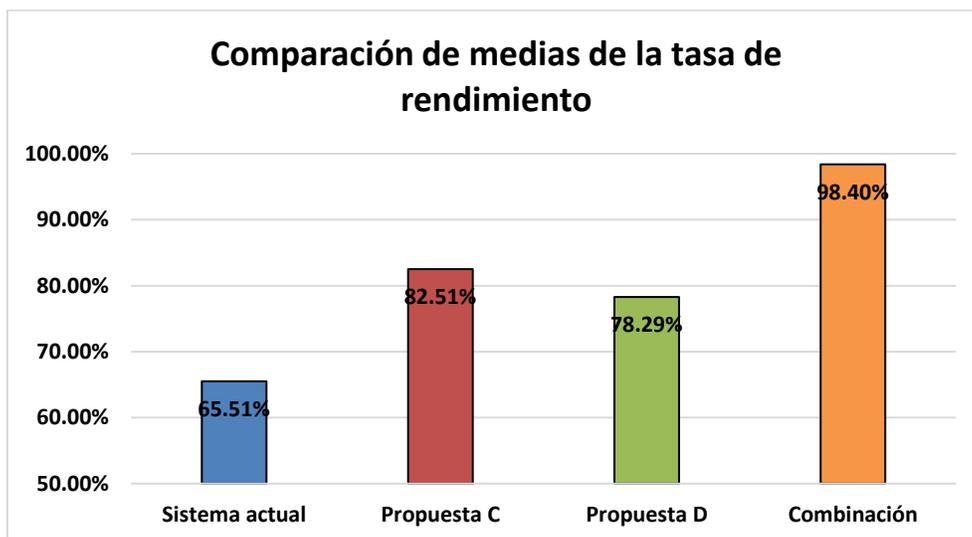


Figura 3. 45 Comparación de la media de la tasa de rendimiento del Sistema actual y las Propuestas.

- Se representó el incremento de la tasa de rendimiento de la propuesta C, la propuesta D y la combinación mediante la gráfica de la Figura 3. 46. En esta gráfica se muestra que la combinación tiene un incremento del 50.22% considerando que el sistema actual es el 100%.

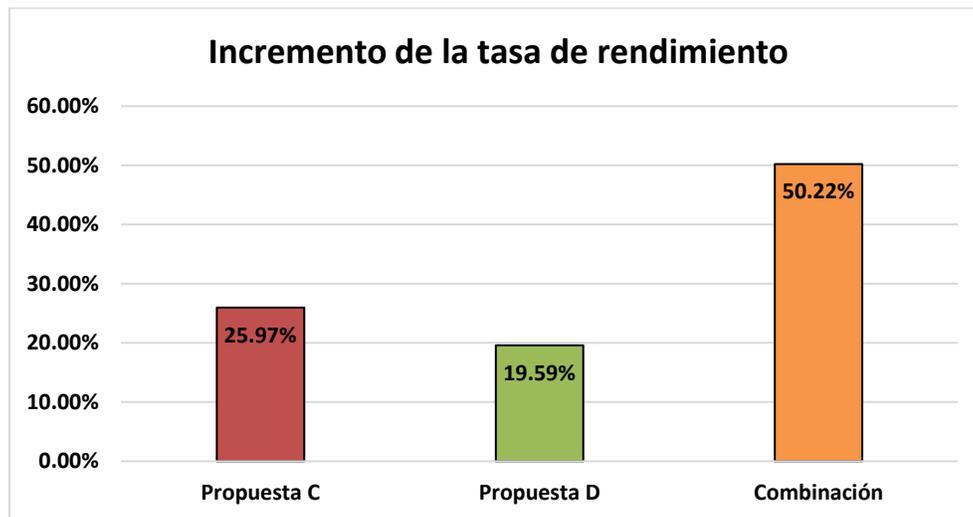


Figura 3. 46 Incremento de la tasa de rendimiento de las propuestas C y D.

Con base en los resultados obtenidos se concluyó que la “Combinación” de las propuestas cumple de mejor forma el incremento de la tasa de rendimiento del proceso de rectificado con respecto a las propuestas C y D. Sin embargo, por conveniencia del gerente general, se tomó la decisión de que la “Propuesta C” es la mejor opción para el proceso de rectificado, considerando en un futuro realizar la combinación.

3.10 Comparar los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos de la propuesta de mejora

Para validar que la propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas) mejoró estadísticamente la media de la tasa de rendimiento, en comparación con el sistema actual del proceso de rectificado, se realizó una prueba de hipótesis de comparación de medias. El indicador seleccionado a evaluar fue la tasa de rendimiento.

Para realizar la prueba de hipótesis para la diferencia de medias se realizaron los pasos siguientes:

1. Se estableció que la prueba de hipótesis para la comparación de medias debía ser de tipo unilateral inferior, con muestra pequeña.
2. Se definió la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1) de la siguiente manera:
 - $H_0: \mu_1 = \mu_2$. La media de la tasa de rendimiento del sistema actual (μ_1) es igual que la media de la tasa de rendimiento (μ_2) de la propuesta C.
 - $H_1: \mu_1 < \mu_2$. La media de la tasa de rendimiento del sistema actual (μ_1) es menor que la media de la tasa de rendimiento (μ_2) de la propuesta C.
3. Se obtuvieron la media, desviación estándar y varianzas de los datos del sistema actual y de la propuesta C. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. 36.
4. Se obtuvo el valor del estimador S_p , que sirve para combinar las dos varianzas, utilizando la Ecuación 3.20.

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{(n_1+n_2-2)}} \dots\dots\dots (Ec. 3.20)$$

Donde:

S_p^2 = Estimador combinado de las varianzas muestrales.

S_1^2 = Varianza del sistema actual.

S_2^2 = Varianza de la propuesta C.

n_1 = Número de observaciones del sistema actual.

n_2 = Número de observaciones de la propuesta C.

Tabla 3. 36 Comparación de los estadísticos del sistema actual contra la propuesta C.

Estadísticos	Sistema actual 1	Propuesta C 2
Tamaño de la muestra (n)	5	5
Media (\bar{X})	65.506	82.514
Desviación estándar (S)	0.464	0.805
Varianza (S^2)	0.215	0.648

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 36, fue $S_p = 0.528$ (Ecuación 3.21).

$$S_p = \sqrt{\frac{(5-1)(0.464)(5-1)(0.805)}{(5+5-2)}} = 0.528 \dots\dots\dots (Ec. 3.21)$$

5. Se calculó el estadístico de la prueba *t-student* dada por la Ecuación 3.22, con la finalidad de probar la hipótesis nula H_0 .

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \dots\dots\dots (Ec.3.22)$$

Donde:

- t = Estadístico de prueba *t-student*
- S_p = Estimador combinado de las desviaciones estándar muestrales.
- \bar{X}_1 = Media de la muestra del sistema actual.
- \bar{X}_2 = Media de la muestra de la propuesta C.
- n_1 = Número de observaciones del sistema actual.
- n_2 = Número de observaciones de la propuesta C.

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 36, fue $t = -50.908$ (Ecuación 3.23).

$$t = \frac{(73.520 - 92.416)}{1.025 \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}}} = -50.908 \dots\dots\dots (Ec.3.23)$$

6. Se calculó la región de rechazo a través de la Ecuación 3.24, con un nivel de significancia del 5% para una prueba unilateral inferior.

$$-t_{\alpha, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots (Ec. 3.24)$$

Donde:

α = Nivel de significancia.

n_1 = Número de observaciones del sistema actual.

n_2 = Número de observaciones de la propuesta C.

El valor obtenido, que se obtuvo al sustituir los datos de la Tabla 3. 36 y buscar el valor t en la tabla de t -student⁴, fue $-t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} = -1.86$ (Ecuación 3.25).

$$-t_{0.05, 5+5-2} = -t_{0.05, 8} = -1.86 \dots\dots\dots (Ec. 3.25)$$

7. Se realizó una comparación entre el estadístico de prueba t y la región de rechazo a través de la Ecuación 3.26.

$$t < -t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots (Ec. 3.26)$$

Los valores de la comparación, que se obtuvieron al sustituir los valores de la Ecuación 3.23 y Ecuación 3.25, se muestran en la Ecuación 3.27.

$$-50.908 < -1.86 \dots\dots\dots (Ec. 3.27)$$

8. Se graficaron los valores obtenidos de la Ecuación 3.27, los cuales se muestran en la Figura 3. 47.

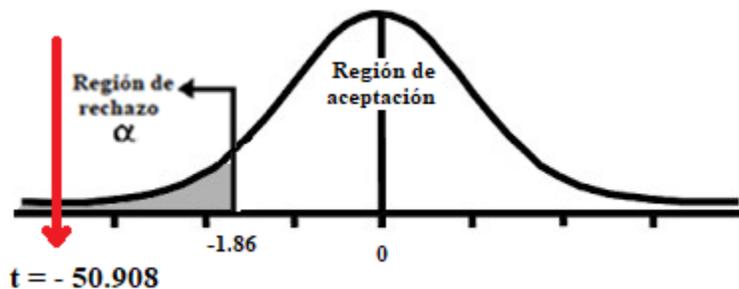


Figura 3. 47 Comparación de medias del sistema actual y la propuesta C.

⁴ La tabla de t -student se muestra en el Anexo 4.

9. Se interpretaron los resultados. Con base en la comparación entre el estadístico de prueba t y la región de rechazo, se dice que existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula H_0 , llegando a la conclusión de que la media de la tasa de rendimiento del sistema actual (μ_1) es menor a la media de la tasa de rendimiento de la propuesta C (μ_2), con una confianza del 95%.

3.11 Analizar resultados

En este capítulo se presentó la metodología desarrollada para cumplir con el objetivo de mejorar la eficacia global (OEE) en el proceso de rectificado de una línea de lima triangular en la fábrica de herramientas manuales.

Durante el desarrollo de la metodología se obtuvo un panorama general de la fábrica de herramientas, conociendo aspectos generales, áreas que la integran, productos y actividades que se realizan dentro de la fábrica, permitiendo al tesista conocer de mejor forma el lugar donde se realizó este trabajo.

Se realizó un diagnóstico de la línea de lima triangular 6 elaborando un mapa de la cadena de valor (VSM). Se analizó el VSM del estado presente y determinó que el proceso con mayor oportunidad de mejora es “rectificado”, debido a que tiene el mayor tiempo TC, el mayor tiempo de NAV y la menor TS.

Se calculó la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado, mediante el producto de tres factores: disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad. Se llegó a la conclusión que, de los tres factores calculados del OEE, el factor tasa de rendimiento es el factor más bajo.

Se realizó un análisis de cada uno de los factores mediante un diagrama de pescado para determinar las causas que generan pérdidas y que disminuyen el valor de la OEE.

Se propusieron algunas soluciones de mejora para mejorar la tasa de rendimiento y así mejorar la OEE. Se definieron las técnicas y herramientas de ingeniería industrial apropiadas para su implementación. La técnica de simulación se implementó para evaluar la idea

ganadora con base en el porcentaje de mejora de la tasa de rendimiento. La técnica de simulación se implementó con ayuda del *software Flexsim* para la construcción del modelo del sistema actual y del modelo con la idea de mejora. Posteriormente, se realizaron experimentos del modelo de simulación con las propuestas de mejora, se analizaron los resultados, se evaluó el desempeño posterior a la implementación de técnicas y herramientas y se compararon los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos mediante el uso de una prueba estadística.

Durante el desarrollo de la metodología se utilizaron técnicas de ingeniería industrial para dar enfoque al cumplimiento del objetivo. Los resultados obtenidos de las técnicas se mencionan a continuación:

- Diagrama de Pareto. Con este diagrama, mostrado en la Figura 3. 1 (Sección 3.3.1), se determinó la familia de productos que utilizan el 80% del tiempo anual de la producción de la fábrica de herramientas manuales, el cual, corresponde a la familia de limas.
- Matriz de clasificación. Con esta matriz se seleccionó el producto objetivo con mayor incumplimiento de indicadores y el mayor volumen de horas de fabricación. El producto objetivo seleccionado fue lima triangular 6.
- Mapa de la cadena de valor (VSM). Con la elaboración del VSM del estado actual, mostrado en la Figura 3. 10 y Figura 3. 11 (Sección 3.4.6), se realizó el diagnóstico del producto objetivo lima triangular 6, se identificaron las situaciones problemáticas en los procesos y se determinó que el proceso con mayor oportunidad de mejora es “rectificado”, debido a que, para un lote de transferencia de 4000 limas, es el proceso con el mayor tiempo de ciclo ($TC = 106.75$ minutos/lote), con el mayor tiempo de actividades que no agregan valor ($NAV = 53.37$ minutos/lote) y con la menor tasa de salida ($TS = 2248$ limas/hora).
- Eficacia global del equipo (OEE). Se obtuvieron los promedios de cada uno de los factores de la OEE: disponibilidad 99.39%, tasa de rendimiento 70.58% y tasa de calidad 99.77%; mostrados en la Tabla 3. 14 (Sección 3.6.4), teniendo como resultado una OEE de 69.99%. Posteriormente, para ver si cumplían o no con los valores

mínimos requeridos, se compararon con los estándares, mencionados en la Sección 2.8, propuestos por Levitt (2005). Este comparativo se mostró en la Figura 3. 20. Con base en el comparativo de la Figura 3. 20 se llegó a la conclusión que, de los tres factores calculados del OEE, el factor tasa de rendimiento es el factor más bajo, con un promedio de 70.58%, por lo que los esfuerzos se concentraron en este factor para elevar el valor de la OEE del proceso de rectificado.

- Diagrama de pescado. Con este diagrama se pudieron determinar las causas que generan pérdidas por paradas que afectan al factor disponibilidad, pérdidas de velocidad que afectan al factor tasa de rendimiento y pérdidas de calidad que afectan al factor tasa de calidad. Con estas causas se propusieron ideas de mejora para mejorar los factores y, por lo tanto, mejorar la OEE.
- Método por puntos. Este método se utilizó para seleccionar la propuesta con mayor impacto para el factor “tasa de rendimiento”. En la Tabla 3. 18 se mostró que la solución, con mayor impacto en el proceso de rectificado es la propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas) ya que ésta obtuvo la mayor calificación: 1470 puntos. De igual forma, se puede observar que la propuesta D (Eliminar generación de punto de referencia) tiene el segundo lugar en impacto; su calificación fue de 1040 puntos.
- Diseño asistido por computadora (CAD). Permitió realizar, por medio de entidades geométricas, el *layout* del proceso de rectificado y los elementos que conforman el proceso de rectificado, dando como resultado una visualización realista del proceso.
- Simulación. Se utilizó para generar, experimentar y evaluar el sistema actual, la propuesta C (instalar mecanismo de volteo automático de las limas), la propuesta D (Eliminar generación de punto de referencia) y la combinación de ambas; y con ello determinar la mejor propuesta que proporcione una mejoría en la tasa de rendimiento. Los resultados de cada una de las experimentaciones fueron los siguientes:

- La media de los valores de la tasa de rendimiento resultantes de las corridas del sistema actual del proceso de rectificado, mostrada en la Tabla 3. 28 (Sección 3.9.6.2), fue 65.506%.
- La media de los valores resultantes de las corridas de la propuesta con el mecanismo de volteo automático de limas en el proceso de rectificado fue de

- 82.514% (Tabla 3. 31). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo del sistema actual, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 25.97%.
- La media de los valores resultantes de las corridas de la propuesta eliminando generación de punto de referencia en el proceso de rectificado fue de 78.290 (Tabla 3. 33). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo de simulación actual, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 19.52%.
 - La media de los valores resultantes de las corridas de la combinación de la propuesta C y D en el proceso de rectificado fue de 98.403 (Tabla 3. 35). Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo del sistema actual, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 50.22%.

3.12 Conclusión

En este capítulo se describió la metodología de 10 pasos, mostrada en la Sección 3.1, utilizada para cumplir el objetivo de mejorar la eficacia global (OEE) en el proceso de rectificado de la línea de limas de la fábrica de herramientas manuales “██████████”. Con la metodología desarrollada se obtuvo un panorama general de la fábrica, se realizó un diagnóstico de las líneas de herramientas manuales, se calculó y analizó la eficacia global (OEE), se aplicaron técnicas y herramientas de ingeniería industrial tales como: VSM, diagrama de pescado, diagrama de Pareto, matriz de priorización, método por puntos, CAD, pruebas de hipótesis mediante el *software Expertfit*, simulación mediante el *software Flexsim* y cálculos estadísticos para la validación de datos. El resultado integral de este capítulo se resume en que la tasa de rendimiento promedio actual del proceso de rectificado es menor que la tasa de rendimiento promedio de la solución propuesta, es decir, la solución propuesta presentó un mejoramiento en la tasa de rendimiento y, por lo tanto, en la eficacia global del proceso de rectificado, lo cual se demostró estadísticamente.

Conclusiones generales

El presente trabajo de tesis se desarrolló en una fábrica de herramientas localizada en [REDACTED] Veracruz, específicamente en la región de las Altas montañas, la cual, se enfoca principalmente en la fabricación de herramientas manuales: limas, palas, cucharas y carretillas.

La falta de disponibilidad de las máquinas, pérdidas de rendimiento y defectos de calidad en algunos procesos de la producción de lima ocasionan que la eficacia global (OEE) no alcance los valores planeados en la fábrica de herramientas manuales. Ante ello, se planteó la posibilidad de realizar un proyecto a través de la aplicación de técnicas de ingeniería industrial para el mejoramiento de la OEE en un proceso crítico de la línea de limas basándose en la siguiente metodología:

1. Obtener un panorama general de la fábrica de herramientas manuales “[REDACTED]”.
2. Realizar diagnóstico de las líneas de herramientas manuales.
3. Crear de mapa de cadena de valor (VSM) del estado presente de la línea de lima triangular 6.
4. Describir el proceso seleccionado de la línea de lima triangular 6 a mejorar.
5. Calcular la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado.
6. Realizar análisis de la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado.
7. Definir técnicas y herramientas a implementar en el proceso de rectificado.
8. Construir modelo de simulación para evaluar propuestas de mejora.
9. Comparación de los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos de la propuesta de mejora.

En los primeros tres pasos se obtuvo un panorama general de la fábrica y se realizó un diagnóstico de la línea de lima triangular 6 desarrollando un mapa de la cadena de valor de estado presente, de los procesos de producción de lima. Se analizó la situación problemática

del estado presente y se seleccionó el proceso con mayor oportunidad de mejora, denominado “rectificado”.

Durante el paso cinco y seis se calculó la eficacia global (OEE) del proceso de rectificado, mediante el producto de tres factores: disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad. Se realizó un análisis de cada uno de los factores de la OEE mediante un diagrama de pescado para determinar las causas que generan pérdidas y que disminuyen el valor de la OEE. Se propusieron algunas soluciones de mejora para disminuir las pérdidas de los tres factores y así aumentar el valor de la OEE. Se seleccionó la idea de mayor impacto a través del método por puntos, siendo el diseño de un mecanismo de volteo automático de limas la idea ganadora para aumentar la tasa de rendimiento que es el factor crítico.

En los pasos siete y ocho se definieron las técnicas y herramientas de ingeniería industrial apropiadas para su implementación. Se implementó la técnica de simulación para evaluar la idea ganadora con base en su inversión y en el porcentaje de mejora de la tasa de rendimiento. La técnica de simulación se implementó con ayuda del *software Flexsim* para la construcción del modelo del sistema actual y del modelo con la idea de mejora.

En el paso nueve se validó el modelo de simulación, se experimentó en el modelo de simulación con la idea de mejora, se analizaron los resultados, se evaluó el desempeño posterior a la implementación de técnicas y herramientas y se compararon los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos mediante el uso de una prueba estadística. La media de los valores resultantes de las corridas de la propuesta con el mecanismo de volteo automático de limas en el proceso de rectificado fue de 82.514%. Comparando el valor de la media obtenido con la media de los valores de las corridas del modelo del sistema actual, se pudo observar que la media del indicador “tasa de rendimiento” mejoró un 25.97%.

Recomendaciones

Durante la realización de este trabajo de tesis se observaron diversas problemáticas que se presentaron dentro de la línea de lima triangular 6 de la fábrica de herramientas manuales; por lo tanto, se presentan a continuación algunas recomendaciones que podrían ayudar a la mejora de esta línea:

- Calcular periódicamente el indicador de la eficacia global (OEE) con sus tres factores: disponibilidad, tasa de rendimiento y tasa de calidad; en cada uno de los procesos que conforman la línea de lima triangular para mejorar cada factor que no cumpla con los valores estándar.
- Colocar un horómetro en cada máquina para determinar correctamente el tiempo real que las máquinas están trabajando, agilizando el cálculo del indicador OEE y sus tres factores.
- Considerar la posibilidad de eliminar la actividad “generar punto de referencia” en el proceso de rectificado, ya que mejoraría la tasa de rendimiento.
- Calcular el tiempo de desgaste de las muelas del proceso de rectificado para planear correctamente su mantenimiento, evitando que las limas salgan con defectos de calidad. Además, implementar la metodología SMED disminuiría los tiempos de preparación.
- Mejorar el orden y limpieza de las áreas de trabajo en cada proceso, implementando la metodología de 5’s.
- Efectuar con mayor eficacia la planeación del mantenimiento para evitar que los paros no programados, consuman la mayor parte del tiempo ocioso de la fábrica.
- Explorar la posibilidad de implementar alimentadores automáticos en las máquinas, ya que es el principal problema de tener una tasa de rendimiento por debajo de los valores estándar.
- Realizar formato de lección de un punto (LUP) para afilar correctamente las cuchillas de las máquinas de picado.

Fuentes de información

- Aldana Castillo, Y. (2016). "Procedimiento para la simulación computacional de procesos productivos" Universidad de Holguín, Facultad de Ciencias Empresariales y Administración ...,
- Beaverstock, M., Greenwood, A., y Nordgren, W. (2012). *Applied Simulation: Modeling and Analysis using Flexsim*. (U. F. s. p. Orem, Ed.).
- Cabrera Calva, R. C. (2011). *VSM: Mapeo del Flujo de Valor. EVSM: Extendido para Cadena de Suministro*. Rafael Carlos Cabrera Calva.
- Cabrera Calva, R. C. (2014). *TPS Americanizado: Manual de manufactura esbelta*. Rafael Carlos Cabrera Calva.
- Camisón, C., Cruz, S., y González, T. (2006). *Gestión de la calidad*. Pearson Educación Madrid.
- CANACINTRA. (2017). "Estudio para determinar la competitividad de la industria metalmecánica de la CANACINTRA".
- Canavos, G. C. (1988). "Probabilidad y Estadística-Aplicaciones y Métodos". McGrawHill/Interamericana de México, SA. México.
- Chung, C. A. (2004). *Simulation modeling handbook: a practical approach*. CRC press.
- CNC Software, I. (2020). *Mastercam Solutions*. CNC Software, Inc. Recuperado el 15 de abril de 2020 en la página <https://www.mastercam.com/solutions/>
- Coss Bu, R. (2003). *Simulación: Un enfoque práctico*. Editorial Limusa SA.
- DNP. (2004). *Cadenas productivas: estructura, comercio internacional y protección*. Departamento Nacional de Planeación. Dirección de Desarrollo Urbano y Política Ambiental.
- FlexSim. (2020). *Software Products de Simulación*.la página <https://docs.flexsim.com/en/20.2/Reference/SystemRequirements/>
- Galgano, A. (1995). *Los siete instrumentos de la calidad total*. Ediciones Diaz de Santos.
- Garza, E. G. (2008). *Administración de la calidad total*. Editorial Pax México.
- Harrell, C., Bowden, R., y Ghosh, B. K. (2004). *Simulation using promodel*. McGraw-Hill Higher Education.

- Hernández, J., y Vizán, A. (2013). "*Lean manufacturing Conceptos, técnicas e implantación*". Madrid: Fundación EOI.
- Hines, W., y Montgomery, D. (1996). "*Probabilidad y estadística para ingeniería y administración (Segunda Edición ed.)*". México DF, México: Compañía Editorial Continental, SA de CV.
- Högfeltd, D. (2005). "*Plant efficiency: A value stream mapping and overall equipment effectiveness study*" Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Suecia.
- [Record #86 is using a reference type undefined in this output style.]
- Kume, H. (1992). *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad*. Editorial Norma.
- Law, A. M., y Associates, I. (2007). *Simulation modeling and analysis* (Vol. Quinta edición). McGraw-Hill New York.
- Law, A. M., y Associates, I. (2020). *Expertfit User's guide*.
- Law, A. M., Kelton, W. D., y Kelton, W. D. (2000). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 3). McGraw-Hill New York.
- Law M, A., y Associates, I. (2020). *Distribution Fitting Software ExpertFit*. Averill M. Law & Associates. Recuperado el 2 de noviembre de 2020 en la página <http://www.averill-law.com/distribution-fitting/discrete-event-simulation/>
- Lee, Q., y Snyder, B. (2006). *The strategos guide to value stream & process mapping*. Enna Products Corporation.
- Levitt, J. (2005). *Managing factory maintenance*. Industrial Press Inc.
- Lloréns Montes, F. J., y Fuentes Fuentes, M. d. M. (2001). *Calidad total: fundamentos e implantación*.
- Lomax, R. G. (2001). *An introduction to statistical concepts for education and behavioral sciences* (Vol. 94). Lawrence Erlbaum Associates New York, NY, USA:.
- Madariaga, F. N. (2013). *Lean Manufacturing exposición adaptada a la fabricación repetitiva de familias de productos mediante procesos discretos*. Bubok publishing.
- Montgomery, G. C., Runger, G. C., y Medal, E. G. U. (2003). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- Morales, J. (2004). *Estudio sobre el Estado de Situación de la Implementación del TPM en Chile*. Estudio de situación de la implementación del TPM en Chile.
- Moras Sánchez, C. G. (2017). *Modelos de simulación* [Material de clase]. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba. Division de Estudios de Posgrado e Investigación.

- Moras Sánchez, C. G. (2019). *Pruebas de hipótesis* [Material de clase]. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba. Division de Estudios de Posgrado e Investigación.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: total productive maintenance.(Translation)*. Productivity Press, Inc.
- Nakajima, S. (1989). *TPM development program: implementing total productive maintenance*. Productivity press.
- RAE. (2020). *Lima*. Real Academia Española. Recuperado el 13 de abril de 2020 en la página <https://dle.rae.es/?w=lima>
- Réveillac, J. M. (2017). *Modeling and Simulation of Logistics Flows 3* (F. IUniversity of Burgundy, Ed.).
- Rosas, M. A. G. (2014). "*Estrategia de mejora de la productividad en una fábrica de papel*" Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México.
- Ruiz, J. A. C. (2009). *La teoría de la medición del despilfarro*. José Agustín Cruelles Ruiz.
- Saucedo, L. A. (2011). "*Incrementar la eficiencia y productividad bajo técnicas híbridas de integración de planta, en procesos de fabricación de utensilios de cocina de Aluminio*" Tesis de maestría, Division de estudios de posgrados, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Sinaloa, México.
- Shannon, R. E., y Bernal, F. (1988). "*Simulación de sistemas: Diseño*". *Desarrollo de implantación. Mexico, Trillas*.
- Suzuki, T. (2017). *TPM en industrias de proceso*. Routledge.
- Tarifa, E. E. (2001). "*Teoría de modelos y simulación*". *Facultad de Ingeniería, Universidad de Jujuy*.
- Touron, J. (2016). Definición del OEE. <https://www.sistemasoe.com/definicion-oe/>
- Urquiza, X. R. M., y Arellano, F. D. V. (2018). "*Mejora en el sistema de medición de la eficiencia general de los equipos en una planta productora de alimentos balanceados*" (Ingeniería Industrial, Tesis de Ingeniería) Escuela Superior Politécnica Del Litoral
- Vijayakumar, S., y Gajendran, S. (2014). "*Improvement of overall equipment effectiveness (OEE) in injection moulding process industry*". *IOSR J Mech Civil Eng*, 2(10), 47-60.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., y Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación.

Anexo 1

Formato de recolección de datos para el VSM

La Tabla A1. 1 muestra el formato para la recolección de datos de cada uno de los procesos que integran la línea de lima triangular 6, los cuales, fueron utilizados para calcular los indicadores del VSM mostrado en la Sección 3.4.6. El formato cuenta con un apartado de datos donde se coloca el proceso observado, el inventario, las actividades realizadas en el proceso y en cada fila el tiempo de esa actividad. El formato completo se encuentra en el CD adjunto como Anexo 1.

Tabla A1. 1 Formato de recolección de datos para el VSM.

Forja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.
Inventario en proceso	2400	2900	2300	2200	2500	3200	3000	2800	3500	3100	1300	1800	2900	1500	2100	2500
Tomar lima	0.66	0.59	0.79	0.59	0.59	1.00	0.80	0.96	0.92	0.92	1.32	1.32	0.92	0.98	0.91	0.88
Forjar lima	1.88	1.16	2.41	1.78	1.61	1.16	1.40	1.02	1.55	1.15	0.94	1.01	1.42	1.21	1.22	1.39
Colocar lima en carro	0.61	0.28	0.43	0.57	0.63	0.83	0.70	1.21	0.72	0.94	0.87	1.04	0.92	0.95	0.70	0.76
Transporte	38.28	37.77	47.07	39.85	40.15	41.29	38.57	43.89	37.91	40.83	40.01	33.43	41.62	35.86	39.25	0.10
Corte de espigo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.
Inventario en proceso	9000	8000	6200	8600	9500	7400	6900	7300	8800	7200	7800	8200	9000	7950	8200	8003
Enfriamiento	3.75	4.96	4.79	4.22	4.25	3.13	4.74	3.50	4.25	3.13	4.63	3.75	6.02	4.25	4.50	4.26
Llevar carro a cortadora	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04
Tomar lima	0.17	0.52	0.11	0.27	0.09	0.19	0.17	0.33	0.23	0.30	0.16	0.22	0.16	0.20	0.11	0.21
Cortar lima	0.24	0.17	0.20	0.31	0.11	0.23	0.23	0.40	0.56	0.64	0.57	0.87	0.60	0.42	0.28	0.39
Colocar lima en carro	0.18	0.18	0.07	0.12	0.09	0.23	0.18	0.07	0.12	0.14	0.12	0.13	0.13	2.67	0.22	0.31
Transporte	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Anexo 2

Formato de recolección de tiempos para el modelo de simulación

La Tabla A2. 1 muestra el formato para la recolección de tiempos de las actividades realizadas en el proceso de rectificado. El formato cuenta con un apartado de datos donde se colocan las actividades realizadas en el proceso y en cada columna el tiempo de esa actividad.

Tabla A2. 1 Recolección de tiempos del modelo de simulación.

Proceso		Rectificado							
Fecha:		04/09/2020 - 14/11/2020							
Responsable:		Tesisista							
Dato	Tomar y acomodar limas en la máquina	Generar punto de referencia	Voltear limas por primera vez	Rectificar por primera vez	Voltear limas por segunda vez	Rectificar por segunda vez	Voltear limas por tercera vez	Rectificar por tercera vez	Inspeccionar y colocar limas en charola
1	9.00	16.55	5.07	40.75	3.25	38.50	4.53	32.63	10.40
2	8.83	18.34	3.48	41.14	5.32	39.35	5.06	32.88	21.04
3	7.42	17.98	6.89	41.14	4.40	41.69	7.10	31.68	16.66
4	8.31	16.10	4.25	37.22	6.50	40.29	5.38	36.35	18.55
5	12.55	13.56	5.21	40.03	5.08	40.02	3.54	37.81	15.00
6	13.95	14.86	5.01	37.23	4.96	40.98	4.62	37.82	30.94
7	10.19	19.05	4.41	38.33	3.84	41.33	4.46	33.03	25.19
8	8.47	18.24	3.64	40.77	4.72	41.85	4.29	33.34	20.19
9	7.85	19.06	4.53	43.64	4.61	40.92	4.13	35.51	7.09
10	9.54	19.07	3.74	39.77	3.49	42.16	3.96	36.06	25.86
11	11.16	19.34	4.47	40.50	6.37	40.91	3.79	33.77	25.98
12	10.61	19.39	3.95	39.35	4.26	42.76	3.63	34.09	28.22
13	14.05	20.08	4.92	32.85	4.14	33.63	4.46	38.45	15.57
14	15.41	20.59	4.65	36.66	5.02	41.07	5.30	29.75	14.30
15	15.29	13.30	5.38	33.10	4.91	36.65	4.13	29.35	23.55
16	8.78	14.05	4.10	42.10	3.79	41.13	3.96	36.06	30.87
17	10.75	18.99	3.83	38.06	5.67	39.59	4.80	36.44	21.25
18	8.02	15.10	3.56	42.04	4.55	40.57	5.63	32.15	21.57
19	11.08	17.59	4.28	41.01	3.44	42.20	4.47	36.43	3.00
20	12.59	17.64	4.01	40.56	4.32	39.01	4.30	34.15	27.14
21	13.51	17.21	4.74	39.82	4.20	41.06	5.13	33.24	24.12
Prom.	10.83	17.43	4.48	39.34	4.61	40.27	4.60	34.33	20.31

Anexo 3

Modelo de simulación del sistema actual

La Figura A3. 1 muestra el modelo de simulación del sistema actual del proceso de rectificación, construido con ayuda del *software Flexsim* en la Sección 3.9.4.5. El modelo de simulación se encuentra en el CD adjunto como Sistema actual.

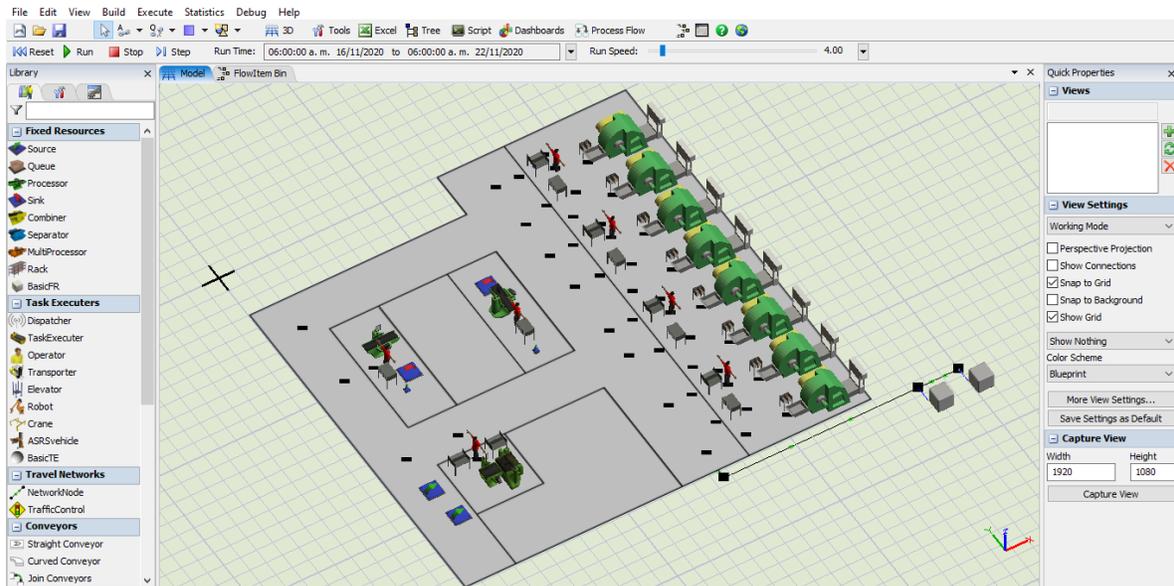


Figura A3. 1 Modelo de simulación del sistema actual del proceso de rectificación.

Anexo 4

Tabla de valores t de la distribución de t -student

La Tabla A4. 1 muestra la tabla de valores de t -student descrita por William Sealy Gosset, utilizada en la aplicación de calcular el número óptimo de corridas (Sección 3.9.5), en la validación del modelo de simulación (Sección 3.9.6.2) y en la comparación de los resultados del sistema actual contra los resultados obtenidos de la propuesta de mejora (Sección 3.10).

Tabla A4. 1 Tabla de valores t de student (Lomax, 2001).

ν	$\alpha_1 = .10$ $\alpha_2 = .20$.05 .10	.025 .050	.01 .02	.005 .010	.0025 .0050	.001 .002	.0005 .0010
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	1.888	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	22.327	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	6.841	7.453	10.214	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

α_1 is the upper-tail value of the distribution with ν degrees of freedom, appropriate for use in a one-tailed test; use α_2 for a two-tailed test.

Anexo 5

Formato para la recolección de tiempos de la propuesta C

La propuesta C consiste en simular la instalación de un mecanismo de volteo automático de limas en las máquinas rectificadoras. Por lo tanto, se realizó una recolección de tiempos de los tres volteos de limas, sin considerar la espera por un operador, realizados en el proceso de rectificado. La Tabla A5. 1 muestra el formato con los tiempos recolectados, el cual, cuenta con un apartado de datos donde se colocan las actividades realizadas en el proceso y en cada columna el tiempo de esa actividad.

Tabla A5. 1 Recolección de tiempos de la propuesta C.

Proceso	Rectificado		
Fecha:	04/09/2020 - 21/11/2020		
Responsable:	Tesisista		
Dato	Voltear limas por primera vez	Voltear limas por segunda vez	Voltear limas por tercera vez
1	5.07	3.25	4.53
2	3.48	5.32	5.06
3	6.89	4.40	7.10
4	4.25	6.50	5.38
5	5.21	5.08	3.54
6	5.01	4.96	4.62
7	4.41	3.84	4.46
8	3.64	4.72	4.29
9	4.53	4.61	4.13
10	3.74	3.49	3.96
11	4.47	6.37	3.79
12	3.95	4.26	3.63
13	4.92	4.14	4.46
14	4.65	5.02	5.30
15	5.38	4.91	4.13
16	4.10	3.79	3.96
17	3.83	5.67	4.80
18	3.56	4.55	5.63
19	4.28	3.44	4.47
20	4.01	4.32	4.30
21	4.74	4.20	5.13
Prom.	4.48	4.61	4.60

Anexo 6

Modelo de simulación de la propuesta C

El modelo de simulación de la propuesta C, el cual, consiste en instalar mecanismo de volteo automático de limas, fue construido con ayuda del *software Flexsim* en la Sección 3.9.7.1. El modelo de simulación con la propuesta C se encuentra en el CD adjunto como Propuesta C.

Anexo 7

Modelo de simulación de la propuesta D

El modelo de simulación de la propuesta D, el cual, consiste en eliminar la generación del punto de referencia, fue construido con ayuda del *software Flexsim* en la Sección 3.9.7.2. El modelo de simulación con la propuesta D se encuentra en el CD adjunto como Propuesta D.

Anexo 8

Modelo de simulación de la combinación

El modelo de simulación de la combinación de la propuesta C y D, fue construido con ayuda del *software Flexsim* en la Sección 3.9.7.3. El modelo de simulación con la combinación de ambas propuestas se encuentra en el CD adjunto como *Combinación*.