



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**Instituto Tecnológico de Nuevo León**

División de Estudios de Posgrado e Investigación

**TESIS**

Modelado computacional para mejorar la eficiencia de un proceso de  
manufactura de laminación de papel aluminio.

Ing. Paulina Vásquez Macias  
**NC. G13270213**

para obtener el grado de Maestría

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

Tesis dirigida por

Dr. Rene Sanjuan Galindo  
Dr. José Isidro Hernández Vega

Director  
Codirector

30 de noviembre de 2022  
Ciudad Guadalupe, Nuevo León



Instituto Tecnológico de Nuevo León  
Departamento de División de Estudios de Posgrado e investigación


Guadalupe, Nuevo León, **8/noviembre/2022**

**DR. MARIO CÉSAR OSORIO ABRAHAM**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE**


El Comité Revisor de Tesis nos es grato comunicarle que, conforme a los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México para obtener el grado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA, después de haber sometido a revisión académica el proyecto de Tesis titulado: **"MODELADO COMPUTACIONAL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UN PROCESO DE MANUFACTURA DE LAMINACIÓN DE PAPEL ALUMINIO"** realizada por la **PAULINA VASQUEZ MACIAS**, No. De Control: **G13270213**, codirigida por DR. RENE SANJUAN GALINDO, y DR. JOSÉ ISIDRO HERNÁNDEZ VEGA, y habiendo realizado las correcciones que le fueron indicadas, acordamos ACEPTAR el documento final de proyecto de Tesis, así mismo le solicitamos tenga a bien extender el correspondiente oficio de autorización de impresión.

Sin otro particular, agradecemos la atención.

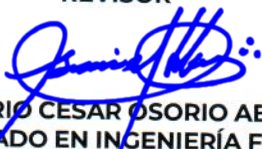
**DIRECTOR**

  
**RENE SANJUAN GALINDO**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**CÉDULA: 7685678**


**CODIRECTOR**

  
**JOSÉ ISIDRO HERNÁNDEZ VEGA**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA CON**  
**ORIENTACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN**  
**CÉDULA: 12058578**

**REVISOR**

  
**MARIO CESAR OSORIO ABRAHAM**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**  
**CÉDULA: 7576591**

**REVISOR**

  
**MIGUEL ANGEL OCHOA VILLEGAS**  
**DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS DE**  
**INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES**  
**CÉDULA: 9386150**

ccp. Archivo





Guadalupe Nuevo León, **14/noviembre/2022**

**ING. PAULINA VASQUEZ MACIAS  
CANDIDATA A OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
PRESENTE**

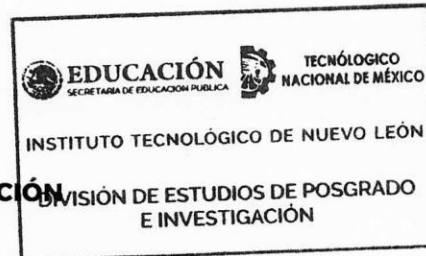
Después de haber atendido las recomendaciones sugeridas por la **Comisión del Consejo de Posgrado de Ingeniería**, en relación a su trabajo de Proyecto de Tesis, cuyo título es: **"MODELADO COMPUTACIONAL PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE UN PROCESO DE MANUFACTURA DE LAMINACIÓN DE PAPEL ALUMINIO"**, me permito comunicarle que, conforme a los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado, se le concede la autorización para que proceda con la impresión de su proyecto de Tesis.

Sin otro particular, agradecemos la atención.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*  
*"CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL HOMBRE"*

**DR. MARIO CÉSAR OSORIO ABRAHAM  
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



C.c.p.- Dr. Isidro Hernández Vega -Coordinador de la Maestría en Ingeniería  
C.c.p.- Expediente

MCOA/ross







**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Nuevo León  
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

## AUTORIZACIÓN PARA PRESENTAR EXAMEN DE GRADO DE MAESTRÍA

Guadalupe Nuevo León, **22/noviembre/2022**

**ING. PAULINA VASQUEZ MACÍAS**  
**PRESENTE:**

Por medio del presente me es grato comunicarle que **SE AUTORIZA** la presentación del examen de **Maestría en Ingeniería**, toda vez que ha cubiertos los requisitos necesarios.

Aprovecho la ocasión para desearle el mejor de los éxitos en su examen, así como en su vida profesional, y agradecerle la confianza depositada en nuestra institución para la realización de sus estudios de Posgrado.

### ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®  
"CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL HOMBRE"



**DR. MIGUEL ÁNGEL OCHOA VILLEGAS**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C.c.p.- D. José Isidro Hernández Vega. -Coordinador de la Maestría en Ingeniería  
C.c.p.- Expe.Jiente

MAOV/ICO \ /Ross\*



Eloy Cavazos No. 2001 Col. Tolteca, C.P. 67170, Guadalupe, Nuevo León Tel. (81) 8157 0500  
www.tecnm.mx | nuevoleon.tecnm.mx



Ricardo  
**2022 Flores**  
Año de Magón  
PRELUSION DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA





FUNDICIÓN DE ALEACIONES ESPECIALES  
DE MÉXICO S.A. DE C.V.

Ramos Arizpe Coah., 27 de septiembre de 2022.

Dr. Mario Alberto Martínez Hernández  
Director  
Instituto Tecnológico de Nuevo León

Por este medio expresamos interés en la utilización de los avances derivados del proyecto "MODELADO COMPUTACIONAL APLICADO AL ANÁLISIS DE UN PROCESO DE MANUFACTURA DE LAMINADO DE PAPEL" que desarrollan el Dr. René Sanjuan Galindo y Paulina Vásquez Macías debido al potencial de uso en el sector de metales y aleaciones de la región.

Sin otro particular.

ING. HORACIO H. VILLARREAL MÁRQUEZ  
GERENTE DE PLANTA



Guadalupe Nuevo León, 30/noviembre/2022  
Asunto: Cesión de derechos

**DR. MARIO ALBERTO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE NUEVO LEÓN**  
**DIRECTOR**  
**PRESENTE**

Hago manifiesta la

**CESIÓN DE DERECHOS**

De la tesis Modelado computacional para mejorar la eficiencia de un proceso de manufactura de laminación de papel aluminio que fue dirigida por el Dr. Rene Sanjuan Galindo.

En cumplimiento a los requisitos de obtención del grado que señala el numeral 2.15.5 de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*



**Paulina Vasquez Macias**  
**Número de Control G13270213**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

ccp. Archivo

NOMBRE DEL TRABAJO

**Paulina 04 oct.pdf**

AUTOR

**Paulina Vasquez Macias**

RECUENTO DE PALABRAS

**28481 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**140644 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**133 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**7.1MB**

FECHA DE ENTREGA

**Oct 10, 2022 7:07 PM CDT**

FECHA DEL INFORME

**Oct 10, 2022 7:18 PM CDT****● 18% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base c

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 11% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr



## Resumen

El presente trabajo describe la propuesta de mejora desarrollada en un proceso de manufactura de laminado de papel aluminio. En el proceso estudiado se detectó como oportunidad de mejora en el proceso de laminado conformada por la impresión, grabado y corte. Es un proceso poco automatizado y con amplia intervención de operadores. Se procesan 13 diferentes tipos de calibres de material: 7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51  $\mu\text{m}$ , que corresponden a las familias 50, 83, 101, 107, 113, 115, 120, 133, 139, 140, 165, 168, 188, 192, 200, 201, 235, 280, 281, 289, 330, 334 y 449, con diferentes cantidades de material que van desde 2 kg hasta 360 kg.

En esta parte del proceso los principales problemas a la producción son la utilidad de maquinaria, falta de planeación, falta de estandarización de los tiempos de proceso como en cantidad de material procesada, factor humano, defectos que se generan durante el laminado y fallas que puedan ocurrir durante el proceso. Se analizaron las actividades del proceso clasificadas como evitables e inevitables y el porcentaje utilizado, para saber cuáles no agregar valor al proceso. Para generar una propuesta de mejora que considere estos problemas, fue necesario realizar un análisis estadístico de un estudio de toma de tiempos y movimientos de Mujica (1999) del proceso de laminado de rollos de papel aluminio. También las condiciones de operación se utilizaron para el diseño y modelado computacional del proceso en el software Flexsim.

Para la simulación del proceso e identificar condiciones de mejora en el procesamiento de rollos de papel aluminio se hizo un análisis de los tiempos de proceso con el método de máxima verosimilitud para determinar la distribución de probabilidad de los datos. Conociendo el comportamiento de probabilidad que tiene los procesos de impresión, grabado y corte, se simuló el proceso real, se comparó y analizó el comportamiento de los datos de planta con la simulación. Con lo anterior se propuso 19 escenarios con seis secuencias de procesamiento y tres diferentes

cantidades de material (50 kg, 100 kg y cantidad procesada en planta) para simularse y mejorar el procesamiento del material.

La simulación se enfoca en la manufactura de 13 tipos de calibres de rollos de papel aluminio para mejorar la eficiencia del proceso, modelando desde el proceso original hasta lograr una mejor utilidad de maquinaria y productividad del proceso.

Los resultados de este trabajo sugirieron que se obtendrá una mejora en la eficiencia del proceso si se efectúa una secuencia de procesamiento de calibre más grueso al más delgado con rollos de 50 kg de material, ya que de efectuarse esto se logrará un total de 13 rollos (0.65 ton) en un ciclo de 16 horas aumentando la productividad 0.58 (ton/d). También con la estrategia sugerida de un programa de implementación de seis acciones enfocadas en el personal, mantenimiento, cadena de suministro, estandarización de trabajo, comunicación y calidad, eliminan desperdicios que no agregan valor al proceso y disminuirán significativamente las actividades evitables de los tres procesos haciendo más eficiente el proceso de laminado de papel aluminio.

## **Abstract**

The present work describes the improvement proposal developed in a manufacturing process of aluminum foil laminate. In the studied process, it was detected as an opportunity for improvement in the laminating process made up of printing, engraving and cutting. It is a little automated process and with extensive intervention of operators. 13 different types of material gauges are processed: 7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 and 51  $\mu\text{m}$ , which correspond to families 50, 83, 101, 107, 113, 115, 120, 133, 139, 140, 165, 168, 188, 192, 200, 201, 235, 280, 281, 289, 330, 334 and 449, with different amounts of material ranging from 2 kg up to 360 kg.

In this part of the process, the main production problems are the usefulness of machinery, lack of planning, lack of standardization of process times as well as the amount of material processed, the human factor, defects that are generated during rolling, and failures that may occur during the process. The activities of the process classified as avoidable and unavoidable and the percentage used were analyzed to know which ones do not add value to the process. In order to generate an improvement proposal that considers these problems, it was necessary to carry out a statistical analysis of a time and movement study by Mujica (1999) of the process of rolling aluminum foil rolls. Also the operating conditions were used for the design and computational modeling of the process in the Flexsim software.

For the simulation of the process and to identify improvement conditions in the processing of aluminum foil rolls, an analysis of the process times was made with the maximum likelihood method to determine the probability distribution of the data. Knowing the probability behavior of the printing, engraving and cutting processes, the real process was simulated, the behavior of the plant data was compared and analyzed with the simulation. With the above, 19 scenarios were proposed with six processing sequences and three different quantities of material (50 kg, 100 kg and quantity processed in the plant) to simulate and improve the processing of the material.



The simulation focuses on the manufacture of 13 types of aluminum foil roll gauges to improve process efficiency, modeling from the original process to achieve better machinery utility and process productivity.

The results of this work suggested that an improvement in the efficiency of the process will be obtained if a processing sequence is carried out from the thickest to the thinnest caliber with rolls of 50 kg of material, since if this is done, a total of 13 rolls will be achieved. (0.65 ton) in a 16-hour cycle, increasing productivity by 0.58 (ton/d). Also with the suggested strategy of an implementation program of six actions focused on personnel, maintenance, supply chain, work standardization, communication and quality, they eliminate waste that does not add value to the process and will significantly reduce the avoidable activities of the three processes. making the aluminum foil lamination process more efficient.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México), por la beca otorgada en la Convocatoria de Becas Nacionales 2020.

# Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	III
Agradecimientos.....	V
Introducción.....	1
Capítulo 1.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo general.....	4
1.4 Objetivos particulares.....	4
1.5 Hipótesis.....	5
Capítulo 2 Revisión de literatura.....	6
2.1 Modelo de sistema.....	6
2.2 Simulación computacional.....	8
2.2.1 Paquetes de simulación computacional.....	10
2.2.1.1 Arena.....	10
2.2.1.2 AutoMod.....	10
2.2.1.3 Enterprise Dynamics.....	10
2.2.1.4 ExtendSim.....	10
2.2.1.5 Plant Simulation.....	10
2.2.1.6 Simul8.....	11
2.2.1.7 Simio.....	11
2.2.1.8 FlexSim.....	11
2.2.1.8.1 Modelado computacional de procesos con Flexsim.....	14
2.3 Método de la máxima verosimilitud (MV).....	21
2.4 Procesos de manufactura.....	21
2.4.1 Distribución de planta.....	22
2.4.1.1 Principios básicos de la distribución de planta.....	22
2.4.2 Manufactura esbelta.....	23
2.4.2.1 Los 7 desperdicios en la manufactura esbelta.....	23



2.4.2.2	Diagrama de flujo de proceso .....	25
2.5	Aluminio .....	29
2.6	Laminado de aluminio .....	31
2.6.1	Papel convertido .....	32
2.6.1.1	Proceso de impresión .....	34
2.6.1.2	Proceso de laminación .....	34
2.6.1.3	Proceso de laqueado .....	34
2.6.1.4	Proceso de encerado .....	35
2.6.1.5	Proceso de grabado .....	35
2.6.1.6	Proceso de corte .....	35
2.6.2	Defectos comunes generados en el proceso de laminado .....	35
2.6.2.1	Túneles en dirección transversal (TD) .....	36
2.6.2.2	Arrugadas diagonales .....	36
2.6.2.3	Rizado, canales (Bucking).....	36
2.6.2.4	Curling.....	37
2.6.2.5	Defectos de apariencia .....	37
2.6.2.6	Burbujas .....	37
2.6.2.7	Delaminación .....	39
2.6.2.8	Telescopio.....	39
Capítulo 3	Metodología .....	41
3.1	Descripción del proceso de manufactura de laminado de papel aluminio	41
3.1.1	Layout de proceso y diagrama de recorrido .....	41
3.1.2	Diagrama de proceso .....	42
3.1.3	Diagrama de flujo de proceso papel convertido.....	43
3.1.4	Tiempos de procesos medidos en planta .....	50
3.1.5	Análisis de los tiempos de procesamiento por el método de la máxima verosimilitud.....	52
3.1.6	Variables de proceso consideradas en la simulación computacional	54
3.2	Modelo de simulación.....	54
3.2.1	Construcción de modelo .....	54
3.2.2	Secuencias de proceso simuladas en Flexsim ( <i>r</i> ) .....	55

3.2.3	Simulación computacional en Flexsim.....	57
3.2.4	Configuración de las secuencias de procesamiento .....	62
Capítulo 4	Resultados y discusión .....	66
4.1	Resultados proceso de planta.....	66
4.1.1	Comparación de porcentaje de tiempo de actividad evitables e inevitables.....	66
4.1.2	Resultado de tiempos de los procesos .....	66
4.1.2.1	Tiempos de actividades inevitables y evitables.....	67
4.1.2.2	Comparación de actividades por cada proceso .....	68
4.1.3	Comparación de tiempos de procesamiento .....	69
4.1.4	Comparación de tiempos por procesos .....	69
4.1.5	Comparación de tiempos de planta con los resultados de simulación en Flexsim .....	71
4.1.6	Modelo de interacción de factores .....	71
4.1.7	Comparación de cantidad de material procesado en las secuencias de procesamiento por simulación. ....	74
4.1.8	Inventario de material procesado.....	76
4.2	Simulación computacional de las secuencias de procesamiento.....	78
4.2.1	Simulación del proceso de planta en Flexsim.....	78
4.2.2	Utilidad de maquinaria de las secuencias de procesamiento por simulación computacional.....	78
4.2.3	Estado de operación de la maquinaria .....	81
4.3	Propuesta de mejora .....	83
Conclusiones	.....	88
Trabajo futuro	.....	89
Referencias	.....	90
Anexos	.....	96

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Antecedentes de modelado computacional.....	14
Cuadro 2. Descripción de los principios básicos de la distribución de planta.....	22
Cuadro 3. Descripción de los 7 desperdicios. ....	24
Cuadro 4. Diagrama de flujo del proceso de impresión.....	44
Cuadro 5. Diagrama de flujo del proceso de grabado. ....	47
Cuadro 6. Diagrama de flujo de proceso de corte. ....	49
Cuadro 7. Tiempos de procesamiento de impresión para diferentes familias. Datos tomados de planta.....	50
Cuadro 8. Tiempos de procesamiento de grabado para diferentes familias. Datos tomados de planta.....	51
Cuadro 9. Tiempos de procesamiento de corte para diferentes familias. Datos tomados de planta.....	51
Cuadro 10. Parámetros de estimación del método de máxima verosimilitud de la distribución gamma. ....	52
Cuadro 11. Cantidad de objetos en los procesos.....	54
Cuadro 12. Escenarios de cantidad de material de 50 kg del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.....	56
Cuadro 13. Escenarios de cantidad de material de 100 kg del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.....	56
Cuadro 14. Escenarios de cantidad de material procesado en planta del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.....	56
Cuadro 15. Referencia de tipo de espera.....	58
Cuadro 16. Conexiones de objetos del modelo de simulación.....	60
Cuadro 17. Configuración de parámetros de los objetos usados en Flexsim.....	60
Cuadro 18. Parámetros de la distribución gamma de los procesos. ....	61
Cuadro 19. Definición de tiempos de proceso de las secuencias de procesamiento computacional de acuerdo a la cantidad de material, tipo de calibre y proceso....	62
Cuadro 20. Parámetros de la distribución gamma de tiempos de proceso de los calibres de las secuencias de procesamiento. ....	64

Cuadro 21. Comparativo de los tiempos de las actividades de cada proceso impresión, grabado y corte.....	66
Cuadro 22. Estadística de las variables de los procesos de impresión, grabado y corte de laminado de papel aluminio.....	70
Cuadro 23. Comparativo de rango de tiempos de proceso en planta respecto a los datos obtenidos por simulación.....	71
Cuadro 24. Simulación computacional del material por ciclo por cada secuencia de procesamiento.....	76
Cuadro 25. Utilidad de maquinaria por secuencia de procesamiento estimada mediante simulación Flexsim por un periodo de 48 h en el laminado de papel aluminio.....	79
Cuadro 26. Estado de operación de la maquinaria de las secuencias de procesamiento 1, 7 y 13.....	82
Cuadro 27. Utilidad de maquinaria por un periodo de 48 h y el estado de operación de la maquinaria de la secuencia de procesamiento 19.....	83
Cuadro 28. Comparación de tiempos y material procesado de las secuencias modeladas en Flexsim por ciclo.....	84

## Índice de figuras

Figura 1. Tipos de modelo de sistema. (Obtenido de Law, 2013). .....	6
Figura 2. Metodología para un proyecto de simulación. (Obtenido de Casadiego, 2013). .....	13
Figura 3. Símbolos usados en los diagramas de proceso de acuerdo con el estándar ASME (obtenido de Niebel y Andris, 2009). .....	26
Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de material o producto (obtenido de Niebel y Andris, 2009). .....	27
Figura 5. Diagrama de flujo de proceso de trabajador (obtenido de Niebel y Andris, 2009). .....	28
Figura 6. Proceso de laminado (obtenido de Scharer, 2013). .....	32
Figura 7. Secuencia del proceso de laminado de papel aluminio (Obtenido de Mujica, 1999). .....	33
Figura 8. Productos que se obtienen del laminado de papel aluminio (Obtenido de Grupo Vasconia, 2021). .....	33
Figura 9. Rizado, canales (Bucking) (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	36
Figura 10. Curling (Obtenido de BirthLH, s.f.). .....	37
Figura 11. Defectos de apariencia (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	37
Figura 12. Burbujas por tintas abrasivas (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	38
Figura 13. Burbujas causadas por gases atrapados (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	38
Figura 14. Burbujas al borde del área de impresión (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	39
Figura 15. Telescopio (Obtenido de Wilmer, 2016). .....	40
Figura 16. Layout de planta y diagrama de recorrido de Papel convertido. El material procesado sigue el recorrido mostrado con la secuencia de números del 1 al 5. .	42
Figura 17. Flujo de manufactura de laminado de papel aluminio integrado por los procesos de impresión, grabado y corte. .....	43
Figura 18. Función de distribución gamma del tiempo de procesamiento para a) impresión, b) grabado y c) corte. ....	53
Figura 19. Esquema de construcción del modelo. ....	54
Figura 20. Modelo de simulación de laminado en Flexsim a) Layout b) Conexiones de los objetos. ....	59

Figura 21. Comparación del porcentaje de tiempos evitables (color rojo) respecto a tiempos inevitables (color celeste) en los procesos de impresión, grabado y corte. ....	68
Figura 22. Distribución de tiempos de las actividades por proceso. ....	68
Figura 23. Variabilidad de los procesos de impresión, grabado y corte de acuerdo a la familia (calibre) en el laminado de papel aluminio. ....	69
Figura 24. Modelo para determinar el tiempo total de procesamiento de laminado de papel aluminio en función de los factores, sus niveles e interacción. Fuente: elaboración propia. ....	72
Figura 25. Comparación de la producción de acuerdo a la secuencia y cantidad de material procesado en 48 h por simulación. ....	75
Figura 26. Gráfica de porcentaje del modelado computacional de la utilización de las máquinas. ....	78

## Introducción

Lo tecnológico y económico es importante en la manufactura, la tecnología de la maquinaria se transforma e impacta en la manufactura para lograrlo se debe incorporar los avances tecnológicos y esto conlleva a inversiones económicas. La importancia de la manufactura consiste en agregar valor al material cambiando la forma o propiedades de la materia prima, o mediante la combinación de materiales distintos también alterados por medio de una o más operaciones (Grover, 2007).

Un proceso de manufactura se integra por la materia prima, así como por las máquinas, equipos, herramientas, energía utilizada, métodos y el trabajo de las personas físico e intelectual. Todo lo que intervenga para la realización del proceso puede afectar o beneficiar el producto. Los procesos de manufactura con el paso del tiempo se han ido innovando, desde hace décadas se han estudiado los procesos para mejorarlos, analizarlos y detectar las variables que alteran el proceso y con ello optimizarlo, mediante la eliminación de tiempos de inactividad y desperdicios como transporte, inventario, movimientos, esperas, sobreproducción, sobre-procesamiento y defectos, también aumentando la utilidad de la maquinaria u operadores.

Para analizar un proceso de manufactura existen dos diferentes maneras la cual es la forma real o experimental y mediante un modelo de simulación. La simulación de procesos es una de las herramientas más innovadoras utilizadas actualmente en ingeniería para el análisis de procesos debido a que es la réplica del comportamiento de un sistema y mediante los movimientos y la interacción de los componentes del sistema, se realiza el análisis y cambios necesarios obtener mejoras en los procesos (Mariño y Alfonso, 2020; Meyers y Stephens, 2006).

El objetivo de la simulación es desarrollar modelos virtuales de ingeniería que permitan principalmente el análisis de datos para el monitoreo de sistemas, rendimiento de las máquinas e inclusive, planificar para la optimización de sus procesos o servicios (Culot, et al.,2020; Shafiq, et al., 2020).



La simulación facilita la toma de decisiones ya que se puede medir un proceso o esquematizar el funcionamiento lógico de una empresa por medio de la creación de un modelo que recoge el sistema de procesos de la planta de producción que se simulará en condiciones reales, para buscar la optimización de la operación, de la producción, del uso de insumos, etc. considerando las restricciones funcionales, técnicas y económicas de los procesos. Además, permite evaluar cualquier alternativa sin agregar ningún sobrecoste extra, pues no requiere efectuar inversiones o cambios.

Adicionalmente, las empresas que incorporan en sus procesos de manufactura las herramientas de la Industria 4.0, incrementan la ventaja competitiva, el desempeño de las empresas, especialmente en el sector industrial, ya que requiere innovaciones y adaptaciones continuas de los sistemas de producción y procesos comerciales para productos y servicios, y esto se debe a la demanda y cambios dinámicos de especificaciones de cualquier producto o servicio (Kumar, et al., 2015; Florescu y Barabas, 2020).

El punto de partida de esta investigación fue un estudio de toma de tiempos y movimientos de un proceso de manufactura del laminado de papel aluminio y la evaluación de las condiciones de alta productividad para desarrollar una propuesta de mejora del proceso basada en el modelado computacional con Flexsim, herramientas estadísticas y manufactura esbelta.

# Capítulo 1

## 1.1 Planteamiento del problema

La manufactura del aluminio es de gran importancia debido su relación con distintos sectores como automotriz, electrónico, construcción, alimentos, farmacéutico, informáticos, telecomunicaciones, por mencionar algunos. Una forma común del uso que tiene el aluminio es el papel aluminio. En la planta de Almexa, que pertenece al Grupo Vasconia S.A.B, se manufactura el papel convertido que consiste en el laminado de papel aluminio de aleaciones suaves al que se procesa o adhiere uno o más materiales para utilizarse en el sector alimenticio y farmacéutico.

La manufactura de papel convertido, o laminado de papel aluminio, consta de diferentes procesos, entre ellos impresión, laqueado, laminado, encerado, grabado y corte. Dichos procesos constan de varias actividades y operaciones y puede tener niveles diferentes de automatización por lo que la intervención de los operadores es importante debido a que puede dar lugar a errores, tiempos de espera, etc. Asimismo, para cumplir las órdenes de producción, en la planta se requieren procesar diferentes tipos de calibres, o grosores, de papel aluminio. Por lo tanto, la diferencia en los tiempos de procesamiento está marcada por los tamaños de calibres y numerosos factores que intervienen en el proceso. Entre estos, se citan los tiempos de duración de cada proceso, la cantidad de material, la secuencia de procesamiento, el calibre que se procesa, el ancho de rollo, etc. esto hace que en el proceso tenga deficiencias y se produzcan defectos en el producto, exceso de tiempos de inactividad en los procesos y otras actividades que no agregan valor al producto o proceso, además que demandan utilización extra de los recursos y maquinaria.

## 1.2 Justificación

La manufactura del aluminio tiene gran impacto en diferentes sectores por su uso comercial. El papel aluminio tiene un uso común en diferentes productos como

alimenticios y farmacéuticos. El proceso de laminado consta de diferentes actividades por proceso y no está estandarizado que reporta diferentes tiempos para la misma actividad lo que genera variabilidad al momento del procesamiento de impresión, grabado y corte.

El tiempo total del proceso de laminado dependen de la interacción de los diferentes factores como el calibre del material, el personal, orden de procesamiento de los calibres, cantidad de material procesada, tiempo de cada proceso, así como defectos que puedan ocurrir durante el procesamiento, esto hace al proceso deficiente.

El desarrollo de un modelo de simulación computacional considerando todos los componentes, especificaciones y restricciones que intervienen en él. En el análisis del modelo computacional se puede detectar el porcentaje de la utilidad de maquinaria, los tiempos de espera de producto o material, la inactividad de la maquinaria y la productividad del proceso de laminado de papel aluminio. Con el análisis se pueden desarrollar diferentes escenarios para una propuesta de mejora al proceso.

### **1.3 Objetivo general**

Desarrollar un modelo computacional del proceso de laminado de papel aluminio en Flexsim, basado en herramientas estadísticas y de manufactura esbelta, que permita aumentar la eficiencia de operación.

### **1.4 Objetivos particulares**

1. Identificar variables críticas del proceso de laminado de papel aluminio.
2. Analizar el proceso de laminado de papel aluminio a partir de la metodología de secuencias de procesamiento y modelo de simulación.
3. Simular por computadora el proceso de laminación de papel aluminio para mejorar la eficiencia de producción.
4. Detectar las áreas de mejora del proceso de laminado de papel aluminio.

## **1.5 Hipótesis**

Mediante un modelo computacional basado en un estudio de tiempos y movimientos es posible fundamentar una propuesta de mejora de la eficiencia de la operación de un proceso de laminación de papel aluminio.

## Capítulo 2 Revisión de literatura

### 2.1 Modelo de sistema

Un modelo de sistema es la representación del sistema real que evoluciona con el tiempo. Existen dos tipos de modelo del sistema, el físico y matemático (Law, 2013). En la Figura 1 se muestran los tipos de modelo de sistema.

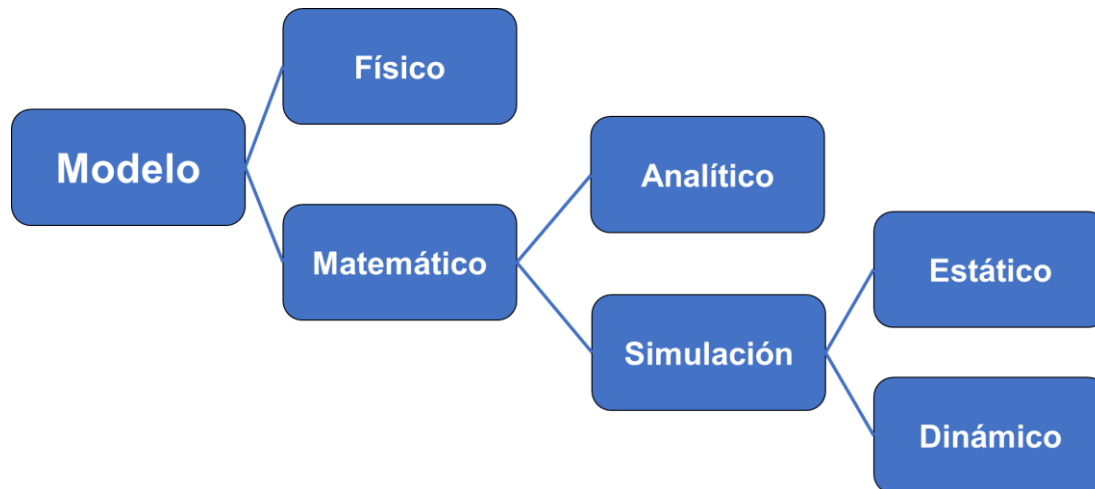


Figura 1. Tipos de modelo de sistema. (Obtenido de Law, 2013).

#### Modelo físico

El modelo físico es la recreación del sistema real, como un prototipo (Law, 2013).

#### Modelo matemático

Es cualquier modelo que usa cálculos para deducir el comportamiento del sistema en términos de relaciones lógicas y cuantitativas que luego se manipulan y cambian para ver cómo reacciona el modelo (Law, 2013).

Dentro del sistema matemático existen dos tipos los cuales son los modelos analíticos y modelos de simulación. Si el modelo es lo suficientemente simple, es posible trabajar con sus relaciones y cantidades para obtener una solución analítica exacta.

## **Modelo analítico**

Se obtiene de una fórmula para tener como resultado una solución. Si se dispone de una solución analítica para un modelo matemático y es computacionalmente eficiente, generalmente es conveniente estudiar el modelo de esta manera en lugar de mediante una simulación (Law, 2013).

## **Modelo de simulación**

Suele utilizarse cuando es muy difícil desarrollar una solución analítica a un problema estudiado, dado a sus soluciones complejas y requieren vastos recursos informáticos (Florescu y Barabas, 2020; Law, 2013).

Los modelos de simulación permiten investigar las variables que intervienen al funcionamiento de los procesos, se analizan sus interacciones y evaluar el impacto general, para mejorar los procesos. Es el único método posible para modelar sistemas complicados como la educación, los negocios, los comercios, las industrias, las ingenierías, las producciones, los transportes y telecomunicaciones (Mariño y Alfonso, 2020; Puche, et al., 2005).

Ventajas de la simulación (Law, 2013):

- Describen con precisión los sistemas más complejos del mundo real con elementos estocásticos.
- Estiman el desempeño de un sistema existente bajo un conjunto de condiciones operativas.
- Comparan los diseños de sistemas alternativos propuestos para ver cuál cumple mejor con un requisito específico.
- Un control sobre las condiciones experimentales.
- Un sistema con un marco de tiempo largo, para saber el funcionamiento detallado de un sistema en tiempo expandido.
- Crean la tendencia de confianza en los resultados de un estudio, justificado por el volumen de números producidos.

Desventajas de la simulación (Law, 203):

- Poseen un nivel inadecuado de detalle del modelo y mal uso de la animación.
- No toman en cuenta las fuentes de aleatoriedad en el sistema real.
- Usan distribuciones arbitrarias como entrada a la simulación.
- Una única réplica de un diseño de sistema en particular y tratar las estadísticas de salida como las "respuestas verdaderas".
- Las medidas de desempeño incorrectas.

### **Modelo de simulación estático**

Es una representación de un sistema en un momento particular, en el que el tiempo simplemente no juega ningún papel (Law, 2013).

### **Modelo de simulación dinámico**

Representa un sistema que evoluciona con el tiempo, como un sistema de transporte. Este permite que los cambios en los atributos del sistema sean expresados como una función del tiempo, bien mediante una solución analítica o por medio de una computación numérica, según sea la complejidad del modelo (Law, 2013).

## **2.2 Simulación computacional**

La simulación computacional es la réplica del comportamiento de un sistema físico o intangible o de una situación complejos, que se simulará en condiciones reales mediante los movimientos y la interacción de los componentes del sistema (Mariño y Alfonzo, 2020; Meyers y Stephens, 2006).

La simulación computacional también permite disminuir los riesgos y optimizar la toma de decisiones empresariales mediante la evaluación de inversiones en tecnología, personal e instalaciones, la selección y organización del equipo y maquinaria, los procedimientos de operación, la asignación y la utilización de recursos, políticas de inventario, la programación de la manufactura, las rutas del flujo del proceso, la identificación de los elementos críticos del proceso, así como



planificar, analizar y mejorar los procesos de la empresa. Evaluar cualquier alternativa mediante simulación no conlleva ningún sobrecoste, al no tener que efectuar las inversiones o cambios necesarios para comprobar su resultado y presenta posibilidades en su aplicación a instalaciones, procesos industriales, logísticos, transporte o de servicios (Puche, et. al, 2005; Meyers y Stephens, 2006; Kalpakjian y Schmid, 2008).

En el escenario actual del mercado, la demanda de los clientes y las especificaciones de cualquier producto cambian rápidamente, por lo que es muy importante que un sistema de fabricación se adapte a estos cambios lo más rápido posible para poder competir en el mercado. Mediante simulación computacional pueden hallarse soluciones para lograr mayores velocidades y mayor flexibilidad para aumentar la productividad de fabricación (Kumar, et al., 2015).

Actualmente las empresas que incorporan en sus procesos de manufactura las herramientas de la Industria 4.0, incrementan la ventaja competitiva, el desempeño de las empresas, especialmente en el sector industrial, ya que requiere innovaciones y adaptaciones continuas a sus sistemas de producción y procesos comerciales que mejore su oferta de productos y servicios. La simulación computacional se posiciona, así en un método de investigación importante y extremadamente eficiente en el contexto actual de digitalización de los procesos productivos y comerciales (Florescu y Barabas, 2020).

La simulación y el modelado son tecnologías de procesamiento de datos que integran la Industria 4.0, respaldan el análisis de datos y brindan información para el control y la toma de decisiones. Su objetivo es el desarrollo de modelos virtuales de ingeniería que permite principalmente el análisis de datos para el monitoreo de sistemas, rendimiento de las máquinas, e inclusive planificar. A las empresas les permite evaluar riesgos, organizar de manera eficiente su proceso de producción, también fabricar productos personalizados dentro de la configuración dada al mismo costo de producción, barreras de implementación, impacto en el rendimiento operativo, así como la optimización de sus procesos o servicios (Culot, et al., 2020; de Paula Ferreira, et al., 2020; Shafiq, et al., 2020).

## **2.2.1 Paquetes de simulación computacional**

La oferta en el mercado para simular procesos de manufactura incluye el software siguiente:

### **2.2.1.1 Arena**

Es un paquete de simulación de uso general comercializado por Rockwell Automation que se usa comúnmente para aplicaciones como fabricación, cadenas de suministro, defensa, atención médica y centros de servicios (Law, 2013).

### **2.2.1.2 AutoMod**

Es un software para la simulación de sistemas de producción y logística. Está diseñado para un análisis detallado de operaciones y flujos. Permite su uso en una amplia gama de áreas de aplicación, desde aeropuertos hasta la industria de semiconductores (AutoMod, s.f.).

### **2.2.1.3 Enterprise Dynamics**

Es un software de simulación para ayudar y apoyar en el modelado y análisis de prácticamente cualquier problema. Brinda la posibilidad de reutilizar modelos, segmentos de modelos y componentes fabricados previamente (Incontrol Simulation Software, s.f.).

### **2.2.1.4 ExtendSim**

Es una familia de cuatro paquetes de simulación de uso general comercializados por Imagine That Inc. Cada producto ExtendSim tiene componentes destinados a segmentos de mercado específicos, pero todos los productos comparten un conjunto básico de características (Law, 2013).

### **2.2.1.5 Plant Simulation**

Tecnomatix Plant Simulation es un software de simulación de plantas que permite la simulación y optimización de procesos y sistemas de producción. Se puede optimizar el flujo de materiales, la utilización de recursos y la logística en todos los

niveles de planificación de la planta, desde las instalaciones de producción global a las plantas locales o las líneas específicas (Siemens PLM, s.f.).

#### **2.2.1.6 Simul8**

Es un software para simular sistemas que involucran el procesamiento de entidades discretas. Su objetivo es planificar, diseñar, optimizar y la reingeniería de sistemas reales de producción, logística o de servicios (Simul8, s.f.).

#### **2.2.1.7 Simio**

Simio es un marco de simulación-modelado basado en objetos inteligentes, que permite construir modelos usando la biblioteca estándar predeterminada (para simulación de eventos discretos) o creando gráficamente objetos completamente nuevos (Law, 2013).

#### **2.2.1.8 FlexSim**

Es un paquete de software poderoso pero fácil de usar para modelado de simulación. Todos los modelos de simulación son creados a escala y presentados usando visuales 3D, de esta manera se vuelve fácil ver y reconocer cuellos de botella en la línea de producción u otras deficiencias dentro del sistema (FlexSim, s.f.).

FlexSim es un software en un ambiente orientado a objetos, para desarrollar, modelar, simular, visualizar, monitorear con el proceso de flujo dinámico. Cuenta con la librería Flexscrip y funciones del compilador C++, la animación en 2D Y 3D. Algunas de las características que definen a Flexsim como una excelente alternativa para el modelado, simulación y visualización de procesos. El modelado en Flexsim permite utilizar objetos desarrollados y parametrizados que representan procesos y colas. Cada objeto tiene una localización en el espacio, velocidad, rotación, así como un comportamiento específico (Casadiego, 2013).

El software permite ejecutar grandes cantidades de eventos en un lapso pequeño de tiempo. La visualización tiene animación de la realidad virtual en la que se enfoca

en visualizar los modelos, así como permite importar un rango amplio de formatos de modelos 3D para uso en el modelado (Casadiego, 2013).

### **Proceso de modelado con Flexsim**

Casadiego (2013) menciona los siguientes conceptos básicos que utiliza el software FlexSim:

El modelo es una representación de un sistema.

El sistema es la integración de cómo actúan e interactúan los entes para un determinado objetivo.

El estado es una condición que tiene un objeto en un determinado instante el cual se determina por las variables o parámetros que se usan en el sistema construido.

Un evento es un suceso que puede cambiar el estado en cualquier momento del sistema y los objetos.

La entidad es como se representa el flujo en el sistema las cuales tienen características que son los atributos. Así las locaciones son los sitios en donde la entidad se detiene para ser transformada o esperar a serlo.

Por otra parte, tenemos los recursos que son los dispositivos en los que se lleva a cabo una operación y pueden desplazarse.

Las variables son condiciones con valores que se pueden modificar o crear. Y, por último, el reloj de simulación el cual es el contador del tiempo de la simulación y sirve para establecer el tiempo que puede durar la simulación.

La metodología de un proyecto de simulación consta de 5 pasos para la simulación los cuales se muestran en la Figura 2.

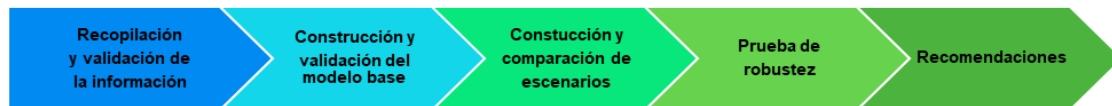


Figura 2. Metodología para un proyecto de simulación. (Obtenido de Casadiego, 2013).

Casadiego (2013) menciona los 5 pasos de la metodología de un proyecto de simulación (Figura 2):

En el primer paso de la metodología consiste en la obtención y validación de la información, para poder construir el modelo virtual que sea lo más fiable al fenómeno real.

Para el segundo paso de la metodología se inicia la construcción y análisis del modelo de simulación el cual representa el proceso real, se debe verificar que los parámetros o características sean de acuerdo al sistema real. La validación del modelo base se realiza mediante la evaluación de los indicadores que se comparan con la información de la operación real.

En el tercer paso de la metodología, se realizan diferentes escenarios del modelo cambiando las variables en cada uno para evaluar de diferentes maneras.

El cuarto paso de la metodología se tiene como objetivo evaluar la robustez de los escenarios ante los cambios que se realizan en las variables, en esta parte se definen las variables para analizar y realizar las corridas de cada escenario y proceder a analizar los resultados.

Por último, el quinto paso de la metodología consiste que con base a los resultados y con el análisis de ellos se realizan comparaciones entre los escenarios y el sistema real para dar una recomendación o propuesta.

### 2.2.1.8.1 Modelado computacional de procesos con Flexsim.

Se seleccionaron 13 trabajos de investigación con el criterio del uso de modelado computacional con el software Flexsim y herramientas Lean en procesos de producción y de logística con propuestas de mejoras a los procesos basados en la simulación, y se reseñan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Antecedentes de modelado computacional.**

<b>Investigación</b>	<b>Conclusiones de la investigación</b>	<b>Referencias</b>
Simulación y optimización mediante Flexsim de diferentes estrategias de distribución para el centro de distribución.	Los autores analizaron y compararon dos diferentes estrategias de selección de un centro de distribución, la estrategia de recolección por lotes y la recolección única, y destacan la relación entre el tiempo de recolección, la cantidad de vehículos, la cantidad de artículos de mercancías y la eficiencia de recolección. El objetivo alcanzado fue reducir el tiempo de selección para mejorar el tiempo de entrega a los clientes. La metodología en que se basaron cuenta con ocho partes, el plan de investigación, recopilación de datos y definición de modelos, aceptación del modelo, simulación, evaluar si es correcto el modelo de simulación, investigación de operaciones de simulación, análisis de resultados y redacción del resultado de operación. Mediante simulación computacional y de acuerdo a un análisis comparativo de las dos estrategias, los autores concluyeron que la eficiencia promedio de la estrategia de selección única es mayor a la de selección por lotes cuando se encuentran en las mismas condiciones de almacenamiento, con esto proporcionaron una mejora para la toma de decisiones de optimizar el proceso del centro de distribución.	(Ma, et al., 2011)

<p>Una optimización basada en Flexsim para el proceso operativo del Centro de distribución de cadena logística frío.</p>	<p>Los autores analizaron el proceso y la eficiencia de equipos y trabajadores del centro de distribución de la cadena logística de frío de frutas y verduras. El objetivo fue aumentar el volumen de negocios de transporte de frutas y verduras y mejorar la eficiencia de máquinas y trabajadores. La metodología en que se basaron consistió en examinar el sistema y determinar los objetivos simulados, recoger datos, construir el modelo, validar el modelo, simulación y ejecución y salidas y análisis de resultados. Mediante simulación computacional se obtuvo que el proceso tiene una tasa baja de utilización de máquinas y trabajadores, así como la tasa de rotación de mercancía y se tiene problemas con retraso y bloqueo lo que genera un cuello de botella. Los autores desarrollaron un modelo de mejora del proceso con ajuste en el número de máquinas y trabajadores, se cambió la estrategia de almacenamiento y se aumentó el área de preparación con esto se obtuvo que la tasa de rotación de mercancía supero el 80% y la tasa de utilización de máquinas y trabajadores incrementaron más del 10%. Los autores concluyeron que con el análisis se detectaron las deficiencias en el proceso y con eso propusieron un modelo de mejora que la simulación sugirió para la optimización del proceso.</p>	<p>(Zhu, et al., 2014)</p>
<p>Reducir el impacto negativo de las fallas de la máquina en el rendimiento de la línea de producción de llenado y embalaje - un estudio simulativo.</p>	<p>Los autores estudiaron la asignación óptima de reservas (búfer) para aumentar la productividad y prevenir fallas en la línea de producción de llenado y envasado. El objetivo fue diseñar y construir el modelo de la producción real, validación del modelo y simulación de diferentes escenarios de asignación de reservas. Mediante simulación computacional se encontró que las capacidades de las máquinas son diferentes y el búfer asegura la continuidad de la producción, se encontraron fallas las cuales provocan paros en las máquinas. Con los resultados de la simulación de los seis escenarios propuestos se encontró que es</p>	<p>(Bartkowiak y Pawlewski, 2016)</p>



	<p>posible reducir el impacto negativo de las fallas de las máquinas y podría incrementarse 15% el rendimiento y aumentar la productividad de la línea de producción. Los autores propusieron el método beneficioso en la toma de decisiones en la empresa para optimizar su productividad.</p>	
<p>Sistemas múltiples dinámicos y simulación de eventos discretos para la evaluación del rendimiento del sistema de fabricación.</p>	<p>Los autores analizaron y compararon el proceso de producción de laminado mediante dos modelos de simulación SDS (simulación de dinámica de sistemas) y DES (simulación de eventos discretos) y combinación de ambos para mejorar la productividad del proceso de películas laminadas impresas. El modelo SDS mostró que existen fluctuaciones de la productividad del trabajo manual en la preparación de materiales. El modelo DES en el primer escenario detectó cuellos de botella generados por tiempos de configuración de máquina, en el segundo escenario eliminaron los tiempos de configuración, pero incrementó la inactividad. Los autores propusieron la combinación de los dos modelos de simulación computacional ya sugieren una mejora en el rendimiento de la línea de producción con la disminución de la tasa de cuello de botella y aumentando la tasa de utilización de las máquinas y se obtuvo una estrategia de asignación de órdenes.</p>	<p>(Antonelli, et al., 2018)</p>
<p>Reingeniería y relocalización del proceso de fabricación a través de un modelo de decisión de simulación y multicriterio.</p>	<p>Los autores desarrollaron un modelo de simulación para aumentar la eficiencia mediante la reingeniería del proceso de producción de manufactura de colchones. La metodología fue un modelo híbrido que integra la reingeniería de procesos con la ayuda de técnicas de simulación y con el modelo de toma de decisiones y se basaron en la metodología que consta de cuatro pasos, descripción del proceso, mejor elección de ubicación, reingeniería de procesos y la evaluación económica. Mediante la simulación computacional analizaron la mejora de la productividad en términos de costos, mano de obra y eficiencia. Evaluaron la mejor ubicación donde deslocalizar la producción, considerando los</p>	<p>(Zomparelli, et al., 2018)</p>

	<p>critérios y los subcriterios que influyen en la producción. Los autores propusieron el modelo híbrido para la implementación en una empresa manufacturera italiana y el resultado fue que incrementó en la eficiencia del 25%, reduciendo la mano de obra y los costos operativos.</p>	
<p>Mejora de la producción en la línea de subensamblaje de mediana escala Industria que utiliza diferentes herramientas Lean y software de simulación Flexsim.</p>	<p>Los autores mejoraron la productividad del proceso de ensamblaje del moldeo de cajas mediante VSM y modelo de simulación y herramientas <i>Lean</i>. El problema fue la entrada lenta de materia prima y mayor tiempo de ciclo en el proceso de moldeo. La metodología que siguieron consta de los siguientes pasos: recopilación de datos, VSM del estado actual, implementación de herramientas <i>lean</i>, VSM del estado futuro y Resultados. Mediante la simulación computacional y VSM, los autores analizaron el estado del proceso y propusieron un nuevo método, con la implementación de herramientas <i>Lean</i>. El resultado en planta fue una mejora del 5% la productividad con la eliminación de tiempo de inactividad y actividades que no agregan valor y se disminuyó el tiempo del proceso.</p>	<p>(Rao, et al., 2019)</p>
<p>Optimización estructural del proceso productivo en plantas de acero basadas en simulación Flexsim.</p>	<p>Los autores elaboraron el método de optimización estructural y estudiaron el modelado del proceso de fabricación de acero y establecieron cuatro modelos de simulación diferentes para el estudio del flujo de material del modelo bajo diferentes condiciones de producción. El problema fue que se requirió completar una producción normal considerando todos los procedimientos. Mediante la simulación computacional los autores analizaron tres procedimientos el único, interprocedimiento y todo el proceso, bajo diferentes factores como el tiempo de procesamiento y la lógica de operación. Los autores concluyeron que se complementan el método de optimización estructural y el modelo de simulación para la optimización del proceso, la</p>	<p>(Wu, et al., 2019)</p>

	simulación sugirió una mejora del 10% respecto a la producción real.	
Investigación sobre la mejora del equilibrio de la línea de montaje de refrigerador doméstico.	Los autores optimizaron la tasa de equilibrio del proceso de la línea de montaje de refrigeradores. El objetivo fue analizar el balance de la tasa de equilibrio y deducir si la distribución de contenido era adecuada entre los diferentes procesos. Mediante la simulación computacional se demostró que la tasa de distribución de contenido entre estaciones es desigual y que existe un cuello de botella. Con el análisis del proceso decidieron implementar herramientas <i>Lean</i> ECRS como parte de las mejoras y desarrollar un modelo para optimizar el proceso. Los autores propusieron un modelo de mejora y con la implementación tuvo como resultado reducir el tiempo del cuello de botella, tiempo de ciclo, mejoró el equilibrio de la carga de trabajo y como resultado aumentó la eficiencia de la línea de producción.	(Gao y Ma, 2020)
Simulación de línea de producción en tornillo de banco con la aplicación de flexsim.	Los autores estudiaron las condiciones del proceso de producción del tornillo de banco, el rendimiento de las máquinas y la afectación que tiene en el tiempo de espera. El objetivo fue el cumplimiento de las metas de producción y analizar si era efectivo el tiempo de la prensa en el proceso de producción del tornillo de banco. La metodología en la que se basaron consta de los siguientes pasos: pruebas de distribución, modelo de simulación y resultados. El resultado que sugirió la simulación computacional es que el tiempo necesario para realizar el proceso de prensa es de 2.09 h sin largas colas ni apilamientos.	(Ishak, et al., 2020)
Optimización del proceso de ensamblaje del gabinete de distribución basado en tecnología de mapeo de flujo de valor.	Los autores optimizaron el proceso de ensamblaje mediante la combinación del análisis de tecnología de mapeo de flujo de valor y la tecnología de simulación Flexsim. El objetivo fue abordar los problemas del exceso de trabajo en el proceso, la producción desequilibrada y los métodos de producción aptos para el proceso de ensamble. Mediante la simulación computacional y el mapeo	(Feng y Wang, 2021)

	de flujo de valor se detectaron las deficiencias del proceso. Los autores diseñaron un modelo para la mejora en el proceso que sugirió la simulación en el que se obtuvo el equilibrio de producción, el ciclo de entrega y el número de productos en la línea de montaje, disminución de la fatiga a los trabajadores y se verificó con el mapeo de flujo de valor para implementar la producción ajustada en planta.	
Gestión de personal en la línea de producción mediante el entorno de simulación FlexSim.	Los autores optimizaron un proceso de producción mediante la metodología <i>Lean manufacturing</i> y Flexsim. El objetivo fue lograr la optimización del proceso de producción. El problema presentado es la asignación de personal a la línea de producción. Mediante la simulación computacional se detectó el problema de la cantidad de personal, basándose en el análisis de la simulación se desarrollaron ocho escenarios. Con el análisis de los escenarios se demostró que es mayor el tiempo que se utiliza en el transporte afectando al tiempo de procesamiento. Los autores seleccionaron el mejor escenario que sugirió la simulación ya que se mejoró el rendimiento del sistema y la disminución del tiempo de ciclo, con una eficiente asignación de los operadores.	(Krynke, 2021)
Evaluación y Modelado del Desempeño de Terminales Portuarias.	Los autores optimizaron el desempeño de la cadena portuaria de la terminal Le Havre mediante simulación en Flexsim. El objetivo fue lograr un proceso operativo de terminal multimodal eficiente en términos de varios indicadores de desempeño: tasa de ocupación de recursos, tasa de servicio de entrega de contenedores a tiempo y número de movimientos ineficientes. Mediante la simulación computacional se estudió los indicadores de desempeño y un modelo de optimización. El resultado de la implementación mejoró la eficiencia de transferencia de contenedores basados en el análisis de los parámetros de desempeño logrando una mayor tasa de servicio, reducción de demoras y el costo.	(Mouafo y Wang, 2022)

Investigación en Simulación y Optimización de Línea de Producción Basada en Flexsim.	Los autores optimizaron la línea de ensamblaje de piezas de espejo en un organizador cosmético. El objetivo fue analizar el proceso y los elementos de trabajo de la línea de producción para la eficiencia de la producción. El problema presentado fue la baja tasa de equilibrio en la línea de producción y la gran brecha de carga entre los procesos. Mediante la simulación computacional se estudió la utilización del equipo, el tiempo de proceso de cada producto y tasa de cuellos de botella. Con lo que sugirió la simulación computacional y análisis con el método 5W1H, y la herramienta <i>Lean</i> ECRS se implementó un modelo en planta el cual mejoró un 15% la eficiencia de la línea de ensamblaje con el balanceo de línea y el análisis de utilización del equipo, tiempo en proceso, tiempo de inactividad y tiempo de bloqueo de un cuello de botella.	(Liu y Lin, 2022)
--	--	-------------------

Con base a los antecedentes del modelado computacional con el software Flexsim mencionados en el Cuadro 1, concluí que la simulación computacional se puede utilizar para analizar diferentes tipos de procesos desde procesos de manufactura hasta cadenas de suministro, el modelado computacional de los diferentes procesos es una base importante para poder ser analizados con sus restricciones y lo más cercano a la realidad. En la simulación se analizan variables que intervengan en el proceso como la utilidad de maquinaria o equipo o personal, tiempos de inactividad, tiempos de espera, productividad, tiempo de procesamiento, costos, etc. Con el análisis de la simulación se ve la factibilidad del modelo o los diferentes escenarios y demostrar que se puede implementar en la vida real y así buscar una optimización con la mejor alternativa de mejora a los procesos, algunas investigaciones se apoyan de otras herramientas como *Lean* que lo mencionaron Gao y Ma, (2020); Krynce, (2021); Lui y Lin (2022), VSM como mencionó Rao, et al., (2019) e inclusive, otros softwares de simulación como mencionó Antonelli, et al. (2018), para una mejor propuesta de mejora, que en algunos casos se implementa y se llega a los resultados sugeridos por el software.

### **2.3 Método de la máxima verosimilitud (MV)**

El método MV, busca estimar los parámetros que maximicen la probabilidad de observar las funciones dependientes de variables independientes, para lo cual es necesario maximizar la función. La función de verosimilitud indica qué tan probable es reproducir la muestra observada en función de los posibles valores de los parámetros, es decir, el fin es maximizar la función de verosimilitud con base en los parámetros que tienen más probabilidades de producir los datos observados (Gómez, 2020).

Las estimaciones MV se utilizan para saber el modelo de distribución específico que sigue los datos para modelarlos, por ejemplo, los tiempos de procesos, máquina, actividades u operaciones de un proceso de manufactura,

### **2.4 Procesos de manufactura**

La manufactura es un sistema complejo que consta de diversos elementos físicos y humanos, los cuales pueden ser complejos de predecir y controlar. Un proceso de manufactura consiste en convertir materias primas en productos mediante la transformación de los materiales el cual se le agrega valor cambiando su forma o propiedades, o mediante la combinación de distintos materiales también alterados, por medio de uno o más operaciones de procesamiento o ensamblado. El diseño de instalaciones de manufactura se realiza con el fin de promover el uso eficiente de sus recursos, como personal, equipo, materiales y energía (Grover, 2007; Kalpakjian y Schmid, 2008; Meyers y Stephens, 2006).

Los procesos de manufactura se dividen en dos tipos básicos (Grover, 2007):

- 1) Las operaciones del proceso: Es la transformación de un material de trabajo cambiando la geometría, las propiedades o la apariencia que pasa de un estado de acabado a otro más avanzado para tener el producto final. Por ejemplo, maquinado, fundición, etc.
- 2) Las operaciones del ensamblado: Es la unión dos o más componentes a fin de crear una entidad nueva. Por ejemplo, soldadura, empalmes, etc.

### 2.4.1 Distribución de planta

La distribución o disposición del equipo (instalaciones, máquinas, etc.) y áreas de trabajo, es un problema ineludible para todas las plantas industriales. La distribución en planta consiste en la ordenación física de los elementos industriales que son parte del proceso productivo de la planta. Esta ordenación, incluye los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento, trabajadores indirectos y todas las otras actividades o servicios, como el equipo de trabajo y el personal de la planta (Muther, 1970; De la Fuente y Fernández, 2005). Los principios básicos de distribución de planta son antecedentes de la metodología planificación sistemática de diseño (SLP).

El método SLP es estrategia de organización que permite a las personas identificar, visualizar y calificar las diversas actividades, relaciones y alternativas involucradas en un proyecto de distribución en función de los datos de entrada, el flujo de materiales, la actividad de relaciones y diagramas de relaciones (Radhwan, et al., 2019).

#### 2.4.1.1 Principios básicos de la distribución de planta

Los principios de la distribución de planta son para mejorar el área de trabajo, mediante la estandarización de las actividades y tiempos, el flujo del proceso y organización con el personal. Muther (1970) describe los seis principios básicos de la distribución de planta, citados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción de los principios básicos de la distribución de planta.

Principios	Descripción
Integración del conjunto	Es la integración entre el personal, materia prima, maquinaria y equipo, instalaciones, método o cualquier factor que intervenga como parte del proceso.



Mínima distancia recorrida	En la distribución las distancias recorridas deben ser las más cortas entre operaciones en el proceso para reducir el costo de producción.
Circulación o flujo de materiales	La estandarización de las actividades, orden o secuencia durante el procesamiento de materiales en las operaciones del proceso en las áreas de trabajo.
Espacio cúbico	El uso eficiente del espacio en tres dimensiones de las áreas de trabajo para mejorar el proceso.
Satisfacción y la seguridad	Las mejores condiciones en el área de trabajo.
Flexibilidad	Ajustes, modificaciones o reordenamiento de las áreas de trabajo para mejorar el proceso.

## 2.4.2 Manufactura esbelta

*Lean Manufacturing* es una filosofía de trabajo, desarrollado por Taiichi Ohno quién creó el Sistema de Producción de Toyota (TPS) un conjunto de metodologías y herramientas, basada en las personas. Define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción enfocándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”. Son aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios. Actualmente el uso de la manufactura esbelta es efectiva en la mejora de los procesos en la industria (Hernández y Vizán, 2013; Madariaga, 2013).

### 2.4.2.1 Los 7 desperdicios en la manufactura esbelta

Esta filosofía propone analizar y medir la eficiencia y productividad de todos los procesos en términos de “valor añadido” y “desperdicio”. Para ello Taiichi Ohno propone un *Gemba* una herramienta donde está implícito los 7 desperdicios, basada en la observar directamente los hechos para resolver el problema o mejorar un proceso (Hernández y Vizán, 2013; Madariaga, 2013).

Los siete desperdicios es una herramienta que ayuda a mejorar la productividad del proceso con la eliminación de actividades que no aportan valor al producto y proceso, así como a disminuir demoras, a mejorar la utilidad de la maquinaria y reducir tiempos inactivos de maquina y tiempos de producto en espera.

En el Cuadro 3 se muestra la descripción de los 7 desperdicios (Hernández y Vizán, 2013; Madariaga, 2013):

Cuadro 3. Descripción de los 7 desperdicios.

<b>Desperdicio</b>	<b>Descripción</b>
Inventario	El desperdicio por almacenamiento es el resultado de tener una mayor cantidad de existencias de las necesarias en materias primas, componentes, producto en curso (WIP, Work In Process) y producto terminado, para satisfacer las necesidades más inmediatas.
Sobreproducción	Este tipo de desperdicios radica en el exceso de capacidad de las maquinas como consecuencia genera exceso de inventario, movimientos innecesarios de materiales y operarios, oculta los defectos.
Espera	Es el tiempo perdido como resultado de una secuencia de trabajo o un proceso ineficiente.
Transporte	Es el resultado de un movimiento o manipulación de material innecesario. Las máquinas y las líneas de producción deberían estar lo más cerca posible y los materiales deberían fluir directamente desde una estación de trabajo a la siguiente sin esperar en colas de inventario.
Defectos	Representan un desperdicio de material y esfuerzo humano como consecuencia de no haber ejecutado

	correctamente el proceso productivo la primera vez, lugar a selecciones, reprocesos y chatarra.
Sobre-procesamiento	Son procesos que transforman propiedades del producto que el cliente no aprecia. Son procesos innecesarios, que no añaden valor. Los procesos productivos deberían estar diseñados a prueba de errores, para conseguir productos acabados con la calidad exigida, eliminando así cualquier necesidad de retrabajo o de inspecciones adicionales.
Movimientos	Son movimientos del operario que no modifican la forma o las propiedades del producto. Los procesos mal diseñados pueden provocar que unos operarios realicen más movimientos de los necesarios en el proceso.

#### 2.4.2.2 Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo del proceso tiene mayor detalle que un diagrama del proceso operativo. Se emplea con los símbolos de la ASME el cual es más factible identificar el tipo de actividad. En este tipo de diagrama es posible agregar anotaciones a un lado de la descripción de la actividad como: distancias, retrasos y almacenamientos temporales. Las actividades están numeradas en orden secuencial por lo que es más fácil identificar las actividades (Niebel y Andris, 2009; Baca, et al., 2014)

Según la Asociación de Ingenieros Mecánicos (ASME) los diagramas de flujo de procesos, hacen uso de los símbolos de operación, inspección, transporte, retraso y almacenamiento. En la primera columna de la Figura 3 se encuentran los cinco símbolos que constituyen el conjunto estándar de símbolos que se utilizan en los diagramas de flujo de procesos (operación, transporte, almacenamiento, retraso e inspección).





















<b>Operación</b>  Un círculo grande indica una operación, como	 Clavar	 Mezclar	 Taladrar orificio
<b>Transporte</b>  Una flecha indica transporte, como	 Mover material mediante un carro	 Mover material mediante una banda transportadora	 Mover material transportándolo (mediante un mensajero)
<b>Almacenamiento</b>  Un triángulo representa almacenamiento, como	 Materia prima en algún almacenamiento masivo	 Producto terminado apilado sobre tarimas	 Archiveros para proteger documentación
<b>Retrasos</b>  Una letra D mayúscula indica un retraso, como	 Esperar un elevador	 Material en un camión o sobre el piso en una tarima esperando a ser procesado	 Documentos en espera a ser archivados
<b>Inspección</b>  Un cuadrado indica inspección, como	 Examinar material para ver si está bien en cuanto a cantidad y calidad	 Leer el medidor de vapor en el quemador	 Analizar las formas impresas para obtener información

Figura 3. Símbolos usados en los diagramas de proceso de acuerdo con el estándar ASME (obtenido de Niebel y Andris, 2009).

Se utilizan dos tipos de diagramas para saber las actividades que se realizan en el proceso, secuencia, tiempo, distancia, clasificación por tipo de evento. El diagrama de flujo de producto proporciona los detalles de los eventos que involucran un producto o un material, mientras que el diagrama de flujo operativo presenta detalladamente cómo lleva a cabo una persona una secuencia de operaciones, los diagramas se muestran en las Figura 4 y Figura 5.

Ubicación: Dorben Ad Agency		Resumen			
Actividad: Preparación de anuncios por correo directo		Evento	Presente	Propuesto	Ahorros
Fecha 1-26-98		Operación	4		
Operador: J.S.	Analista: A. F.	Transporte	4		
Encierre en un círculo el método y tipo apropiados Método: <u>Presente</u> Propuesto Tipo: <u>Trabajador</u> Material Máquina		Retrasos	4		
		Inspección	0		
		Almacenamiento	2		
Comentarios:		Tiempo (min)			
		Distancia (pies)	340		
		Costo			
Descripción de los eventos		Símbolo	Tiempo (en minutos)	Distancia (en pies)	Recomendaciones al método
Cuarto con la existencia de materiales	○ ◇ D □ ●				
Hacia el cuarto de recopilación	○ ● D □ ▽		100		
Ordenar los estantes por tipo	○ ◇ ● □ ▽				
Ordenar cuatro hojas	● ◇ D □ ▽				
Apilar	○ ◇ ● □ ▽				
Hacia el cuarto de doblado	○ ● D □ ▽		20		
Empujar, doblar, rayar	● ◇ D □ ▽				
Apilar	○ ◇ ● □ ▽				
Colocar la engrapadora	○ ● D □ ▽		20		

Figura 4. Diagrama de flujo de proceso de material o producto (obtenido de Niebel y Andris, 2009).

Ubicación: Dorben Co.		Resumen					
Actividad: Inspección en campo de LUX		Evento	Presente	Propuesto	Ahorros		
Fecha: 4-17-97		Operación	7				
Operador: T. Smith      Analista: R. Ruhf		Transporte	6				
<i>Encierre en un círculo el método y tipo apropiados</i> <b>Método:</b> <u>Presente</u> Propuesto <b>Tipo:</b> <u>Trabajador</u> Material Máquina		Retrasos	2				
		Inspección	6				
		Almacenamiento	0				
Comentarios		Tiempo (min)	32.60				
		Distancia (pies)	375				
		Costo					
Descripción de los eventos		Símbolo		Tiempo (en minutos)	Distancia (en pies)	Recomendaciones al método	
Bajarse del vehículo, caminar hacia la puerta frontal, tocar el timbre.		○	▶	D □ ▽	1.00	75	Llamar a casa con antelación para reducir la espera.
Esperar, entrar a la casa.		○	▶	D □ ▽			
Caminar hacia el depósito en el campo.		○	▶	D □ ▽	.25	25	
Desconectar el depósito de la unidad.		◁	▷	D □ ▽	.35		
Inspeccionar si hay abolladuras, rupturas en el envoltorio, vidrio roto o hardware faltante.		○	▷	D □ ▽	1.25		Esto puede hacerse mientras se camina de regreso al vehículo.
Limpiar la unidad con un limpiador y desinfectante aprobado.		◁	▷	D □ ▽	2.25		Esto puede hacerse de una manera más eficiente en el vehículo.
Regresar al vehículo con el tanque vacío.		○	▶	D □ ▽	1.00	75	
Quitar el seguro del vehículo, colocar el tanque vacío en su base y conectar el hardware.		○	▷	D □ ▽	1.75		
Abrir la válvula; comenzar a llenar.		○	▷	D □ ▽	.25		

Figura 5. Diagrama de flujo de proceso de trabajador (obtenido de Niebel y Andris, 2009).

Niebel y Andris, (2009); Baca, et al., (2014) explican el llenado, uso, e interpretación de los diagramas de flujo.

## 2.5 Aluminio

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre (aproximadamente 8%), se encuentra extensamente distribuido y es el tercer elemento más abundante que se encuentra en la tierra. El aluminio es un elemento muy reactivo y nunca se encuentra en forma de metal libre en la naturaleza. Se encuentra combinado con otros elementos, generalmente oxígeno, sílice y flúor. Estos compuestos químicos se encuentran comúnmente en el suelo, en minerales (por ejemplo, zafiros, rubíes, turquesas), en rocas (especialmente rocas ígneas) y en arcillas (ATSDR, 2008; Kerry, 2012).

El inicio del proceso de manufactura de aluminio es en la fundición donde en un horno se funde el aluminio de acuerdo a la aleación que se requiera. Los principales productos de una fundición de aluminio son palanquillas, lingotes, planchas, varillas y aluminio líquido (Casting, s.f.). La fundición de aluminio se refiere a la producción de productos moldeados que requieren una fabricación adicional (la salida de aluminio sólido de una fundición), así como productos de forma casi neta, que requieren un procesamiento posterior limitado. Algunas propiedades que tiene el aluminio son la estabilidad a la oxidación, barrera a la luz, no absorbente, formabilidad, conductividad y reciclabilidad. El aluminio se usa para fabricar latas de bebidas, ollas y sartenes, aviones, metálico el exterior de murallas y techos de viviendas y papel de aluminio (ATSDR, 2008; Kerry, 2012).

El *foil* o papel de aluminio es una lámina de aluminio sólido, laminado hasta un espesor muy delgado, que va de 0.006 mm (6  $\mu\text{m}$ ) como límite inferior y 0.2 mm (200  $\mu\text{m}$ ) como límite superior, según lo establece la norma ISO 7271:2011.

El papel aluminio contiene aproximadamente 92% de pureza por lo regular se utilizan aleaciones de las series 1000 (99% o más de aluminio en peso), 3000 (el principal metal en la aleación es el manganeso) y 8000 (incluye metales tales como níquel y estaño). Estas aleaciones no tienen un impacto en costos, pero sí un impacto significativo en la dureza y otras propiedades mecánicas del producto (SEGOB, Diario Oficial de la Federación, 2019).

El espesor del papel aluminio depende del uso que tenga ya que puede tener diferentes aleaciones o productos y ese el caso de estos cinco tipos de papel aluminio (Henry Metal Material, s.f.):

- Papel aluminio 3102 con un espesor de 220  $\mu\text{m}$  a 95  $\mu\text{m}$  y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y otras aplicaciones de transferencia de calor.
- Papel aluminio 8011 es ampliamente utilizado en envases farmacéuticos con espesor de 6  $\mu\text{m}$  a 80  $\mu\text{m}$ , tapa de PP con un espesor de 9  $\mu\text{m}$  a 11.5  $\mu\text{m}$ , contenedor de alimentos con un espesor de 6  $\mu\text{m}$  a 6.6  $\mu\text{m}$ , envoltura de aislamiento con un espesor de 20  $\mu\text{m}$  a 60  $\mu\text{m}$ , envoltura de cable con un espesor de 6.5  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ , papel de aluminio para uso doméstico con un espesor de 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ .
- El papel aluminio del hogar uso doméstico con una barrera total a la luz, vapor, aromas y líquidos con un espesor de 9  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$ .
- Papel aluminio de conformación en frío se combina para brindar formatos de empaque seguros, versátiles y fáciles de usar para tabletas, cremas, líquidos y polvos farmacéuticos, con un espesor de 40  $\mu\text{m}$  a 70  $\mu\text{m}$ .
- Papel aluminio de sellado térmico es una de las formas comunes de proporcionar evidencia de manipulación indebida, prevención de fugas, retención de frescura, reflexión del calor y más, con un espesor de 200  $\mu\text{m}$  a 80  $\mu\text{m}$ .

La importancia del acero y del aluminio radica en que ambos metales constituyen insumos importantes para la fabricación de maquinaria y equipo de diversa índole y son ampliamente utilizados por la industria armamentista estadounidense. El comercio que domina en América del Norte es el de vehículos, maquinaria y electrónica, industrias que utilizan ampliamente el acero y el aluminio en sus procesos productivos. En México, la producción de aluminio y otros metales continúa siendo primordial en la cadena productiva, en el desarrollo económico y en su balanza comercial. México es un importante proveedor de este metal a países importadores como Estados Unidos de Norteamérica en diversos sectores,



particularmente, en el sector automotriz y el de maquinaria. (Jaime y Cuevas, 2020; CANACERO, s.f.).

En México en el 2021, las entidades federativas con mayores ventas internacionales en Aluminio y sus Manufacturas fueron Nuevo León, Baja California, Estado de México, Chihuahua y Ciudad de México. Y los países con más compras internacionales a México fueron Estados Unidos Corea del Sur, Brasil, Puerto Rico y Canadá (Data México, s.f.). Las entidades federativas con mayores ventas internacionales en Artículos de Aluminio fueron Chihuahua, Baja California, Nuevo León, Tamaulipas y Estado de México. Y los países con más compras internacionales a México fueron Estados Unidos, Canadá, Colombia, Guatemala y Perú. En lo que va del 2022, las entidades federativas con mayores ventas internacionales son Nuevo León, Baja California y Ciudad de México (Data México, s.f.).

México no es productor primario de aluminio, pero esta industria representa el 3% del PIB, durante 2020, México transformaba ya 2.5 millones de toneladas en diferentes elementos metálicos esto se debe a que se utiliza como insumo primordial en varios sectores, como el sector automotriz, electrónica y aeronáutica. Además de equipos médicos y construcción. La verdadera oportunidad del aluminio en México se presenta en que seamos exportadores de aluminio secundario y de productos fabricados con este material. Puesto que cada vez más se le da más importancia a la economía circular. El costo del aluminio actualmente es de 2,124.00 USD por tonelada (Canalum, s.f.; Rodríguez, 2022).

La actividad de Industria básica del aluminio en México, con el 33% de los ingresos anuales estimados. Destacan entre los primeros lugares CUPRUM S.A de C.V y ALMEXA ALUMINIO S.A de C.V.

## **2.6 Laminado de aluminio**

Esta parte del proceso de la manufactura de aluminio se conoce como laminación y esta se realiza antes del acabado o laminado de papel aluminio el producto que se

recibe con placas de aluminio que se adelgazan y el espesor de esta lamina es de 7 mm a 2 mm.

La laminación del papel de aluminio se desarrolla en procesos básicos (Kerry, 2012):

- El método tradicional de laminado de planchones, lingotes o placas gruesas en una lámina de aluminio de calibre estrecho es utilizando trenes de laminación pesados.
- Por colada continua o colada en caliente (similar a un proceso de extrusión) que tiene lugar inmediatamente después de que el aluminio ha salido del horno.

La laminación se aplica para adelgazar y estirar el metal en caliente o en frío, pasándolo entre rodillos que giran en sentido opuesto como se muestra en la Figura 6, cada vez que se pase el metal da como resultado una reducción en el espesor. Los rodillos de laminación se montan en bastidores llamados castillos o a un tren de laminación (Scharer, 2003).

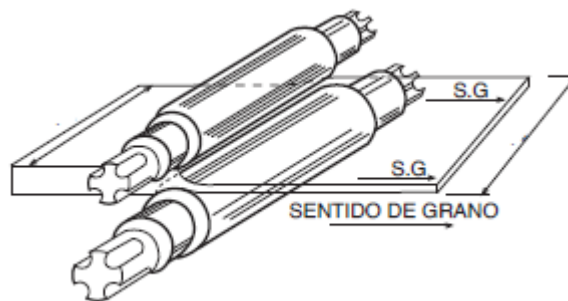


Figura 6. Proceso de laminado (obtenido de Scharer, 2013).

### 2.6.1 Papel convertido

El proceso de papel convertido se le conoce como proceso de acabado en la manufactura del laminado de aluminio esto se debe al ser la última parte del proceso donde se produce el producto final en rollos para los clientes, esta parte es donde se determina el espesor de la lámina y los recubrimientos que debe llevar según el tipo de papel aluminio y el uso que tendrá.

El papel convertido es el papel aluminio de aleaciones suaves consiste en la formación de una película al cual se agrega uno o más de diferentes materiales compuestos impermeables como revestimientos, tintas, papel, cera, laca, poliestireno, ceras, cartón, adhesivos, entre otros. Una característica muy útil del papel de aluminio es que tiene la capacidad de aceptar fácilmente muchos tipos diferentes de materiales y es ideal para la fabricación de envases y aplicaciones generales de aislamiento y/o de barrera (Alliance Packaging Group, s.f; Mujica, 1999; Kerry, 2012).

El proceso de papel convertido es la laminación de papel aluminio en diferentes calibres dependiendo la familia del producto final y se realizan los procesos de impresión, laqueado, laminación, encerado, grabado y corte como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Secuencia del proceso de laminado de papel aluminio (Obtenido de Mujica, 1999).

Algunos de los productos de las familias procesadas son la envoltura de chocolates, papel para los cigarrillos, tapas para bebidas, tapas termosellantes de alimentos, blister, entre otros se muestran en la Figura 8 (Maldonado, 2008).

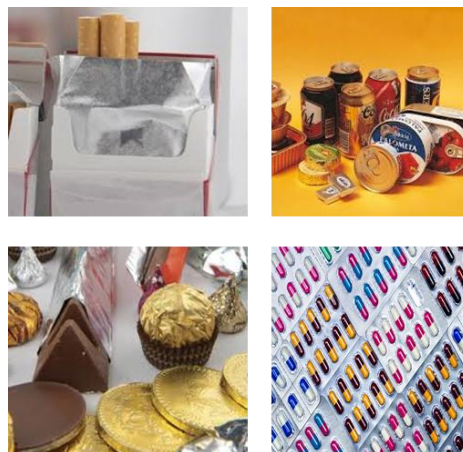


Figura 8. Productos que se obtienen del laminado de papel aluminio (Obtenido de Grupo Vasconia, 2021).

En el proceso de laminación a medida que se reduce el grosor de la lámina, aumenta la probabilidad de que se formen agujeros pequeños y se rompan las tiras (Keles y Dunder, 2007). Algunas aleaciones de aluminio poseen una baja tolerancia al daño y propiedades de fatiga (Vieira, et al., 2022). Estudios han demostrado que cuanto menor es la relación entre el espesor de la lámina y el tamaño de grano de la dirección transversal (T/D) mayor es la ductilidad de la lámina y formabilidad (Chen, et al., 2020).

#### **2.6.1.1 Proceso de impresión**

El papel aluminio se desenrolla en un desbobinador para luego pasar por un rodillo que realiza el grabado de una forma o figura para aplicar una tinta. La primera aplicación de tinta es de acuerdo al rotograbado y tinta de la máquina, posteriormente se pasa al área de secado dentro de la misma estación, y después a la aplicación del color según el tipo de familia o producto, y por último se enrolla en el embobinador.

#### **2.6.1.2 Proceso de laminación**

Después de la impresión, el papel aluminio es desenrollado y luego pasa por una aplicación de rotograbado de laca y secado. Al papel ya seco se aplica el adhesivo y el material secundario a utilizar para la laminación que puede ser papel bond, polytileno, terfane, cartón, papel tissue, entre otros, estos se aplican con rodillos. Luego se pasa a la zona de secado que es parte de la máquina donde se eliminan arrugas y se pueda secar el adhesivo y finalmente para enrollarse en el embobinador.

#### **2.6.1.3 Proceso de laqueado**

Para el laqueado, el papel aluminio ya con la impresión se desenrolla en el desbobinador para pasar por un rodillo de rotograbado el cual aplica una capa uniforme de laca, después pasa a la zona de secado para finalmente enrollarse en el embobinador y continuar el proceso.

El laqueado se puede realizar por una o dos caras del papel, por lo general cuando es por una cara es por el lado brillante.

#### **2.6.1.4 Proceso de encerado**

El papel aluminio ya laqueado se desenrolla en el desbobinador, luego se sumerge en la cera la cual es termosellante, el cual actúa como un adhesivo entre el aluminio y el material del empaque. Ya aplicada la cera se solidifica a temperatura ambiente y se vuelve a enrollar el material en el embobinador.

#### **2.6.1.5 Proceso de grabado**

Este proceso solo se aplica para los productos que llevan algún relieve. Se coloca el herramental del relieve o figura dependiendo el producto, después del ajuste se coloca el rollo del papel para desenrollarse en el desbobinador y luego pasa por un rodillo grabador el cual tiene la figura o logotipo. Al final se vuelve a enrollar el papel en el embobinador.

#### **2.6.1.6 Proceso de corte**

El papel aluminio se desenrolla en el desbobinador para pasar por la máquina hendedora en la cual las cuchillas proceden al corte en la distancia indicada del ancho y largo del rollo de acuerdo a la familia del producto, por último, se vuelve a enrollar en el embobinador.

### **2.6.2 Defectos comunes generados en el proceso de laminado**

Los defectos de laminación son los más difíciles y costosos de corregir en la producción de materiales para empaques flexibles. Existe una alta correlación entre la cantidad de adhesivo, la interfase tinta/adhesivo, los niveles de tensión y la calidad de las materias primas utilizadas en las capas, para que las variables de calidad como planitud, apariencia del diseño y adherencia entre capas se mantengan dentro de los niveles especificados (Wilmer, 2018). Detectar estos defectos en el proceso de laminación es de gran importancia conocer en qué

momento ocurren estos defectos, los tipos de papel aluminio que lo presentan, la frecuencia en que suceden ya que esto afecta al tiempo y costos de procesamiento.

Ocho defectos frecuentes que se pueden producir en la laminación, citados a continuación (Wilmer, 2018).

### **2.6.2.1 Túneles en dirección transversal (TD)**

Ocurre cuando en pequeñas áreas a lo ancho del rollo en dirección transversal o diagonal. A la falta de tensión constante a lo ancho del material, el túnel aparece diagonal; la falta de tensión puede ser ocasionada por áreas destensionadas (baggy webs) de la película, o por desalineamiento de los rodillos.

### **2.6.2.2 Arrugadas diagonales**

Las arrugas diagonales están orientadas en ángulo con respecto a la dirección de la máquina, entre mayor el ángulo mayor el esfuerzo cortante, y todas las arrugas señalan hacia el mismo punto y espaciadas por igual, y se mueven hacia los lados. La causa principal está en que algún rodillo, o el material, están torcidos o desalineados en el plano paralelo.

### **2.6.2.3 Rizado, canales (Bucking)**

Es un defecto interno del rollo, son capas específicas del material que están comprimidas y forman un patrón de onda, causado por un embobinado flojo, que luego es presionado con mayor tensión por las capas de arriba, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Rizado, canales (Bucking) (Obtenido de Wilmer, 2016).

#### 2.6.2.4 Curling

Es la pérdida de la planitud, el material tiende a irse hacia arriba o hacia abajo. En los bilaminados es típicamente un tema de estiramiento o elongación de una de las capas, se puede observar en la Figura 10.

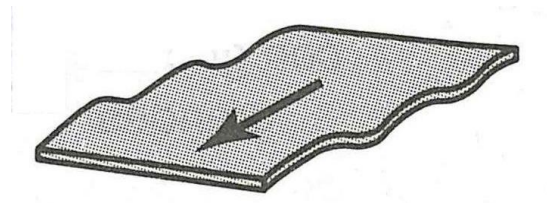


Figura 10. Curling (Obtenido de BirthLH, s.f.).

#### 2.6.2.5 Defectos de apariencia

Ocurre por inadecuada temperatura del adhesivo, baja aplicación de adhesivo, o inadecuada temperatura del rodillo en el nip de laminación.

Dependiendo de la cantidad de tinta se debe o no incrementar la cantidad de adhesivo, entre mayor capa de tinta mayor debe ser la aplicación de adhesivo para lograr que el adhesivo llene las irregularidades de esta, como se muestra en la Figura 11.

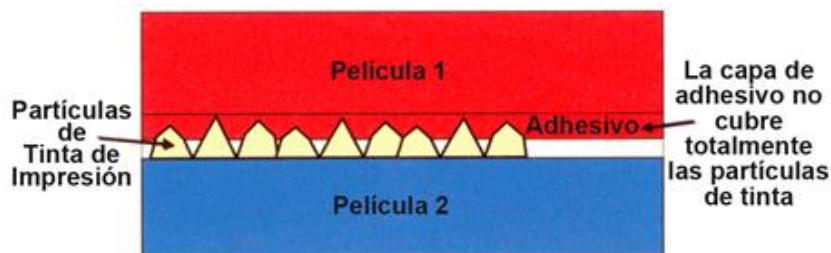


Figura 11. Defectos de apariencia (Obtenido de Wilmer, 2016).

#### 2.6.2.6 Burbujas

##### Burbujas por tintas abrasivas

Ocurre especialmente en las áreas blancas o de tintas claras donde los puntos grises son claramente visibles contra el blanco del fondo. Esta es una clase de

pinhole (ausencia de tinta) relacionada con la pérdida de contacto, como se observa en la Figura 12.



Figura 12. Burbujas por tintas abrasivas (Obtenido de Wilmer, 2016).

### **Burbujas causadas por gases atrapados**

Las burbujas causadas por la generación de CO<sub>2</sub> debido a la reacción química. Por la falta de cohesividad, los adhesivos se reúnen al borde de la burbuja creando una perla visible, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Burbujas causadas por gases atrapados (Obtenido de Wilmer, 2016).

### **Burbujas causadas por partículas extrañas**

Las partículas extrañas en las películas, tintas y adhesivos pueden producir una laminación defectuosa.

### **Burbujas causadas por aire atrapado**

El atrapamiento de aire durante la laminación es causado con frecuencia por la dureza inadecuada de los rodillos de impresión.

### **Burbujas al borde del área de impresión**



Si los bordes están en la dirección de impresión del rollo, la presión de embobinado es más baja allí, lo cual hace que los gases tengan suficiente espacio para reunirse y provocar este defecto, se puede observar en la Figura 14.



Figura 14. Burbujas al borde del área de impresión (Obtenido de Wilmer, 2016).

#### **2.6.2.7 Delaminación**

Es la baja fuerza de adherencia entre dos o más sustratos y se puede ver afectada por solventes residuales altos, retardantes, mezcla incorrecta entre el adhesivo y el catalizador, exceso de aditivos deslizantes en las películas de PE y problemas de adherencia en los recubrimientos de metal.

#### **2.6.2.8 Telescopio**

Es el desplazamiento lateral de las capas del rollo o del core se puede presentar en un solo lado, sólo cerca del centro y derecho hacia afuera, y hacia ambos lados, como se muestra en la Figura 15.

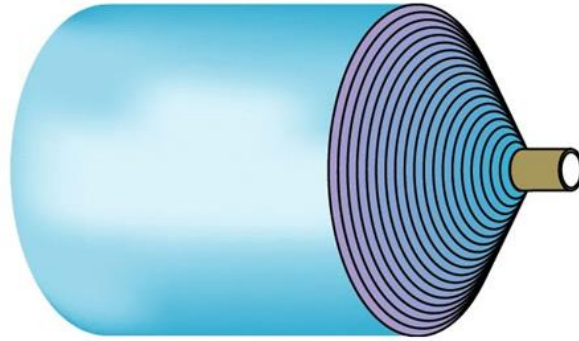


Figura 15. Telescopio (Obtenido de Wilmer, 2016).

Actualmente tiene un gran impacto como herramienta de la Industria 4.0 la simulación y el modelado computacional debido a que mejora el desempeño de las empresas con mejorar en sus procesos tanto de manufactura, servicios y comerciales. Con la simulación podemos desarrollar modelos de los procesos y analizarlos con sus variables, pero lo principal es que el modelo se debe validar con el de la vida real para poder proponer una mejora, esta puede combinar con otras herramientas como lo son las *Lean* o distribución de planta, principalmente en los desperdicios que son lo que juegan una parte importante en la eficiencia de un proceso.

Con el paso del tiempo y los avances se han analizado diferentes procesos de diferentes sectores, una muy importante en México es el del aluminio, aunque no seamos un productor primario este sector se ha desarrollado mucho principalmente por la variedad de productos que se obtienen. Las manufactureras de aluminio están teniendo más poder en el país dado que tenemos muchos países principalmente E.U que nos compran los productos. En la manufactura de aluminio uno de los productos importantes que se obtienen el papel aluminio el cual tiene un proceso complejo debido a que son una gran variedad de tipos de papel aluminio para diferentes productos como los son envolturas de confitería, blíster, empaques de comida, cables, por mencionar algunos. Durante el proceso al ser calibres de papel muy delgados ocurren muchos problemas tanto el producto como en el proceso por lo que estudiarlo por simulación este proceso sería importante para este sector y para el país ya que en otros países tienen estos procesos totalmente automatizados.

## **Capítulo 3 Metodología**

### **3.1 Descripción del proceso de manufactura de laminado de papel aluminio**

Los datos del proceso que se analizaron en el presente estudio corresponden a un proceso de la planta de la empresa Almexa, pertenece al Grupo Vasconia S.A.B, que se dedica a la manufactura de aluminio. El presente análisis se basó en un estudio de tiempos y movimientos por el método de cronometro reportado por Mujica (1999) (Hodson, 1996). La planta Almexa procesa los calibres 7, 7. 6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51  $\mu\text{m}$ , que corresponden a las familias 50, 83, 101, 107, 113, 115, 120, 133, 139, 140, 165, 168, 188, 192, 200, 201, 235, 280, 281, 289, 330, 334 y 449.

#### **3.1.1 Layout de proceso y diagrama de recorrido**

En la Figura 16 se muestra el layout de la distribución de maquinaria del área de papel convertido de la planta Almexa.

El flujo del material o producto del proceso inicia en la entrada de material (1), después se traslada el rollo a la máquina de impresión (2), continuando con el proceso se traslada el rollo a la máquina grabado (3), se continúa trasladando el rollo a la máquina de corte (4) y por último se lleva al almacén de producto terminado (5). Los traslados de material lo realizan los operadores, así como la carga y descarga de los rollos, el flujo del proceso depende de los operadores debido a esto realizan más de 100 actividades.

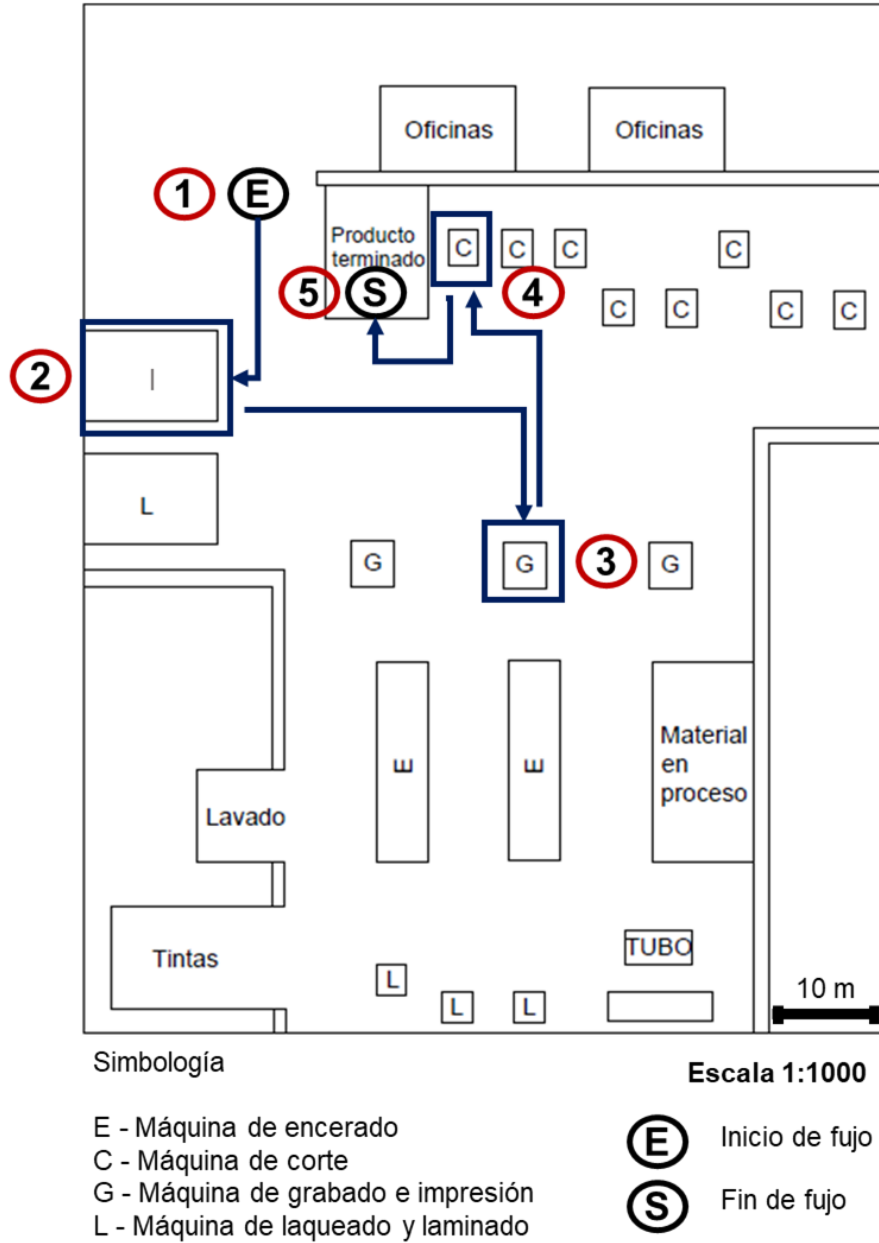


Figura 16. Layout de planta y diagrama de recorrido de Papel convertido. El material procesado sigue el recorrido mostrado con la secuencia de números del 1 al 5.

### 3.1.2 Diagrama de proceso

El flujo del proceso de laminado inicia por la impresión, continua con el grabado y por último el corte, como se muestra en la Figura 17.

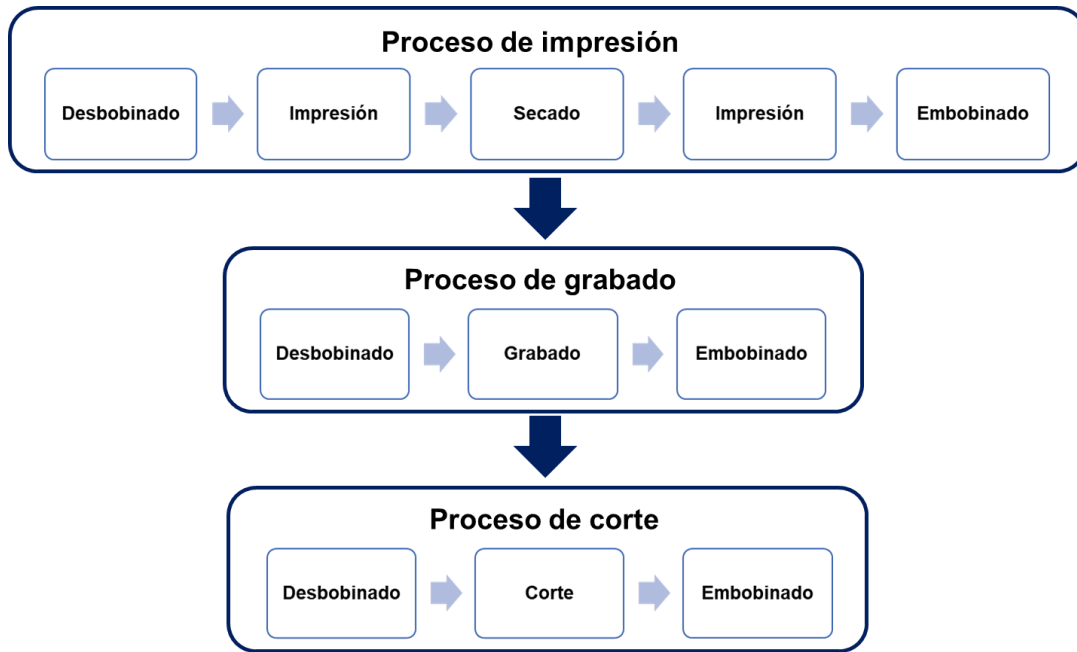


Figura 17. Flujo de manufactura de laminado de papel aluminio integrado por los procesos de impresión, grabado y corte.

El proceso de impresión inicia con el desbobinado del rollo de papel aluminio, después se imprime con una tinta y pasa al secado de la tinta, luego se vuelve a imprimir la tinta que corresponde al tipo de producto y por último se embobina nuevamente el rollo de papel aluminio.

El proceso de grabado empieza con el desbobinado del rollo de papel aluminio, continua con la grabación de la figura en la superficie y finaliza con el embobinado del rollo de papel aluminio.

El proceso de corte comienza en el desbobinado del rollo de papel aluminio, se corta de acuerdo a la medida que se requiera y por último se embobina el rollo de papel aluminio.

### 3.1.3 Diagrama de flujo de proceso papel convertido

En la Cuadro 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso de impresión realizado a partir de los datos del estudio de tiempos y movimientos.

Cuadro 4. Diagrama de flujo del proceso de impresión.

		Tiempos por eventos (min.)						
	Producción (P)	817.75					Inevitable	706.88
	Planeación (PL)	45.35					Evitable	696.56
	Mantenimiento (M)	535.79						
	Ingeniería (I)	0						
	Servicio Médico (SM)	0						
		Tiempos (min.)						
	Operación	498.43					Inspección	72.99
	Transporte	73.38					Demora	758.64
No.	Descripción de las actividades	Símbolos				Actividad		Tiempo (min)
		Operación	Transporte	Inspección	Demora	Inevitable	Evitable	
1	Sincronizar el registro después de descarga	●	➡	■	⌚	P		9.25
2	Ajustar o cambiar cuchillas en estaciones	●	➡	■	⌚	P		12.51
3	Distracción de los operadores	●	➡	■	⌚		P	3.95
4	Sacar muestra y dejar con control de calidad	●	➡	■	⌚	P		5.95
5	Revisar viscosidad y/o flujo de lacas	●	➡	■	⌚	P		10.05
6	Prueba de grabado después de cambio de laca, tono o proceso.	●	➡	■	⌚	P		10.03
7	Esperar que trasladen el como a la zona de descarga	●	➡	■	⌚		P	1.57
8	Buscar o preparar herramienta	●	➡	■	⌚		P	2.88
9	Cambio de turno	●	➡	■	⌚		P	8.86
10	Bandera en rollo de carga	●	➡	■	⌚	P		9.5
11	Checar spot del material	●	➡	■	⌚	P		2.75
12	Cambiar o ajustar el rodillo de contra estampa	●	➡	■	⌚	P		12.51
13	Preparar material para la carga	●	➡	■	⌚		P	5.46
14	Buscar sus guantes o llaves allen	●	➡	■	⌚		P	2
15	Pesar rollo de descarga	●	➡	■	⌚		P	3.68
16	Retirar foil defectuoso del rollo de carga	●	➡	■	⌚	P		7.37
17	Retirar material defectuoso	●	➡	■	⌚		P	5.05
18	Volver a centrar, acomodar o apretar conos en el rollo de carga	●	➡	■	⌚		P	3.91
19	Ir por rodillos para cambio de proceso	●	➡	■	⌚		P	32.66
20	Mover cajas para sacar rodillos de grabado	●	➡	■	⌚		P	3.12
21	Cambiar una laca	●	➡	■	⌚		PL	18.4
22	Falla en la presión del aire	●	➡	■	⌚		M	1.91
23	Falla eléctrica en la máquina	●	➡	■	⌚		M	40.62
24	Poniéndose de acuerdo operador y ayudante	●	➡	■	⌚		P	8.19
25	Ajustar los rodillos para el registro	●	➡	■	⌚	P		13.1
26	Enhebrar material en estaciones	●	➡	■	⌚	P		11.08
27	Derrame de tinta de los trolley	●	➡	■	⌚		P	9.4
28	Falta de material	●	➡	■	⌚		PL	18.9
29	Falta de cartón protector para rollos	●	➡	■	⌚		P	9.88
30	Hablar operador con supervisor	●	➡	■	⌚	P		2.2
31	Checar estado del rodillo de grabado	●	➡	■	⌚	P		5.93
32	Limpiar rodillo de grabado	●	➡	■	⌚	P		52.68
33	Rotura de material	●	➡	■	⌚	P		10.86
34	Se paso el papel separador a las estaciones	●	➡	■	⌚		P	6.32
35	Reajustar el tambor en la flecha de descarga	●	➡	■	⌚		P	3.92
36	Traer tinta o barniz del almacén	●	➡	■	⌚		P	28.06
37	Ir por gancho de pluma	●	➡	■	⌚		P	0.87
38	Checar material con supervisor	●	➡	■	⌚	P		9.84
39	Localizar cara termosellante en foil	●	➡	■	⌚	P		6.15
40	Revisar en bitácora los rodillos a utilizar	●	➡	■	⌚		P	9.08

41	Platicas de seguridad	●	➔	■	●	P		22.08
42	Necesidades personales	●	➔	■	●	P		5.15
43	Cambiar el rollo de carga ya montado por defectuoso	●	➔	■	●		P	8.23
44	Limpiar y escombrar zona de trabajo	●	➔	■	●		P	3.33
45	Descargar rollo de papel separador	●	➔	■	●	P		5.96
46	Refrigerio	●	➔	■	●		P	6.61
47	Tomar agua	●	➔	■	●	P		2.31
48	Dificultades para sacar o meter el trolley	●	➔	■	●	P		1.31
49	Reparar bomba en estaciones	●	➔	■	●		M	38.35
50	Ajustar y revisar trolley	●	➔	■	●	P		29.37
51	Revisar engranes de trolley	●	➔	■	●	P		2.45
52	Ir por solvente	●	➔	■	●		P	3.61
53	Rectificar con lima las puntas de los rodillos	●	➔	■	●	P		10.45
54	Limpiar rodillos de máquina	●	➔	■	●	P		31.81
55	Revisar temperatura y vapor	●	➔	■	●	M		28.72
56	Ajustar rodillo en trolley	●	➔	■	●		P	10.08
57	Bajar rodillo de carga, centrarlo y montarlo nuevamente	●	➔	■	●		P	3.57
58	Revisar bitácora	●	➔	■	●		P	3.26
59	Falla de vapor	●	➔	■	●		M	53.44
60	Tirar solvente utilizado	●	➔	■	●		P	3.3
61	Acomodar rodillo de estación	●	➔	■	●		M	53.83
62	Lavarse las manos	●	➔	■	●		P	2.91
63	Poner en paralelo rodillos de estación	●	➔	■	●		M	39.62
64	Ir por refacciones al almacén	●	➔	■	●		P	8.18
65	Ir a buscar al supervisor	●	➔	■	●		P	8.28
66	Rotura de una unión del material	●	➔	■	●		P	30.58
67	Esperar a ayudante	●	➔	■	●		P	1.13
68	Cambio de conos en descarga	●	➔	■	●		P	1.56
69	Falta de suministro de energía eléctrica	●	➔	■	●		P	0.57
70	Hacen muesca o interior para cono	●	➔	■	●		P	1.64
71	Ir por tacómetro	●	➔	■	●		P	1.9
72	Pruebas para cliente	●	➔	■	●		P	5.85
73	Esperar oden de trabajo	●	➔	■	●		PL	8.05
74	Cambiar tambor de descarga	●	➔	■	●		P	4.55
75	Levantar herramienta	●	➔	■	●		P	2.8
76	Acomodar rollo de descarga	●	➔	■	●		P	2.03
77	Quitarle la pintura a los guantes	●	➔	■	●		P	1.38
78	Cambiar un balero	●	➔	■	●		M	15.42
79	Checar un rodillo en estación	●	➔	■	●		P	1.15
80	El operador dejo el trabajo momentaneamente	●	➔	■	●		P	20.7
81	Poner cartón a rodillo planchador	●	➔	■	●		P	1.8
82	Acomodar la manguera de la bomba	●	➔	■	●		P	4.41
83	Colocar filtro en cada estación	●	➔	■	●		P	5.54
84	Pesar rollo descarga a carga	●	➔	■	●		P	21.8
85	Hacer laines	●	➔	■	●		P	21.9

86	Limpiar trolley	●	→	■	⌋	P		5.85
87	Preparar cubetas para solvente	●	→	■	⌋		P	3.64
88	Problemas de registro de una estación	●	→	■	⌋	P		73.3
89	Esperar a mantenimiento	●	→	■	⌋		M	80.19
90	Arreglar brazo de control de registro	●	→	■	⌋	M		33.68
91	Quitar sobrante de rollo de carga	●	→	■	⌋		P	1.12
92	Cambiar manguera de presión en rodillos	●	→	■	⌋		M	34.12
93	No pusieron las bandas para el motor	●	→	■	⌋		M	10.2
94	Falla de embrague neumático	●	→	■	⌋	M		6.47
95	Ajustar navaja de corte	●	→	■	⌋	P		4.78
96	Ajustar arrastre flecha de carga	●	→	■	⌋	P		8.13
97	Esperar desenrollador para interior mayor	●	→	■	⌋		P	7.05
98	Instalar desenrollador	●	→	■	⌋	M		46.81
99	Se safo la manguera de aire del desenrollador	●	→	■	⌋		M	19.11
100	Se trono la manguera	●	→	■	⌋		M	30
101	Hacer girar tambor de estación	●	→	■	⌋		M	3.3
102	El operador rompio el foil	●	→	■	⌋		P	23.05
103	Retirar el sobrante de rollo de carga	●	→	■	⌋	P		25.74
104	Retirar implementos de tinta azul	●	→	■	⌋		P	11.13
105	Traer implementos para tinta roja	●	→	■	⌋		P	8.1
106	Ajustar dosificador	●	→	■	⌋	P		6.25
<b>Tiempo total del proceso de impresión (min)</b>								<b>1,403.44</b>

El proceso de impresión comprende 106 actividades que se agrupan en operación, transporte, inspección y demora, y acumulan un tiempo total del proceso de impresión de 1,403.44 min (23.39 h).

En la Cuadro 5 se muestra el diagrama de flujo del proceso de grabado realizado a partir de los datos del estudio de tiempos y movimientos.



Cuadro 5. Diagrama de flujo del proceso de grabado.

Tiempos por eventos (min.)								
Producción (P)	215.01							
Planeación (PL)	0							
Mantenimiento (M)	84			Inevitable	202.01			
Ingeniería (I)	17			Evitable	121.3			
Servicio Médico (SM)	7.3							
Tiempos (min.)								
Operación	52.41			Inspección	2.3			
Transporte	0			Demora	268.6			
No.	Descripción de las actividades	Símbolos				Actividad		Tiempo (min)
		Operación	Transporte	Inspección	Demora	Inevitable	Evitable	
1	Ajustar ojo electrónico de desenrollador	●	➡	■	⌚	P		6.4
2	Falla mecánica	●	➡	■	⌚	M		69.7
3	Retirar material de cavidades	●	➡	■	⌚	P		5.4
4	Retirar material de cavidades por ajuste de ojo electrónico	●	➡	■	⌚	P		3.9
5	No entra bandera de rollo de carga	●	➡	■	⌚		P	12.3
6	Mantenimiento eléctrico	●	➡	■	⌚	M		10.4
7	Preparar rollo para carga	●	➡	■	⌚		P	4.6
8	Rotura del material por no ajustar la tensión	●	➡	■	⌚		P	4.3
9	Quitar sobrante de rollo de carga	●	➡	■	⌚		P	4.8
10	Bajar rollo de carga, centrarlo, poner conos y montar nuevamente	●	➡	■	⌚		P	7.1
11	Buscar a supervisor para consultarlo	●	➡	■	⌚	P		3.7
12	Se safo un cono de rollo de carga	●	➡	■	⌚		P	18.4
13	Falta de corazones de cartón para cavidades	●	➡	■	⌚		P	3.6
14	Empezar a trabajar después de inicio de turno	●	➡	■	⌚	P		8.5
15	Ajustar cuchillas	●	➡	■	⌚	P		10.7
16	Se corrió el rollo de carga	●	➡	■	⌚	P		8.1
17	Embobinar mal las cavidades	●	➡	■	⌚		P	3.9
18	Actividades no relacionadas al trabajo	●	➡	■	⌚		P	1.4
19	Hacer pruebas con nuevas medidas entre cuchillas	●	➡	■	⌚	P		14.3
20	Retirar sobrante de rollo de carga y pesarlo	●	➡	■	⌚		I	13.6
21	Pesar rollo de descarga	●	➡	■	⌚		I	3.4
22	Checar material con control de calidad	●	➡	■	⌚	P		2.3
23	Bajar rollo por estar defectuoso y montar otro	●	➡	■	⌚	P		5.8
24	No paró el operador en la bandera	●	➡	■	⌚		P	3.5
25	Se revento el material	●	➡	■	⌚	P		2.4
26	Esperar al operador o al ayudante	●	➡	■	⌚		P	1.5
27	Enhebrar máquina	●	➡	■	⌚	P		3.11
28	Pedir prestado herramienta	●	➡	■	⌚		P	1.3
29	Junta con supervisor	●	➡	■	⌚	P		8.6
30	Esperar operador	●	➡	■	⌚	P		2.9
31	Ajustar la presión de flecha	●	➡	■	⌚	P		2.5
32	Problemas para retirar el desorillado	●	➡	■	⌚		P	7.3
33	Vacuna	●	➡	■	⌚	SM		7.3
34	Pegar material de desorillado	●	➡	■	⌚	P		6.7
35	Planchar cavidad con máquina parada	●	➡	■	⌚		P	6.6
36	Traer conos más grandes para rollo de carga	●	➡	■	⌚		P	6.3
37	Retirar desorillado	●	➡	■	⌚		P	2.1
38	Problemas para sacar flecha de cavidad	●	➡	■	⌚		P	5.2
39	Buscar rollo para carga	●	➡	■	⌚		P	4.2
40	Poner material a tierra	●	➡	■	⌚	M		3.9

41	Hacer pruebas de corte	●	➡	■	⌋	P		3.7
42	Retirar material roto en enhebrado	●	➡	■	⌋	P		3.2
43	Sacar muestra para spot y checarlo	●	➡	■	⌋	P		3
44	Traer cartón protector para rollo	●	➡	■	⌋		P	2.4
45	Preparar diurex (cortar)	●	➡	■	⌋		P	2.2
46	Mover pluma a zona de descarga	●	➡	■	⌋	P		2
47	Poner cinta para que no patinen los separadores de flechas	●	➡	■	⌋	P		1.8
48	Cortar sobrante de orilla de bobina	●	➡	■	⌋	P		1.7
49	Otros	●	➡	■	⌋		P	1.3
<b>Tiempo total del proceso de grabado (min)</b>								<b>323.31</b>

El proceso de impresión comprende 49 actividades que se agrupan en operación, transporte, inspección y demora, y acumulan un tiempo total del proceso de grabado de 323.31 min (5.38 h).

En la Cuadro 6 se muestra el diagrama de flujo del proceso de corte realizado a partir de los datos del estudio de tiempos y movimientos.

Cuadro 6. Diagrama de flujo de proceso de corte.

Tiempos por eventos (min.)								
Producción (P)	205.4							
Planeación (PL)	5							
Mantenimiento (M)	55.6		Inevitable	98.8				
Ingeniería (I)	0		Evitable	167.2				
Servicio Médico (SM)	0							
Tiempos (min.)								
Operación	23		Inspección	18.6				
Transporte	0		Demora	224.4				
No.	Descripción de las actividades	Símbolos				Actividad		Tiempo (min)
		Operación	Transporte	Inspección	Demora	Inevitable	Evitable	
1	Falla mecánica	●	→	■	⌚	M		21.3
2	Retirar material mal embobinado (defectuoso)	●	→	■	⌚	P		3.4
3	Falta de corazones de cartón	●	→	■	⌚		P	6.6
4	No paro la bandera	●	→	■	⌚		P	15.1
5	Esperar a mantenimiento	●	→	■	⌚		M	27.5
6	Se revento el material (defectuoso)	●	→	■	⌚	P		4.2
7	Ajustar desorillado	●	→	■	⌚	P		1.9
8	Correr material, centrarlo y ajustar tensión	●	→	■	⌚	P		2.7
9	Cambio de balatas	●	→	■	⌚	M		6.8
10	Centrar rolo nuevamente durante la carga	●	→	■	⌚		P	6.5
11	Buscar al supervisor y checar material	●	→	■	⌚	P		3.7
12	Cambiar cuchillas por estar defectuosas	●	→	■	⌚		P	27
13	Preparar rolo para carga	●	→	■	⌚		P	3.2
14	No entra bandera de rolo de carga	●	→	■	⌚		P	21.1
15	Esperar que corten separadores	●	→	■	⌚		P	6.1
16	Cambiar rolo de carga por estar flojo	●	→	■	⌚	P		17.9
17	Buscar herramienta y pedir prestada	●	→	■	⌚		P	3.1
18	Checar cuchillas con supervisor	●	→	■	⌚	P		12.9
19	Actividades no relacionadas al trabajo	●	→	■	⌚		P	1.6
20	Poner protección de cuchillas	●	→	■	⌚	P		2.7
21	Checar material control de calidad	●	→	■	⌚	P		2
22	Cambiar cono de desenrollador	●	→	■	⌚		P	4.9
23	Planchar cavidad con máquina parada	●	→	■	⌚		P	4.9
24	Ajustar cuchillas	●	→	■	⌚	P		1.7
25	Esperar operador o ayudante	●	→	■	⌚		P	1.9
26	Poner plato o rolo para que no se corra	●	→	■	⌚		P	4
27	Traer guías de cuchillas y trapo	●	→	■	⌚	P		3.7
28	Rotura de material	●	→	■	⌚		P	3.3
29	Ajustar contra peso de flecha	●	→	■	⌚		P	2.1
30	Retirar material de cavidades	●	→	■	⌚		P	3.1
31	Se monto el rolo al revés	●	→	■	⌚		P	6
32	Empezar después de inicio de turno	●	→	■	⌚		P	5.9
33	Esperar operador	●	→	■	⌚	P		5.7
34	Esperar orden de producción	●	→	■	⌚		PL	5
35	Pegar material en cavidad	●	→	■	⌚	P		5
36	Parar antes de la comida	●	→	■	⌚		P	5
37	Retirar sobrante de rolo	●	→	■	⌚		P	2.1
38	Limpiar rodillo	●	→	■	⌚	P		1.1
39	Enhebrar	●	→	■	⌚	P		2.1
40	Cortar diurex	●	→	■	⌚		P	1.2
<b>Tiempo total del proceso de corte (min)</b>						<b>266</b>		

El proceso de impresión comprende 40 actividades que se agrupan en operación, transporte, inspección y demora, y acumulan un tiempo total del proceso de impresión de 266 min (4.43 h).

### 3.1.4 Tiempos de procesos medidos en planta

En el proceso de laminado para estudiar el tiempo de laminado se toman en cuenta el tiempo de carga que es el montaje de la bobina, el tiempo de contacto es el procesamiento del papel aluminio, el tiempo de roturas del material y el tiempo de descarga que es el desmontaje de la bobina al terminar se contabiliza el ciclo total. También en el proceso se consideran la velocidad de procesamiento, la cantidad de material procesado en kilogramos por un minuto y los minutos por un kilogramo, y los kilos de material por ciclo. Los tiempos de laminado se obtuvieron del método de cronómetro del estudio de tiempos y movimientos de Mujica (1999).

En el Cuadro 7 se describen los tiempos del proceso de impresión de 6 familias diferentes del producto que se procesa en la planta Almexa.

Cuadro 7. Tiempos de procesamiento de impresión para diferentes familias. Datos tomados de planta.

Máquina impresora										
Familia	Calibre (ε) (μm)	Tiempo carga (min)	Tiempo descarga (min)	Tiempo contacto (min)	Ciclo total (t <sub>pi</sub> ) (min)	Velocidad (m/min)	Material procesado		Cantidad de material	
							kg/min	min/kg	m	kg
120	51	6.98	5.85	110.7	123.53	26.6	1.74	0.576	2,878.2	214.5
120	51	6.98	5.85	119.4	132.23	25	1.48	0.678	2,905.0	195.0
133	39	6.98	5.85	185.6	198.43	23	1.11	0.9	4,268.8	220.5
168	9	6.98	8.79	425.3	441.07	32	0.50	2.004	13,609.6	220.1
168	9	6.98	8.79	407.2	422.97	32	0.45	2.238	13,030.4	189.0
168	9	6.98	8.79	434.2	449.97	32	0.59	1.71	13,894.4	263.1
188	30	11.23	5.85	174.3	191.38	24	1.65	0.606	4,183.2	315.8
334	7.6	11.23	5.85	150.1	167.18	30	0.52	1.92	2,551.7	87.1
334	11	11.23	5.85	211.9	228.98	39.3	0.52	1.908	4,089.7	120.0
107	50	6.98	5.85	163.3	176.13	30	1.18	0.852	2,736.1	206.7

En el Cuadro 8 se describen los tiempos del proceso de grabado de 9 familias diferentes del producto que se procesa en la planta Almexa.

Cuadro 8. Tiempos de procesamiento de grabado para diferentes familias. Datos tomados de planta.

Máquina grabadora										
Familia	Calibre (ε) (μm)	Tiempo carga (min)	Tiempo descarga (min)	Tiempo roturas (min)	Tiempo contacto (min)	Ciclo total (tp <sub>g</sub> ) (min)	Velocidad (m/min)	Material procesado		Cantidad de material (kg)
								kg/min	min/kg	
120	51	3.24	3.24	2.4	4.19	13.07	46.3	2.22	0.471	27.75
115	17	2.42	4.65	1.28	12.15	20.50	27.6	1.32	0.757	27.08
115	17	1.22	4.61	1.88	12.31	20.02	26.7	1.19	0.805	24.87
120	51	3.12	3.56	3.49	26.3	36.47	17.8	1.50	0.667	54.68
334	7.6	3.49	4.09	10.96	23.25	41.79	16.8	1.59	0.632	66.12
50	15	3.31	6.88	3.12	30	43.31	36.8	1.96	0.457	94.77
107	7	0.54	5.68	11.15	17.03	34.40	21.4	1.35	0.836	41.15
188	30	0.58	3.54	1.78	5.78	11.68	29.1	2.78	0.361	32.35
120	51	0.57	3.15	0.36	2.53	6.61	70.7	1.12	0.729	9.07
139	15	0.1	1.83	0.23	1.65	3.81	75.3	0.95	1.044	3.65
140	15	0.14	1.39	0.36	2.23	4.12	64.2	0.64	1.554	2.65
192	15	0.13	1.53	0.19	2.06	3.91	65.7	0.63	1.76	2.22
192	15	0.13	4.2	0.31	7.35	11.99	35.1	0.73	1.305	9.19

En el Cuadro 9 se describen los tiempos del proceso de corte de 13 familias diferentes del producto que se procesa en la planta Almexa.

Cuadro 9. Tiempos de procesamiento de corte para diferentes familias. Datos tomados de planta.

Máquina cortadora										
Familia	Calibre (ε) (μm)	Tiempo carga (min)	Tiempo descarga (min)	Tiempo roturas (min)	Tiempo contacto (min)	Ciclo total (tp <sub>c</sub> ) (min)	Velocidad (m/min)	Material procesado		Cantidad de material (kg)
								kg/min	min/kg	
83	51	0.98	5.8	1.65	15.1	23.53	38	2.27	0.444	53.00
101	39	2.38	2.7	0	14	19.08	33	1.96	0.508	37.56
113	20	1.06	5.2	1.01	16.9	24.17	97	3.67	0.265	91.21
113	20	1.9	3.7	0	15.9	21.5	70	2.60	0.385	55.84
113	20	0.95	3.62	0.44	19.6	24.61	57	2.43	0.411	59.88
120	50	3.03	9.9	7.4	53.5	73.83	25	4.88	0.205	360.15
165	35	1.07	4.92	0.52	8.9	15.41	29	1.06	0.938	16.43
168	9	1	5.28	1.42	38.8	46.5	51	0.70	1.429	32.54
200	39	0.86	3	0.42	9.2	13.48	44	4.01	0.249	54.14
201	39	1	3.21	0	6.2	10.41	86	4.84	0.202	51.53
235	9	1.56	3.1	3.43	15.4	23.49	135	1.15	0.87	27.00
280	25	1.29	3.3	0.25	13.2	18.04	69	3.36	0.3	60.13
281	25	0.82	3.9	2.22	20	26.94	65	2.47	0.398	67.69
289	15	2.38	3.7	2.64	18.5	27.22	84	1.65	0.611	44.55
330	15	2.13	2.4	0	20.1	24.63	37	0.51	1.994	12.35

### 3.1.5 Análisis de los tiempos de procesamiento por el método de la máxima verosimilitud

La información de los tiempos de laminación en cada proceso y por tipo de familia, de la manufactura de laminado para programar en Flexsim los tres procesos, impresión, grabado y corte presentada en la Figura 18 fue analizada mediante el método de la máxima verosimilitud en el software Minitab con un intervalo de confianza de 95% con un 5% de error en el nivel de significancia por la cantidad de datos y el tipo de proceso. La función de densidad de probabilidad (PDF) gamma (Ecuación 1), dependiente del tiempo de ciclo total en cada uno de los procesos ( $tp_i$ ,  $tp_g$ ,  $tp_c$ ), de acuerdo al análisis de los datos fue elegida bajo el criterio de satisfacción de la prueba de ajuste de bondad para  $p > 0.05$  (Mendenhall, et al., 2006).

$$PDF = f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, & x > 0 \\ 0, & resto \end{cases} \quad (1)$$

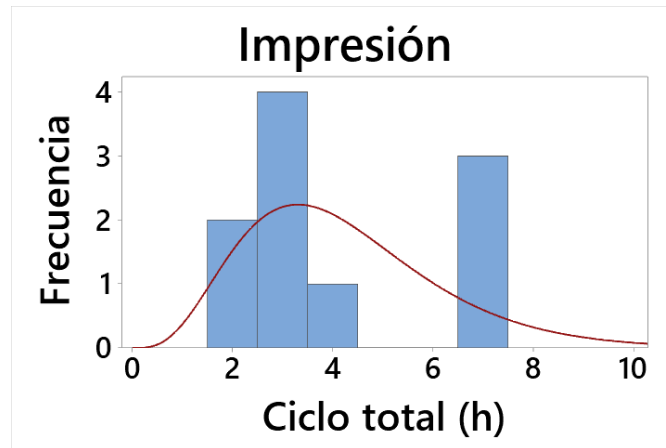
La función de densidad mostrada en la Ecuación 1 considera los parámetros de ajuste  $\alpha > 0$  y  $\beta > 0$ , siendo la media  $\mu = \alpha\beta$  y la desviación estándar  $\sigma^2 = \alpha\beta^2$  (Vargas, 1995).

En la Figura 18 se muestra la correlación de las gráficas de distribución del tiempo de procesamiento de los procesos de impresión, grabado y corte. Se analizaron los tiempos del ciclo total de cada proceso de la información presentada en los Cuadros 7, 8 y 9 para obtener la distribución que siguen los datos (Anexo 1). Los parámetros estimados de la distribución gamma se muestran en el Cuadro 10.

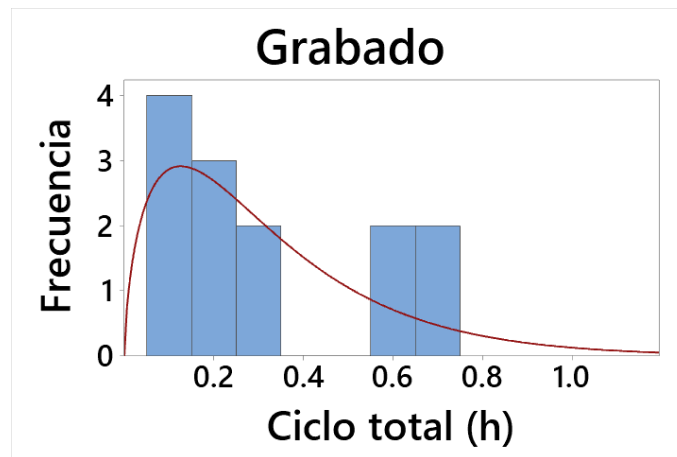
Cuadro 10. Parámetros de estimación del método de máxima verosimilitud de la distribución gamma.

Proceso	Ubicación	Escala ( $\beta$ )	Forma ( $\alpha$ )	Valor umbral
Impresión	0	3301.83951	4.60084	0
Grabado	0	707.97517	1.64074	0
Corte	0	343.02064	4.46332	0

a)



b)



c)

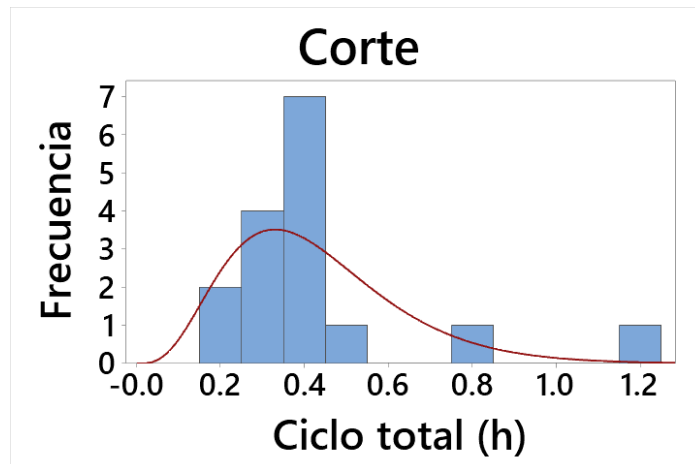


Figura 18. Función de distribución gamma del tiempo de procesamiento para a) impresión, b) grabado y c) corte.

### 3.1.6 Variables de proceso consideradas en la simulación computacional

Las variables consideradas para la simulación computacional:

- Tiempos de cada proceso ( $tp_i, tp_g, tp_c$ ) (s).
- Cantidad de material procesado ( $m$ ) (kg).
- Secuencia de procesamiento ( $r$ ) (-).
- Calibre del material ( $\epsilon$ ) ( $\mu\text{m}$ ).

La restricción es un ciclo de procesamiento.

## 3.2 Modelo de simulación

### 3.2.1 Construcción de modelo

En la Figura 19 se muestra el orden en que se realizó la construcción del modelo de simulación del proceso de manufactura en Flexsim.



Figura 19. Esquema de construcción del modelo.

El modelo consta de 23 objetos de los cuales son: la entrada o llegada de producto, las locaciones son 3 procesos (máquinas) y 6 líneas de esperas, los recursos de los cuales son 7 operadores, 3 dispatchers que son los asignadores de tareas a los operadores, la salida o producto terminado que son 3 racks. La distribución en cada proceso se muestra en el Cuadro 11.

La entidad es el producto que se maneja, en este caso, es el rollo de papel aluminio. El material de flujo del proceso es el aluminio.

Cuadro 11. Cantidad de objetos en los procesos.

Procesos	Operadores	Máquinas	Líneas de espera	Asignadores de tareas	Rack o pallet	Total de objetos
Entrada					1	
Impresión	3	1	2	1		
Grabado	2	1	2	1		
Corte	2	1	2	1		



Producto terminado					3	
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>23</b>

Las variables de los procesos y de los recursos son: tiempos de cada proceso cantidad de material, secuencia de procesamiento, espesor de calibre, ancho de rollo y cantidad de defectos. Algunos de los datos de tiempos de procesamiento son dados por distribuciones estadísticas.

### 3.2.2 Secuencias de proceso simuladas en Flexsim (*r*)

En los Cuadros 12, 13 y 14 se muestran los 18 escenarios del laminado de papel aluminio que fueron simulados en Flexsim de acuerdo a la cantidad de material, tipos de calibre y la secuencia de procesamiento.

Para estudiar el proceso en Flexsim se generaron tres grupos de acuerdo a la cantidad de material: 50 kg (Escenarios del 1 al 6), 100 kg (Escenarios del 7 al 12) y cantidad de material procesado en planta (Escenarios del 13 al 18). La cantidad de material se seleccionó aleatoriamente entre 2 a 360 kg.

La secuencia de procesamiento corresponde al orden en que se procesan los calibres en rollos en la simulación. Se seleccionaron aleatoriamente 6 secuencia de procesamiento de acuerdo a diferente orden de procesamiento.

La primer secuencia de procesamiento corresponde al orden de los calibres menor a mayor, la segunda secuencia tiene un orden de los calibres de mayor a menor, la tercer secuencia de procesamiento los calibres se compara un calibre menor y uno mayor, la cuarta secuencia es la compensación de tiempos similares del proceso de impresión entre un calibre de mayor tiempo y dos veces un calibre de menor tiempo (ejemplo, 9, 20, 20), la cuarta secuencia es la compensación de tiempos similares del proceso de corte entre un calibre de mayor tiempo y dos veces un calibre de menor tiempo (ejemplo, 15, 30, 30) y por último la sexta secuencia de procesamiento es la comparación entre un calibre de mayor tiempo y uno de menor tiempo de proceso.

Cuadro 12. Escenarios de cantidad de material de 50 kg del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.

<b>Escenarios</b>	<b>Secuencia de procesamiento por tipo de calibre (<math>\mu\text{m}</math>) (<i>r</i>)</b>	<b>Cantidad de material (kg) (<i>m</i>)</b>
<b>1</b>	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	50 kg
<b>2</b>	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.	
<b>3</b>	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.	
<b>4</b>	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.	
<b>5</b>	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.	
<b>6</b>	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.	

Cuadro 13. Escenarios de cantidad de material de 100 kg del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.

<b>Escenarios</b>	<b>Secuencia de procesamiento por tipo de calibre (<math>\mu\text{m}</math>) (<i>r</i>)</b>	<b>Cantidad de material (kg) (<i>m</i>)</b>
<b>7</b>	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	100 kg
<b>8</b>	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.	
<b>9</b>	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.	
<b>10</b>	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.	
<b>11</b>	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.	
<b>12</b>	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.	

Cuadro 14. Escenarios de cantidad de material procesado en planta del laminado de papel aluminio simulados en Flexsim.

<b>Escenarios</b>	<b>Secuencia de procesamiento por tipo de calibre (<math>\mu\text{m}</math>) (<i>r</i>)</b>	<b>Cantidad de material (kg) (<i>m</i>)</b>
-------------------	---	---

		$\mu\text{m}$ (€)	Impresión	Grabado	Corte
13	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	7	41.1	41.1	41.1
		7.6	87.1	66.1	66.1
14	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.	9	263.1 220.1 188.9	32.5	32.5 27
		11	120	120	120
15	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.	15	94.7	94.7 9.1 3.6 2.6 2.2	44.5 12.3
		17	27	27 24.8	27
16	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.	20	91.2	91.2	91.2 59.8 55.8
		25	67.6	67.6	67.6 60.1
		30	315.8	32.3	32.3
17	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.	35	16.4	16.4	16.4
		39	220.5	54.1	54.1 51.5 37.5
		50	206.7	360.1	360.1
18	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.	51	214.5 195	54.6 27.7 9	53

### 3.2.3 Simulación computacional en Flexsim

#### Descripción del método de simulación computacional

El modelo computacional del laminado de papel se construyó de acuerdo a los diagramas de las figuras 16 y 17. Es decir, considerando el pallet de entrada, tres máquinas diferentes de impresión, grabado y corte, también 6 filas o esperas para el producto que espera ser procesado, 7 operadores los cuales transportan el producto, 3 dispatchers y 3 racks de producto terminado.

El ciclo de la simulación del proceso de laminado de papel aluminio empieza en la entrada o fuente, desde donde se transporta el producto a la fila de espera 1, el

primer proceso es en la máquina de impresión y al término se coloca en la fila de espera 2, se continúa con el transporte del producto a la fila de espera 3, después se pasa a la máquina de grabado y al término, el producto se coloca en la fila de espera 4, se prosigue con el transporte a la fila de espera 5, cuando se termina el proceso de la pieza en la máquina de corte se coloca en la fila de espera 6 y para finalizar el flujo se transporta a la salida o producto terminado. El transporte del producto es realizado de manera manual, por los operadores de cada máquina.

En la Cuadro 15 se muestra las filas de espera de la simulación del laminado de papel aluminio.

Cuadro 15. Referencia de tipo de espera.

<b>Fila de espera</b>	<b>Referencia</b>
1	Espera para procesar en la máquina de impresión.
2	Espera para que se transporte al proceso de grabado.
3	Espera para procesar en la máquina de grabado.
4	Espera para que se transporte al proceso de corte.
5	Espera para ser procesado en la máquina de corte.
6	Espera para ser transportado a producto terminado.

### **Layout del modelo de simulación computacional del lamiando de papel aluminio en Flexsim**

El layout de la planta se realizó en AutoCad® y se exportó a FlexSim, posteriormente se agregaron las locaciones (máquinas, operadores, líneas de espera, etc.) que son parte del modelado del proceso de laminado Figura 20 a.

El layout se realizó conforme a las dimensiones reales de la planta, considerando la escala del proceso por lo la colocación de los objetos corresponde con las distancias del proceso.

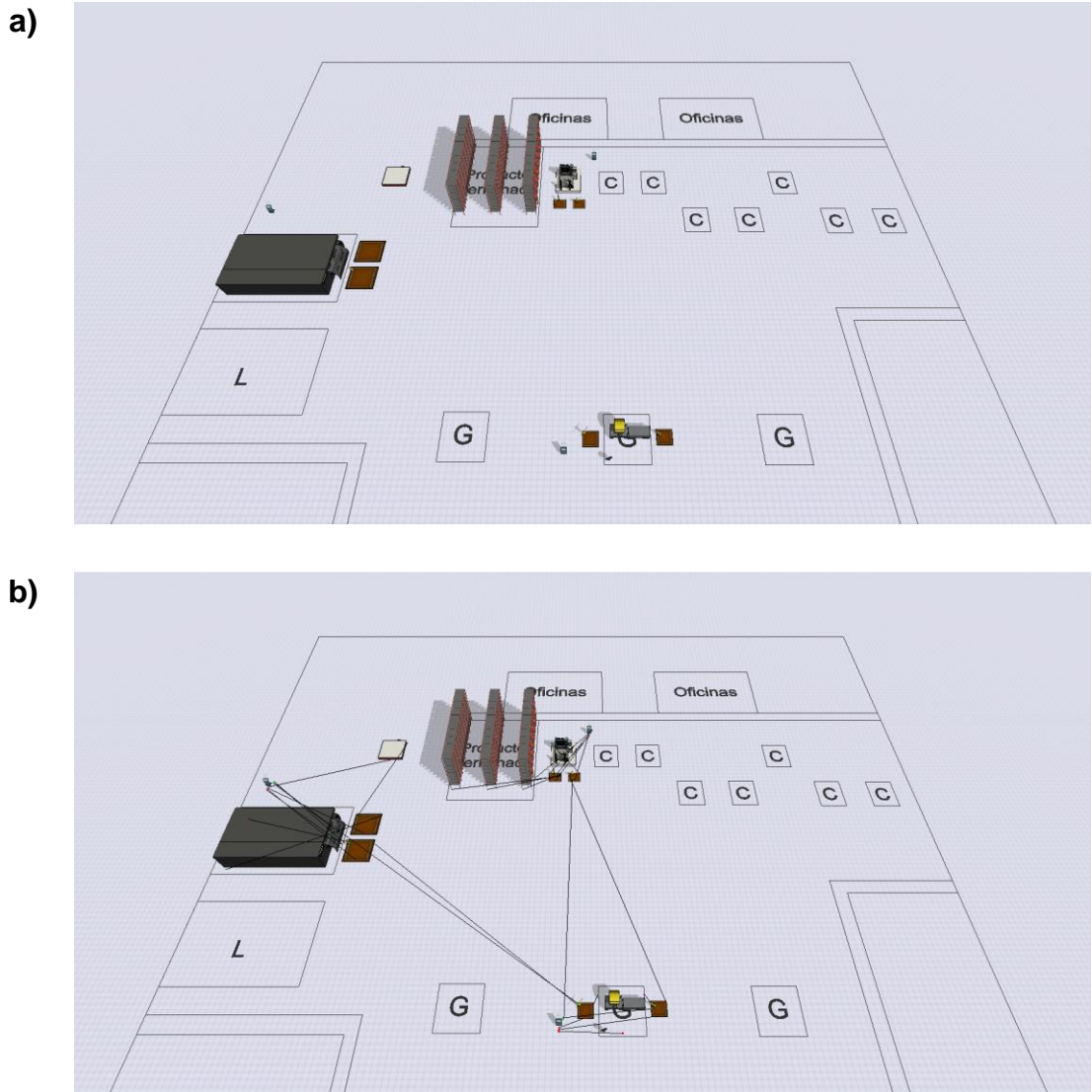


Figura 20. Modelo de simulación de laminado en Flexsim a) Layout b) Conexiones de los objetos.

### Conexión de los objetos en Flexsim

Las conexiones del flujo del proceso son puertos normales, las conexiones con las locaciones y el dispatcher o el ejecutador de tareas son puertos centrales. Los operadores están únicamente conectados al dispatcher el cual les asigna las tareas y siguen el flujo de las conexiones de las locaciones y el dispatcher. Las conexiones de los objetos se pueden observar en la Figura 20 b.

El flujo del producto está conectado por puertos normales entre locaciones y puertos centrales con el dispatcher, los que indican el seguimiento del proceso por las

locaciones. A continuación, se muestran las conexiones del modelo en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Conexiones de objetos del modelo de simulación.

<b>Objetos</b>	<b>Tipo de conexión</b>	<b>Conexiones</b>
Fuente (entrada)	Puerto normal	Fila 1
	Puerto central	Dispatcher
Procesos (máquinas 3)	Puerto normal	Todas las filas
	Puerto central	Dispatcher
Operadores	Puerto normal	Dispatcher
	Puerto normal	Operadores
Dispatcher	Puerto central	Todas las filas y máquinas
Racks (producto terminado)	Puerto normal	Fila 6

### **Especificaciones y restricciones de los objetos en Flexsim**

La entrada o fuente consiste un solo tipo de producto: rollos de papel aluminio (bobina de papel aluminio) pero de grosor diferente y procesados en cantidades variables en las máquinas de impresión, grabado y corte.

En el proceso de simulación computacional la entidad o producto realiza todo el flujo desde la fuente pasando por las máquinas y filas de espera hasta llegar a la salida. En el Cuadro 17 se muestran los parámetros (propiedad e información) usados para cada objeto para la simulación. Se consideró la restricción de que todas las máquinas tienen la capacidad de procesar una sola pieza por ciclo.

Cuadro 17. Configuración de parámetros de los objetos usados en Flexsim.

<b>Nombre</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Datos</b>
Fuente (entrada)	Tiempo entre llegadas	Distribución gamma (0.0, 3301.83951, 4.60084, 0.0)
	Capacidad	1 pieza (rollo)
Procesos (máquinas 3)	Tiempo de procesamiento	Impresión Distribución gamma (0.0, 3301.83951, 4.60084, 0.0)

		Grabado Distribución gamma (0.0, 707.97517, 1.64074, 0.0)
		Corte Distribución gamma (0.0, 343.02064, 4.46332, 0.0)
Operador y ayudante	Capacidad Máxima velocidad	1 pieza (rollo) 1 m/s
Dispatcher	Secuencia de cola	Prioridad por tareas

### Configuración en Flexsim

Los parámetros de los objetos siguen una distribución gamma (Ecuación 1) y se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Parámetros de la distribución gamma de los procesos.

Proceso	Ubicación	Escala ( $\beta$ )	Forma ( $\alpha$ )	Valor umbral
Llegadas	0	3301.83951	4.60084	0
Impresión	0	3301.83951	4.60084	0
Grabado	0	707.97517	1.64074	0
Corte	0	343.02064	4.46332	0

Los dos tipos de filas son: las esperas de los rollos para ser procesados y los que ya fueron procesados, que están en espera de ser transportados al siguiente proceso.

El transporte de los rollos lo realizan los operadores de manera manual, por todo el flujo del proceso.

El rollo procesado por las tres máquinas es llevado a la salida o área de producto terminado.

### 3.2.4 Configuración de las secuencias de procesamiento

En el Cuadro 19 se muestra los tiempos de procesamiento de cada calibre por secuencias de procesamiento en cada máquina. Se observa que los tiempos de procesamiento está ordenado por calibres en cada secuencia de procesamiento. Algunos calibres tienen más de un tiempo de proceso por lo que siguen una distribución gamma (Anexo 2 y 3).

Cuadro 19. Definición de tiempos de proceso de las secuencias de procesamiento computacional de acuerdo a la cantidad de material, tipo de calibre y proceso.

Secuencias de procesamiento ( $r$ )	Calibre ( $\epsilon$ )	Tiempo de procesamiento (s)		
		Impresión ( $tp_i$ )	Grabado ( $tp_g$ )	Corte ( $tp_c$ )
Secuencias 1-6 ( $m = 50$ kg)	7	5,707	2,508	3,135
	7.6	5,760	1,896	3,104.50
	9	PDF gamma (0.0, 71.77125, 82.93014, 0.0),	2,232	PDF gamma (0.0, 208.06457, 16.57418, 0.0),
	11	5,724	2,712	3,601.40
	15	4,902	PDF gamma (0.0, 681.49526, 5.38815, 0.0)	PDF gamma (0.0, 1229.82158, 3.17729, 0.0),
	17	4,491	PDF gamma (0.0, 2.21324, 1058.62663, 0.0)	2,768.50
	20	3,874	2,052	PDF gamma (0.0, 37.61877, 28.20401, 0.0),
	25	2,846	1,567.50	PDF gamma (0.0, 20.77639, 50.39373, 0.0),
	30	1,818	1,083	1,930.50
	35	2,308	1,269.50	2,814
	39	2,700	1,419	PDF gamma (0.0, 152.98494, 6.26859, 0.0)
	50	2,556	1,829.50	615
	51	PDF gamma (0.0, 12.47254, 150.81126, 0.0)	PDF gamma (0.0, 63.25244, 29.51665, 0.0)	1,332
Secuencias 7-12 ( $m = 100$ kg)	7	11,414	5,016	6,270
	7.6	1,520	3,792	6,209



	9	PDF gamma (0.0, 143.54250, 82.93014, 0.0),	4,464	PDF gamma (0.0, 416.12915, 16.57418, 0.0)
	11	11,448	5,424	7,203
	15	9,803	PDF gamma (0.0, 1362.99052, 5.38815, 0.0),	PDF gamma (0.0, 2459.64315, 3.17729, 0.0)
	17	8,981	PDF gamma (0.0, 4.42649, 1058.62663, 0.0),	5,537
	20	7,747	4,104	PDF gamma (0.0, 75.23757, 28.20401, 0.0)
	25	5,691	3,135	PDF gamma (0.0, 41.55279, 50.39373, 0.0)
	30	3,636	2,166	3,861
	35	4,616	2,539	5,628
	39	5,400	2,838	PDF gamma (0.0, 305.96987, 6.26859, 0.0)
	50	5,112	3,659	1,230
	51	PDF gamma (0.0, 24.94509, 150.81126, 0.0)	PDF gamma (0.0, 126.50487, 29.51665, 0.0).	2,664
<b>Secuencias 13-18</b> <i>(m = material procesado en planta)</i>	7	4,696.6	2,064	2,580
	7.6	10,030.8	2,507.4	4,105.6
	9	PDF gamma (0.0, 17.4960, 1509.52366, 0.0)	1,452.5	PDF gama (0.0, 235.76399, 8.90594, 0.0)
	11	13,738.8	6,509.3	8,644.4
	15	9,290.3	PDF gamma (0.0, 737.99840, 1.09171, 0.0)	PDF gamma (0.0, 3.88449, 400.43896, 0.0)
	17	2,432.1	PDF gamma (0.0, 0.17059, 7125.84026, 0.0)	1,499.5
	20	7,065.8	3,743.1	PDF gamma (0.0, 4.97002, 282.81587, 0.0)
	25	3,852.1	2,122	PDF gamma (0.0, 53.53816, 25.20445, 0.0)
	30	11,482.8	700.8	1,249.2
	35	758.3	417.1	924.6
	39	11,905.8	1,536.3	PDF gamma (0.0, 52.77442, 16.28440, 0.0)
50	10,567.8	13,177.7	4,429.8	

	51	PDF gamma (0.0, 8.88167, 863.89137, 0.0)	PDF gamma (0.0, 510.68856, 2.19899, 0.0)	1,411.8
--	----	--	--	---------

Los parámetros de tiempos de proceso de algunos calibres de las secuencias de procesamiento siguen una distribución gamma (Ecuación 1) y se presentan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Parámetros de la distribución gamma de tiempos de proceso de los calibres de las secuencias de procesamiento.

Secuencias de procesamiento ( $r$ )	Calibre ( $\epsilon$ )	Ubicación	Escala ( $\beta$ )	Forma ( $\alpha$ )	Valor umbral
<b>Impresión</b>					
Secuencias 1-6 ( $m = 50$ kg)	9	0	71.77125	82.93014	0
	51	0	12.47254	150.81126	0
Secuencias 7-12 ( $m = 100$ kg)	9	0	143.51250	82.93014	0
	51	0	24.94509	150.81126	0
Secuencias 13-18 ( $m =$ material procesado en planta)	9	0	17.4960	1,509.52366	0
	51	0	8.88167	863.89137	0
<b>Grabado</b>					
Secuencias 1-6 ( $m = 50$ kg)	15	0	681.49526	5.38815	0
	17	0	2.21324	1,058.62663	0
	51	0	63.25244	29.51665	0
Secuencias 7-12 ( $m = 100$ kg)	15	0	1,362.99052	5.38815	0
	17	0	4.42649	1,058.62663	0
	51	0	126.50487	29.51665	0
Secuencias 13-18 ( $m =$ material procesado en planta)	15	0	737.99840	1.09171	0
	17	0	0.17059	7,125.84026	0
	51	0	510.68856	2.19899	0
<b>Corte</b>					

<b>Secuencias 1-6</b> <i>(m = 50 kg)</i>	9	0	208.06457	16.57418	0
	15	0	1229.82158	3.17729	0
	20	0	37.61877	28.20401	0
	25	0	20.77639	50.39373	0
	39	0	152.98494	6.26859	0
<b>Secuencias 7-12</b> <i>(m = 100 kg)</i>	9	0	416.12915	16.57418	0
	15	0	2459.64315	3.17729	0
	20	0	75.23757	28.20401	0
	25	0	41.55279	50.39373	0
	39	0	305.96987	6.26859	0
<b>Secuencias 13-18</b> <i>(m = material procesado en planta)</i>	9	0	235.76399	8.90594	0
	15	0	3.88449	400.43896	0
	20	0	4.97002	282.81587	0
	25	0	53.53816	25.20445	0
	39	0	52.77442	16.28440	0

## Capítulo 4 Resultados y discusión

### 4.1 Resultados proceso de planta

#### 4.1.1 Comparación de porcentaje de tiempo de actividad evitables e inevitables

En el Cuadro 21 se muestra el comparativo de los procesos impresión, grabado y corte. Se observa que la mayor cantidad 134/195 de actividades registradas en los tres procesos son demoras siendo también en las que se utiliza más tiempo en el proceso debido a que estas actividades forman parte de los desperdicios y falta de planeación que hacen deficiente el proceso. Las actividades de demora son el resultado de falta de estandarización y mala distribución de planta.

La eliminación de las actividades de demora también reduce las actividades evitables debido a que estas actividades son innecesarias para el proceso así mejorando los tiempos en los procesos.

Cuadro 21. Comparativo de los tiempos de las actividades de cada proceso impresión, grabado y corte.

Proceso	Cantidad de actividades				Total de actividades	Distribución de los tiempos de proceso (h)				Acumulado por tiempos de actividades (h)		Tiempo total (h)
	O	T	I	D		O	T	I	D	Ine	Evi	
Impresión	25	5	9	67	106	8.30	1.22	1.21	12.61	11.78	11.60	23.39
Grabado	9	0	1	39	49	0.87	0	0.03	4.47	3.36	2.02	5.38
Corte	9	0	3	28	40	0.38	0	0.31	3.74	1.64	2.78	4.43

Donde: Las actividades son: (O): Operación, (T): Transporte, (I): Inspección, (D): Demora; y el tipo de actividades es: (Ine): Inevitable, (Evi): Evitable.

#### 4.1.2 Resultado de tiempos de los procesos

A partir del estudio de tiempos y movimientos se observó que en el proceso de laminado de papel aluminio comprende de diferentes actividades como son actividades por eventos: operación, transporte, inspección y demora, y a su vez se

divide en actividades inevitables que son las que agregar valor al proceso y evitables que no agregan valor al proceso.

#### **4.1.2.1 Tiempos de actividades inevitables y evitables**

Las actividades inevitables o actividades que agregan valor, se realizan obligadamente y se tienen que realizar como parte del proceso. En la manufactura de laminado de papel aluminio que se analizó, se identificaron para este grupo: como la carga y descarga de materia prima, el transporte a otra máquina, fallos, eliminación de material defectuoso, ajustes de máquina, reemplazo de piezas en la máquina, inspección de material, calibración de la operación de la máquina, limpieza de la máquina, cambio de cuchillas, toma de muestras, revisiones, entre otros.

Las actividades evitables o actividades que no agregan valor son las que no contribuyen al proceso de manufactura como de la misma manera, para el laminado de papel aluminio, se identificaron para este grupo: la espera del técnico, uso de piezas equivocadas, falta de material, búsqueda de herramienta, espera de operador, uso de material defectuoso, paro de operaciones para cambio de turno, preparación de material, actividades propias del operador por mencionar algunas. Estas actividades limitan el desarrollo de los procesos y son causales de paros de proceso o de máquina, o de mantener material en espera entre procesos y se integran a la cadena de desperdicios. Para eliminar esta condición de operación se propone una estrategia de seis acciones de un programa de personal, mantenimiento, cadena de suministro, estandarización de trabajo, comunicación y calidad que se puede ver en la Sección 4.3 Propuesta de mejora.

En la Figura 21 se tiene la comparación del porcentaje de los tiempos evitables e inevitables de los procesos de impresión, grabado y corte. En impresión se tiene un porcentaje de 50.4% de tiempo inevitable y un 49.6% de tiempo evitable. En grabado con un porcentaje de 62.5% de tiempo inevitable y un 37.5% de tiempo evitable. Y por último en corte con un porcentaje de 37.1% de tiempo inevitable y un 62.9% de tiempo evitable.

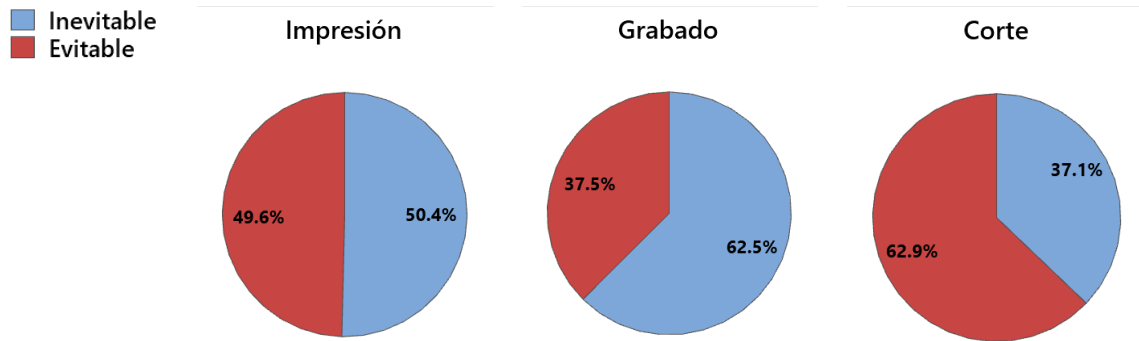


Figura 21. Comparación del porcentaje de tiempos evitables (color rojo) respecto a tiempos inevitables (color celeste) en los procesos de impresión, grabado y corte.

Como se muestra en la Figura 21 son excesivos los tiempos acumulados de las actividades evitables de los tres procesos lo cual hace el sistema ineficiente al tener actividades que no agregan valor al proceso por la falta de estandarización del tiempo de procesamiento. De los tres procesos presentados el corte es el que presentó más ineficiencia esto debido a que el 62.9% de sus actividades son evitables, lo que indica que son actividades innecesarias para el proceso, pero se realizan por falta de planeación, estandarización del proceso y deficiente distribución de planta. Estas actividades se pueden eliminar con un programa de mantenimiento, planeación y personal.

#### 4.1.2.2 Comparación de actividades por cada proceso

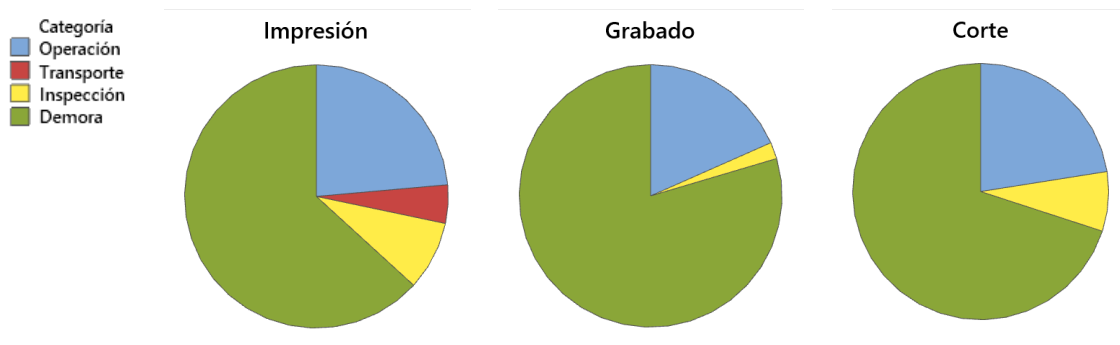


Figura 22. Distribución de tiempos de las actividades por proceso.

En la Figura 22 se comparó la distribución del tiempo de las actividades operación, transporte, inspección y demora. En los tres procesos la mayor cantidad de actividades son demoras siendo en el proceso de grabado el que consume la mayor cantidad de las actividades, Y se comprueba que la fracción en verde en cada

gráfica que son las actividades de demora son en las que consumen mayor tiempo al operador, como es ir a buscar al operador, supervisor o herramientas, no tener orden de trabajo las cuales son un desperdicio. Estas actividades son también debido a que la distribución de planta no está organizada de acuerdo al flujo del proceso, así como las distancias extensas entre máquinas que son de alrededor de 15 a 40 metros para el desplazamiento entre procesos.

#### 4.1.3 Comparación de tiempos de procesamiento

La variabilidad de los tiempos de duración de cada proceso, normalizados a un kilo de material y de acuerdo al calibre, se muestran en la Figura 23. Se observa que los calibres más delgados en los tres procesos demandan mayor tiempo de procesamiento, más visible en el proceso de impresión. Esta diferencia de los tiempos de procesamiento se debe a que en los calibres delgados es más frecuente tener problemas durante el proceso porque aumenta la probabilidad de que se rompa o se formen agujeros como lo menciona Keles y Dunder (2007), hay más riesgos de defectos en el laminado como las roturas, burbujas, rizado, arrugas, telescopio, etc. (Wilmer, 2018).

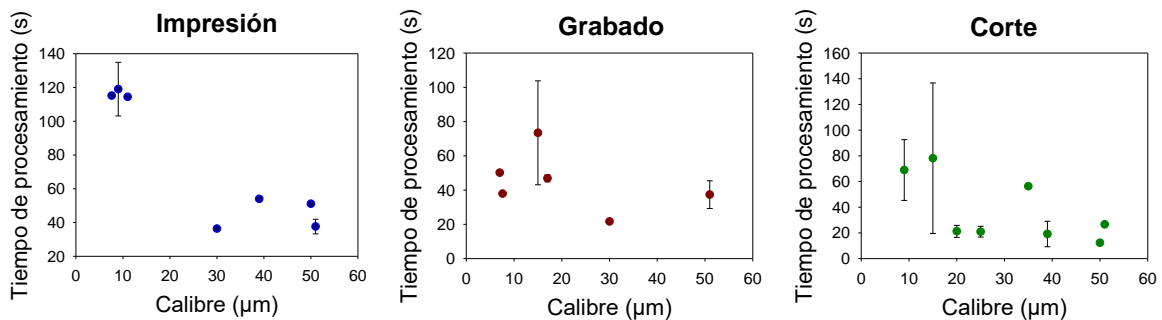


Figura 23. Variabilidad de los procesos de impresión, grabado y corte de acuerdo a la familia (calibre) en el laminado de papel aluminio.

#### 4.1.4 Comparación de tiempos por procesos

En el Cuadro 22 se muestra la información estadística de los tiempos de procesos medidos en planta (total de corridas, media, desviación estándar, mínimo, máximo y el rango de las variables del proceso: tiempo de carga, descarga, rotura, contacto, ciclo total, velocidad, material procesado y cantidad de material por ciclo). Estas

variables se alimentan al software para simular el proceso. Se observa amplia dispersión de los rangos de las variables mostradas para los tres procesos, en especial en el tiempo de ciclo total, en el proceso de impresión (proceso más tardado) el tiempo medio es de 253.2 min (3.87 h) y un rango de 326.4 min (5.44 h) entre el valor mínimo y el máximo. Esta dispersión de valores confirma la falta de estandarización del proceso.

Cuadro 22. Estadística de las variables de los procesos de impresión, grabado y corte de laminado de papel aluminio.

Variable	Total de corridas (n)	Media ( $\bar{x}$ )	Desviación estándar ( $\sigma$ )	Valor mínimo ( $x_{min}$ )	Valor máximo ( $x_{max}$ )	Rango (R)	
<b>Proceso de impresión</b>							
Tiempo carga (min)	10	8.255	2.053	6.98	11.23	4.25	
Tiempo descarga (min)	10	6.732	1.42	5.85	8.79	2.94	
Tiempo contacto (min)	10	238.2	130.5	110.7	434.2	323.5	
Tiempo de ciclo total (min)	10	253.2	131.2	123.5	450	326.4	
Velocidad (m/min)	10	29.39	4.9	23	39.3	16.3	
Material procesado	kg/min	10	0.972	0.518	0.447	1.74	1.293
	min/kg	10	1.339	0.67	0.576	2.238	1.662
Cantidad de material	m	10	6,415	4,941	2,552	13,894	11,343
	kg	10	203.2	64.7	87.1	315.8	228.7
<b>Proceso de grabado</b>							
Tiempo carga (min)	13	1.461	1.414	0.1	3.49	3.39	
Tiempo descarga (min)	13	3.719	1.588	1.39	6.88	5.49	
Tiempo roturas (min)	13	2.89	3.79	0.19	11.15	10.96	
Tiempo contacto (min)	13	11.29	9.94	1.65	30	28.35	
Tiempo de ciclo total (min)	13	19.36	14.79	3.81	43.31	39.5	
Velocidad (m/min)	13	41.04	21.06	16.8	75.3	58.5	
Material procesado	kg/min	13	1.384	0.638	0.626	2.782	2.156
	min/kg	13	0.875	0.429	0.361	1.76	1.399
Cantidad de material	kg	13	30.43	27.93	2.22	94.77	92.55
<b>Proceso de corte</b>							
Tiempo carga (min)	15	1.494	0.698	0.82	3.03	2.21	
Tiempo descarga (min)	15	4.249	1.862	2.4	9.9	7.5	
Tiempo roturas (min)	15	1.427	1.97	0	7.4	7.4	
Tiempo contacto (min)	15	19.02	12.09	6.2	53.5	47.3	
Tiempo de ciclo total (min)	15	26.19	15.52	10.41	73.83	63.42	
Velocidad (m/min)	15	61.33	30.12	25	135	110	
Material procesado	kg/min	15	2.503	1.407	0.506	4.875	4.369
	min/kg	15	0.614	0.508	0.202	1.994	1.792
Cantidad de material	kg	15	68.3	83.2	12.4	360.1	347.8



#### 4.1.5 Comparación de tiempos de planta con los resultados de simulación en Flexsim

En el Cuadro 23 se muestra la comparación del rango de tiempos de proceso en planta (Mujica, 1999) con los que se obtuvieron por simulación en Flexsim. Los resultados de la simulación son aceptables debido a que los tiempos de procesamiento siguen una función de distribución gamma y los tiempos mínimos y máximos se encuentran dentro de los rangos de los tiempos de planta como es en impresión y en el rango de planta 326.5 min y el rango de simulación de 331.76 min son similares con una diferencia de 5.26 min.

Cuadro 23. Comparativo de rango de tiempos de proceso en planta respecto a los datos obtenidos por simulación.

Proceso	Planta			Simulación		
	$t_{min}$ (min)	$t_{max}$ (min)	Rango	$t_{min}$ (min)	$t_{max}$ (min)	Rango
Impresión	123.5	450	326.5	86.22	417.98	331.76
Grabado	3.81	43.31	39.5	3.73	44.79	41.06
Corte	10.41	73.83	63.42	15.33	43.70	28.37

#### 4.1.6 Modelo de interacción de factores

A partir del análisis del proceso se desarrolló un modelo que permita sugerir la dependencia del tiempo total del proceso de laminado de papel aluminio en función de los siete factores que intervienen en el proceso, cada uno con diferentes niveles, y su interacción entre si (Figura 24). Dicho modelo considera la cantidad de material, el tiempo de cada proceso, secuencias de procesamiento, cantidad de defectos, factor humano, ancho de rollo y el espesor de calibre. Estos factores se detectaron durante el análisis del flujo del proceso y el tiempo de procesamiento.

La cantidad de material por el impacto que tiene la variabilidad de la cantidad de material procesado por rollo de papel aluminio. El tiempo de cada proceso es diferente en cada uno por lo que interviene en la utilidad de la maquinaria. Las secuencias de procesamiento que se compone de seis propuestas aleatorias del orden de los calibres para procesar. La cantidad de defectos no están definidos,

pero ocurren durante el proceso de laminado. El factor humano tiene tres componentes, se integra por la intervención de los operadores, el mantenimiento, y la gestión del proceso. El ancho de rollo se considera parte de la falta de estandarización. El espesor de calibre es importante debido a que se incrementa el tiempo cuando el calibre es más delgado

Dicho modelo sugiere que la duración del tiempo de procesamiento es sensible a la variabilidad multifactorial, por lo que predecir la duración del proceso, o de sus etapas es complejo.

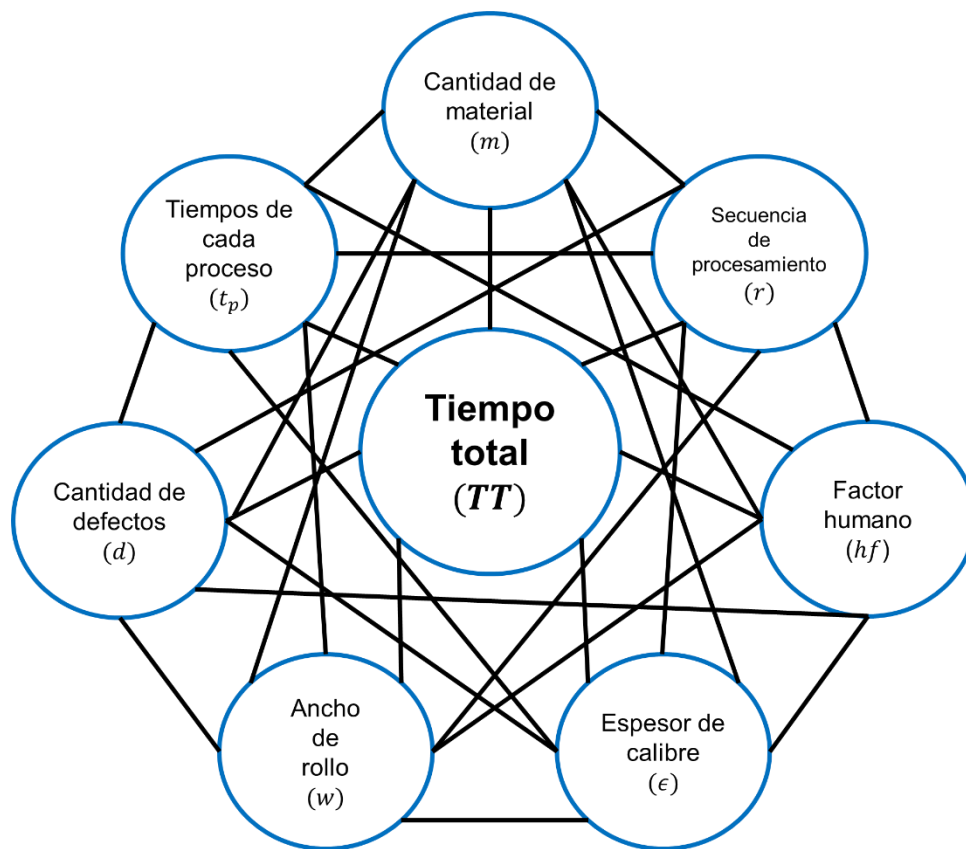


Figura 24. Modelo para determinar el tiempo total de procesamiento de laminado de papel aluminio en función de los factores, sus niveles e interacción. Fuente: elaboración propia.

El modelo para determinar el tiempo total de procesamiento de laminación de papel aluminio está determinado por la función ( $\mathcal{F}$ ) mostrada en la ecuación 2.

$$TT = \mathcal{F}(m, t_p, r, d, hf, w, \epsilon, ) \quad (2)$$

Donde:

$TT$ : tiempo total (h)

$m$ : cantidad de material (kg)

$t_p$ : tiempo de duración de cada proceso (min)

$r$ : secuencia de procesamiento (-)

$d$ : cantidad de defectos (u)

$hf$ : factor humano (-)

$w$ : ancho de rollo (mm)

$\epsilon$ : espesor de calibre ( $\mu\text{m}$ )

Sin embargo, cada factor presenta diferentes niveles, según se muestra mediante vectores mostrados a continuación.

Los términos de la cantidad de material ( $m$ ) está dada por la Ecuación (3)

$$m = \mathcal{F}(\epsilon, p) \quad (3)$$

$\epsilon$ : espesor de calibre (7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 30, 35, 39, 50, 51) ( $\mu\text{m}$ ).

$p$ : tipo de proceso (impresión, grabado y corte).

La dependencia del tiempo de proceso ( $t_p$ ) está dada por la Ecuación (4)

$$t_p = \mathcal{F} \begin{pmatrix} t_{pi} \\ t_{pg} \\ t_{pc} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$t_{pi}$ : tiempo de proceso de impresión (123.5, ..., 450) (min).

$t_{pg}$ : tiempo de proceso de grabado (3.8, ..., 43.3) (min).

$t_{pc}$ : tiempo de proceso de corte (10.4, ..., 73.8) (min).

Los términos de la secuencia de procesamiento ( $r$ ) está dada por la Ecuación (5)

$$r = \mathcal{F}(\epsilon, t_p) \quad (5)$$

$\epsilon$ : espesor de calibre (7. 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 30, 35, 39, 50, 51) ( $\mu\text{m}$ ).

$t_p$ : tiempo de cada proceso (3.8, ..., 450) (min).

Los términos de la cantidad de defectos ( $d$ ) está dada por la Ecuación (6)

$$d = \mathcal{F}(\epsilon, p) \quad (6)$$

$\epsilon$ : espesor de calibre (7. 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 30, 35, 39, 50, 51) ( $\mu\text{m}$ ).

$p$ : tipo de proceso ( $p_i$ : impresión,  $p_g$ : grabado y  $p_c$ : corte).

Los términos del ancho de rollo ( $w$ ) está dada por la Ecuación (7)

$$w = \mathcal{F}(p, f_p) \quad (7)$$

$p$ : tipo de proceso ( $p_i$ : impresión,  $p_g$ : grabado y  $p_c$ : corte).

$f_p$ : familia de producto (50, 83, 101, 107, 113, 115, 120, 133, 139, 140, 165, 168, 188, 192, 200, 201, 235, 280, 281, 289, 330, 334 y 449).

Los términos del espesor de calibre ( $\epsilon$ ) está dada por la Ecuación (8)

$$\epsilon = \mathcal{F}(f_p) \quad (8)$$

$f_p$ : familia de producto (50, 83, 101, 107, 113, 115, 120, 133, 139, 140, 165, 168, 188, 192, 200, 201, 235, 280, 281, 289, 330, 334 y 449).

#### **4.1.7 Comparación de cantidad de material procesado en las secuencias de procesamiento por simulación.**

En la Figura 25 se muestra la comparación de la producción de cantidad de material procesado de acuerdo a las secuencias de procesamiento con un tiempo de

simulación de 48 h. Las secuencias de procesamiento de rollos de 50 kg son las que producen mayor cantidad de material siendo de 2 a 2.4 ton, mientras que las secuencias de procesamiento de rollos de 100 kg producen la cantidad de material de 1.7 a 2.2 ton y las secuencias de procesamiento de rollos con cantidad procesada en planta son las que producen menor cantidad de material siendo de 0.9 a 1.6 ton. Con esto se comprobó que las secuencias de procesamiento de rollos de 50 kg son las que producen mayor cantidad de material respecto a las otras cantidades de material en un tiempo de 48 h (Anexo 8, 9 y 10).

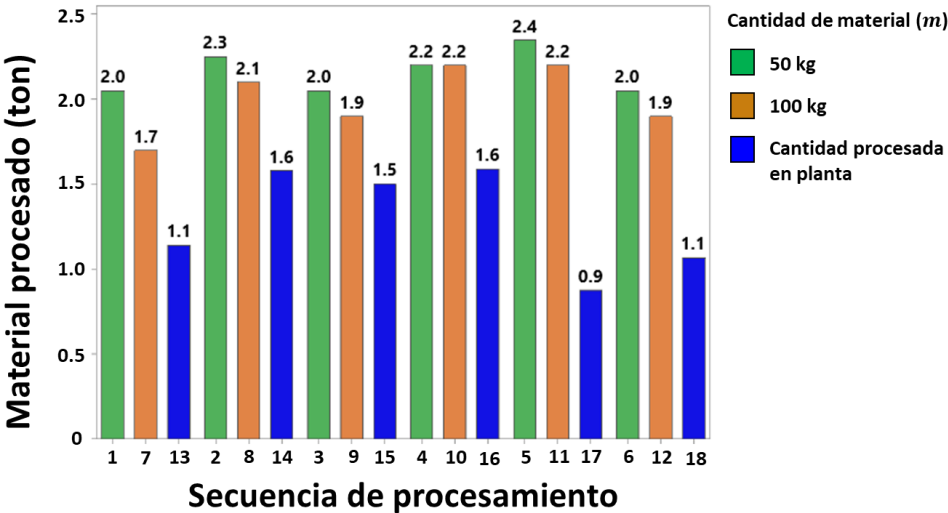


Figura 25. Comparación de la producción de acuerdo a la secuencia y cantidad de material procesado en 48 h por simulación.

#### 4.1.8 Inventario de material procesado

En el Cuadro 24 se muestra el inventario de material procesado en un ciclo del proceso por secuencia de procesamiento. Se observa que la mayor cantidad de material procesado se obtiene en las secuencias de procesamiento 1 al 12, con un intervalo de 16 h a 21 h en las secuencias 1 al 6 con la cantidad de material (0.65 ton a 0.95 ton) y un intervalo de 31 h a 42 h en las secuencias 7 al 12 con la cantidad de material (1.30 ton a 1.90 ton). La menor cantidad de material procesada (1.01 ton a 1.62 ton) es de las últimas 6 secuencias de procesamiento 13 al 18 en las que su tiempo de un ciclo supera las 30 h, las cantidades de material procesadas en cada proceso se reducen en mayor cantidad a comparación de las otras secuencias y esto se debe a que las cantidades de material en los rollos es diferente por calibre y proceso.

Cuadro 24. Simulación computacional del material por ciclo por cada secuencia de procesamiento.

Secuencia	Cantidad de rollos que iniciaron el ciclo	Cantidad de rollos procesados en impresión	Total de material procesado en impresión (ton)	Cantidad de rollos procesados en grabado	Total de material procesado en grabado (ton)	Cantidad de rollos procesados en corte	Cantidad de rollos en un ciclo completo	Total de material procesado en un ciclo completo (ton)	Duración del ciclo (h)
1	15	14	0.70	13	0.65	13	13	0.65	16
2	16	15	0.75	14	0.70	13	13	0.65	16
3	15	14	0.70	13	0.65	13	13	0.65	16
4	21	20	1.00	19	0.95	19	19	0.95	21
5	22	21	1.05	19	0.95	19	19	0.95	21
6	14	14	0.70	13	0.65	13	13	0.65	16
7	14	13	1.30	13	1.30	13	13	1.30	31
8	16	15	1.50	14	1.40	13	13	1.30	32
9	15	14	1.40	13	1.30	13	13	1.30	32
10	21	20	2.00	19	1.90	19	19	1.90	42
11	21	20	2.00	19	1.90	19	19	1.90	41
12	14	14	1.40	13	1.30	13	13	1.30	32

13	15	14	1.81	14	1.10	13	13	1.01	37
14	14	13	1.77	13	1.06	13	13	1.01	35
15	15	13	1.81	13	1.06	13	13	1.01	35.5
16	20	19	2.56	19	1.67	19	19	1.59	48
17	21	20	2.96	20	1.70	19	19	1.62	54
18	14	13	1.77	13	1.06	13	13	1.01	35.5

## 4.2 Simulación computacional de las secuencias de procesamiento

### 4.2.1 Simulación del proceso de planta en Flexsim

En la Figura 26 se muestra el porcentaje de utilidad de la maquinaria en la simulación de la secuencia del proceso de planta con los 13 calibres, con la secuencia de procesamiento aleatoria y  $m$ = cantidad procesada en planta. Se observa que el mayor porcentaje de utilidad es en impresión con el 96.9% mientras que la utilidad de grabado es 5.4% y la utilidad de corte es 10.6%. Esta información sugiere que el tiempo de inactividad es mayor en los procesos de grabado (94.6%) y corte (89.4%) respecto al de impresión (3.1%) y tienen que esperar que el proceso anterior termine para continuar con el flujo esto genera un desperdicio de espera de material. Para incrementar el tiempo de utilidad de los procesos de grabado y corte se simularon secuencias de procesamiento de calibres y la cantidad de material por rollo.

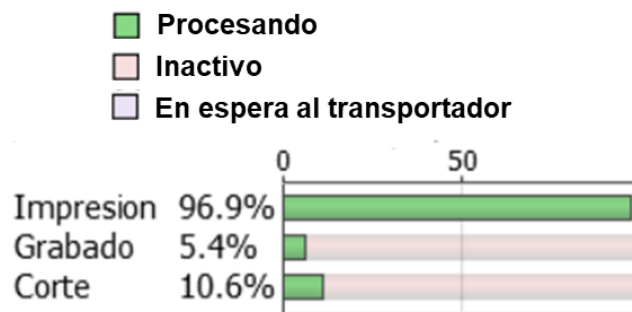


Figura 26. Gráfica de porcentaje del modelado computacional de la utilización de las máquinas.

### 4.2.2 Utilidad de maquinaria de las secuencias de procesamiento por simulación computacional.

En el Cuadro 25 se muestra la utilidad de la maquinaria de las 18 secuencias de procesamiento con un tiempo de simulación de 48 h. En las secuencias con la cantidad de material fija de 50 kg (del 1 al 6) la utilidad es más del 96% para la impresión, mientras que la utilidad de grabado es más de 45%, la utilidad de corte es más de 50%. En las secuencias de la cantidad de material fija de 100 kg (del 7 al 12) el porcentaje de utilidad de la maquinaria se comporta de la misma manera



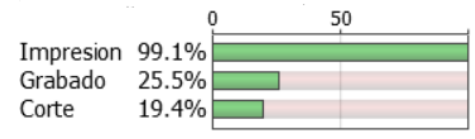
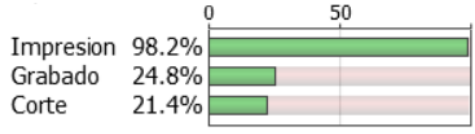
que las secuencias de cantidad de material de 50 kg. En el caso de las secuencias de procesamiento de cantidad de material procesado en planta (del 13 al 18) la utilidad es más del 97% para la impresión, mientras que la utilidad de grabado es más de 24%, la utilidad de corte es más de 21%. El porcentaje de utilidad de grabado y corte es menor en las secuencias (13 al 18) con respecto a las secuencias (1 al 12).

Esto puede deberse a que la simulación se basó en la estandarización de la cantidad de material procesado para cada calibre en las secuencias 1 al 12 y no fue considerado el factor humano (*hf*) o alguna otra intervención, esto hace que estas condiciones permitan el aumento del flujo del proceso del tiempo de utilidad y del material procesado.

Cuadro 25. Utilidad de maquinaria por secuencia de procesamiento estimada mediante simulación Flexsim por un periodo de 48 h en el laminado de papel aluminio.

Escenarios	Secuencia de procesamiento de calibres (familias)	Cantidad de material (kg)	Utilidad de la maquinaria		
			Procesando	Inactivo	En espera al transportador
1	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	50 kg	Impresion	97.7%	
2	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.		Grabado	48.5%	
			Corte	54.3%	
3	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.		Impresion	97.4%	
4	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.		Grabado	49.2%	
		Corte	56.1%		
5	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.	Impresora	97.6%		
		Grabado	51.5%		
		Corte	49.7%		

6	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.		<p>Impresion 96.6%</p> <p>Grabado 48.9%</p> <p>Corte 55.1%</p>
7	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	100 kg	<p>Impresion 96.0%</p> <p>Grabado 49.1%</p> <p>Corte 52.2%</p>
8	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.		<p>Impresion 99.2%</p> <p>Grabado 50.0%</p> <p>Corte 54.5%</p>
9	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.		<p>Impresion 97.1%</p> <p>Grabado 48.2%</p> <p>Corte 53.1%</p>
10	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.		<p>Impresion 98.3%</p> <p>Grabado 45.2%</p> <p>Corte 50.9%</p>
11	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.		<p>Impresion 97.1%</p> <p>Grabado 53.6%</p> <p>Corte 50.3%</p>
12	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.		<p>Impresion 96.4%</p> <p>Grabado 47.8%</p> <p>Corte 54.6%</p>
13	7, 7.6, 9, 11, 15, 17, 20, 25, 30, 35, 39, 50 y 51.	Cantidad procesada en planta	<p>Impresion 97.9%</p> <p>Grabado 26.1%</p> <p>Corte 24.0%</p>
14	51, 50, 39, 35, 30, 25, 20, 17, 15, 11, 9, 7.6 y 7.		<p>Impresion 98.6%</p> <p>Grabado 33.5%</p> <p>Corte 24.0%</p>
15	7, 51, 7.6, 50, 9, 39, 11, 35, 15, 30, 17, 25 y 20.		<p>Impresion 99.4%</p> <p>Grabado 33.4%</p> <p>Corte 25.8%</p>
16	9, 20, 20, 7.6, 51, 51, 11, 25, 25, 7, 39, 39, 15, 50, 50, 17, 35, 35 y 30.		<p>Impresion 98.9%</p> <p>Grabado 33.2%</p> <p>Corte 24.9%</p>

17	15, 30, 30, 11, 51, 51, 9, 25, 25, 7, 39, 39, 7.6, 20, 20, 35, 50, 50 y 17.	 <p>0 50</p> <p>Impresion 99.1%</p> <p>Grabado 25.5%</p> <p>Corte 19.4%</p>
18	9, 30, 7.6, 51, 11, 35, 7, 50, 15, 39, 17, 25 y 20.	 <p>0 50</p> <p>Impresion 98.2%</p> <p>Grabado 24.8%</p> <p>Corte 21.4%</p>

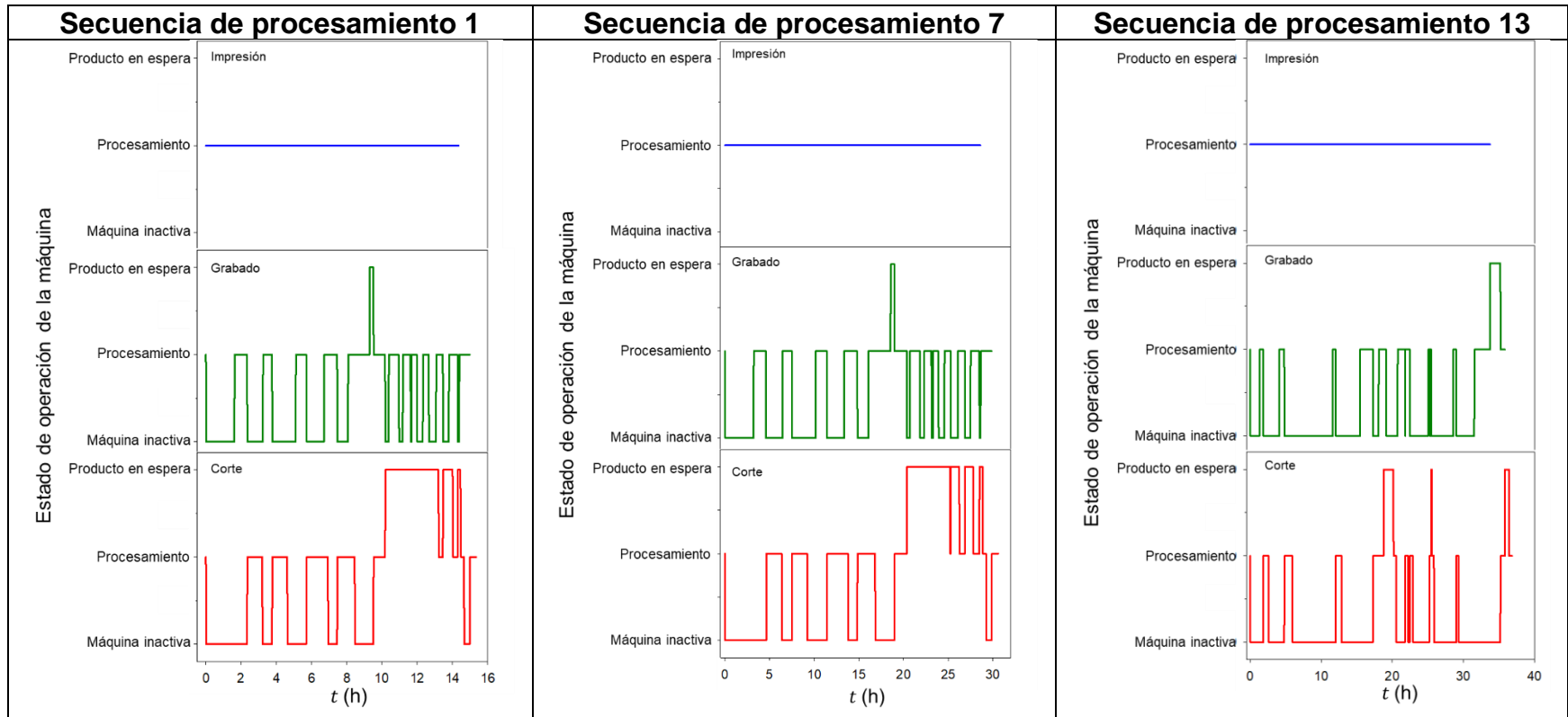
### 4.2.3 Estado de operación de la maquinaria

En el Cuadro 26 se muestra la comparación del estado de operación de la maquinaria de un ciclo de proceso de las secuencias de procesamiento 1, 7 y 13, las cuales tienen el mismo orden de procesamiento de los calibres.

En las tres secuencias de procesamiento la máquina de impresión se mantiene constante procesando material o producto (procesamiento), esto se debe a que se procesa con un orden de entradas entre cada rollo la materia prima y al ser el primer proceso este no tiene tiempos de espera e inactividad entre el procesamiento de rollos de papel aluminio. En las máquinas de grabado y corte se observan tiempos de espera (producto en espera) y tiempos de inactividad (máquina inactiva) por lo que su estado es variable y esto se debe a los tiempos de procesamiento son diferentes en cada máquina y tienen que esperar a que el material o producto realice su flujo por cada máquina.

En las secuencias de procesamiento 1 y 7 el comportamiento del estado de las máquinas es el mismo en grabado y corte, mientras en la secuencia de procesamiento 13 se comporta de diferente manera, con menos tiempo de espera (producto en espera) en grabado y con más tiempo de inactividad (máquina inactiva) en grabado y corte.

Cuadro 26. Estado de operación de la maquinaria de las secuencias de procesamiento 1, 7 y 13.



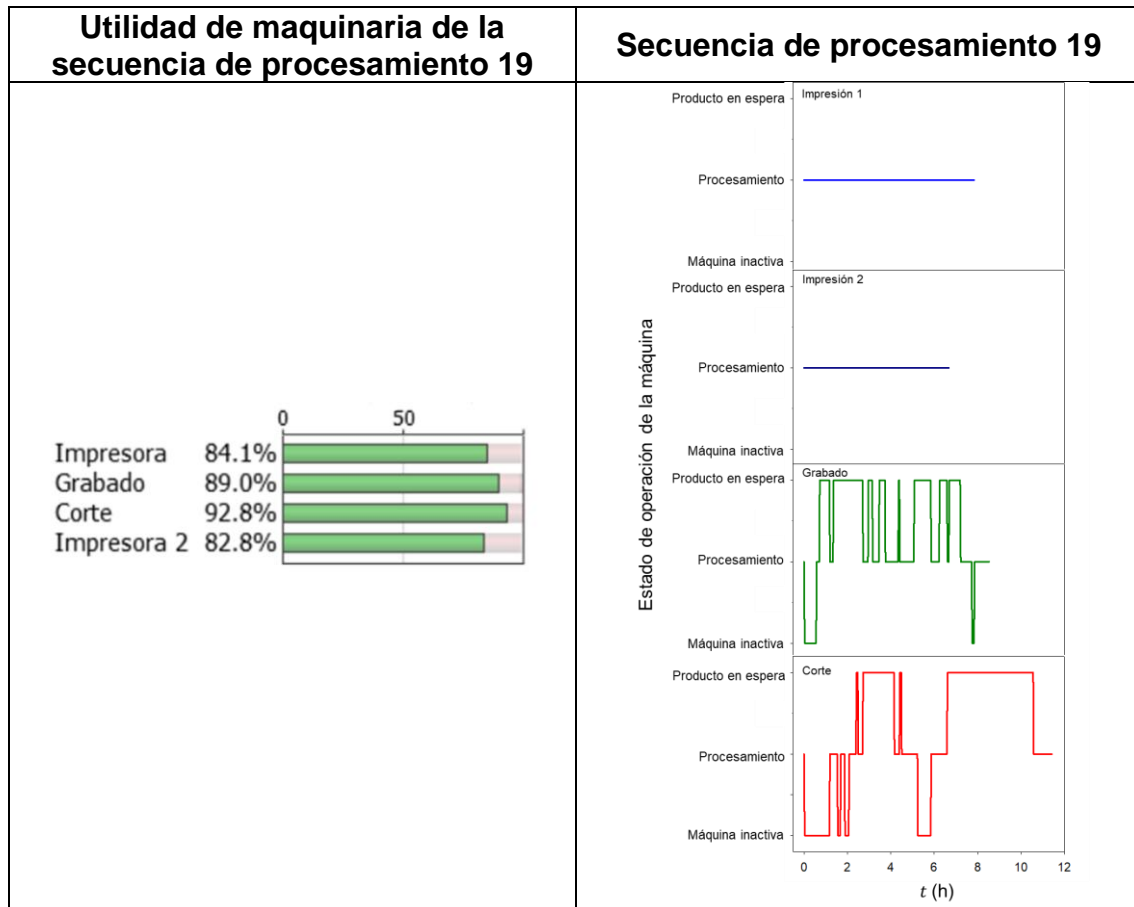
### 4.3 Propuesta de mejora

Se realizó la simulación de la secuencia de procesamiento 19 con dos impresoras con la cantidad de material de 50 kilos y el orden de procesamiento del calibre más grueso al más delgado.

En el Cuadro 27 se muestra la utilidad de la maquinaria en un tiempo de 48 h y el estado de operación de la maquinaria de un ciclo de proceso de la secuencia de procesamiento 19. La utilidad de la maquinaria es más del 80% con dos impresoras, en grabado la utilidad es de 89% y en corte la utilidad es 92.8%.

En el estado de operación de la maquinaria, las dos impresoras se mantienen constantes en procesamiento, mientras en grabado y corte es más el tiempo de espera (producto en espera) y menos el tiempo de inactividad (máquina inactiva).

Cuadro 27. Utilidad de maquinaria por un periodo de 48 h y el estado de operación de la maquinaria de la secuencia de procesamiento 19.



En el Cuadro 28 se obtuvo con base al análisis de simulación de 19 secuencias de procesamiento y la de planta.

La productividad de planta es la más baja con un 0.4, las secuencias de procesamiento de 13 al 18 tienen una productividad en un intervalo de 0.66 a 0.80, mientras las secuencias de 1 al 12 tienen una productividad en un intervalo de 0.98 a 1.11.

El efecto de la productividad respecto a la cantidad de material y el orden de procesamiento mediante simulación estiman una productividad de hasta 1.36 en la secuencia de procesamiento 19.

Cuadro 28. Comparación de tiempos y material procesado de las secuencias modeladas en Flexsim por ciclo.

Secuencia de procesamiento (r)	Producto en espera (h)		Máquina inactiva (h)		Total de rollos con ciclo completo	Total de material procesado con ciclo completo (ton)	Tiempo de ciclo (h)	Productividad (ton/d)
	Grabado	Corte	Grabado	Corte				
Planta	0	0	57.15	55.07	13	1.01	61	0.40
1	0.22	3.75	7.08	5.88	13	0.65	16	0.98
2	0	1.19	7.08	6.58	13	0.65	16	0.98
3	1.16	4.75	7.05	6.44	13	0.65	16	0.98
4	1.30	5.13	8.47	9.05	19	0.95	21	1.09
5	1.66	4.97	8.72	8.72	19	0.95	21	1.09
6	0.88	4.80	7.05	6.18	13	0.65	16	0.98
7	0.44	7.16	14.13	11.72	13	1.30	31	1.01
8	0	2.30	14.25	12.80	13	1.30	32	0.98
9	2.38	9.5	14	12.63	13	1.30	32	0.98
10	2.66	9.89	16.83	17.38	19	1.90	42	1.09
11	3.36	10.33	17.25	16.75	19	1.90	41	1.11
12	1.86	10.08	13.97	12.22	13	1.30	32	0.98
13	1.44	2.13	24.5	27.36	13	1.01	37	0.66
14	1.11	1.19	23.08	25.55	13	1.01	35	0.69
15	1.58	2.58	23.58	25.77	13	1.01	35.5	0.68
16	5.91	4.55	28.66	35.55	19	1.59	48	0.80
17	5.22	2.69	34.41	40.80	19	1.62	54	0.72
18	2.75	3.11	23.58	25.75	13	1.01	35.5	0.68
19	4.02	5.58	0.66	2.11	13	0.65	11.5	1.36

\*Los datos de las secuencias de procesamiento sombreadas en azul corresponden a las presentadas en sección 3.2.3 Estado de operación de la maquinaria.

En el Cuadro 28 se muestran las propuestas de simulación, la simulación de planta tiene una productividad de 0.4 con un ciclo de 61 h y un total de 13 rollos (1.01 ton), no se registran productos en espera, pero el 90% del tiempo es inactivo en grabado y corte. Basado en el análisis de tiempos y el material procesado la mejor secuencia

de procesamiento es la 2 con una productividad de 0.98, tiempo de ciclo de 16 h con un total de 13 rollos (0.65 ton), también con 7% de producto en espera en corte y 40% de máquina inactiva en grabado y corte, sugiere que de efectuarse los cambios en planta podría aumentar 40% la utilidad de la maquinaria de grabado y corte manteniendo las mismas condiciones de infraestructura, maquinaria o mano de obra.

El análisis del desempeño de las etapas de la manufactura de laminado de papel aluminio permitió identificar actividades evitables en el proceso de impresión, grabado y corte. La eliminación de dichas actividades con parte de la filosofía de trabajo de manufactura esbelta y los principios básicos de distribución de planta de la metodología planificación sistemática de diseño (SLP) (Muther, 1970). La identificación y eliminación de todo tipo de desperdicios, para el aprovechamiento del tiempo de uso de maquinaria aumentando un 40% en grabado y corte, reducir los tiempos de espera a un 7% del tiempo con producto en espera de corte, los movimientos, el sobre-procesamiento, los traslados y los productos con defecto (Hernández y Vizán, 2013; Madariaga, 2013). La estrategia que se propone como recomendación se conforma por seis acciones y se enfoca en eliminar actividades no necesarias, tal como se describe a continuación.

#### **Implementación de un programa de capacitación al personal de planta.**

Este programa permitirá que los operadores de la maquinaria atiendan de manera diligente operaciones las relacionadas al mantenimiento y ajuste de las máquinas, manejo de material y en general, realización de actividades de mantenimiento autónomo de las máquinas, entre otras. Se puede eliminar el tiempo de actividades en un 24% en impresión, el 32% en grabado y 51% en corte.

#### **Implementación de un programa efectivo de mantenimiento.**

Este programa debe considerar y verificar la ejecución de mantenimiento preventivo y correctivo oportuno de toda la maquinaria y equipo. Su efecto se verá traducido en prevención de fallas no esperadas y evitar demoras o paros del proceso. Se puede eliminar el tiempo de actividades en un 22% en impresión y el 10% en corte.

### **Mejoramiento del aprovisionamiento en la cadena de suministro.**

La elaboración de un plan efectivo de distribución de insumos, materia prima y la instalación de una estación cercana al área de trabajo que esté abastecida con herramientas indispensables herramientas. Esta acción evitará la distracción de los operarios, el abandono de su área de trabajo y la falta de atención al proceso. Se puede eliminar el tiempo de actividades en un 3% en impresión y 2% en corte.

### **Implementación de un plan de estandarización de trabajos.**

Este plan permitirá la homologación del desarrollo de actividades de los procesos, y permitirá que todos los operadores que intervienen en la operación de maquinaria y manejo de material realicen sus actividades de manera homogénea y oportuna.

### **Implementación de un sistema de comunicación efectiva.**

Un sistema de comunicación por radio, por internet, apoyado con focos de colores o sonidos, evitará que operador requiera trasladarse para comunicarse con el supervisor o con el personal de mantenimiento.

### **Sistema de muestreo y verificación programado.**

Se refiere a la implementación de un sistema coordinado para la toma de muestras para el aseguramiento de la calidad del producto, de manera que el muestreo no provoque paros excesivos. Con este sistema se puede eliminar el tiempo de actividades en un 5% en impresión, 5% en grabado y 7% en corte.

Se asume que la implementación coordinada de esta estrategia debe reducir la variabilidad del tiempo de procesamiento en cada proceso e impactar en la reducción de paros, disminución de material defectuoso, eficiencia del uso de la maquinaria, aumento del número de piezas procesadas, entre otros. De esta manera, la estimación de los tiempos de producción maximizando la eliminación total de actividades evitables permite un impacto en la productividad del proceso. En porcentaje, la reducción estimada de los tiempos evitables en el proceso son 50% en el tiempo de impresión, 38% en el tiempo de grabado y 63% en el tiempo



en el corte. El beneficio de la propuesta mejora el aumento de la productividad a 0.98, el tiempo de producción a 50% en grabado y corte, 50% de incremento en la cantidad de rollos procesados y reduce los tiempos de inactividad en un 50%.

## Conclusiones

Se desarrolló un modelo computacional del proceso de laminado de papel aluminio en Flexsim, basado en herramientas estadísticas para análisis de datos y de manufactura esbelta para el análisis de las actividades, que permitió aumentar la eficiencia de operación mediante el incremento de la productividad, la reducción los tiempos de inactividad de la maquinaria, eliminación de desperdicios, planeación de la secuencia de procesamiento y estandarización de material procesado.

Se logró una propuesta de mejora de la eficiencia de la operación del proceso de laminado de papel aluminio con el análisis de las actividades del proceso y el modelo computacional, se desarrollaron y analizaron diferentes escenarios que se reducen los tiempos de inactividad de la maquinaria, planeación de la secuencia de procesamiento y aumento de la productividad del proceso. Se seleccionó el mejor escenario y una estrategia de implementación para la eliminación de desperdicios.

Se identificaron las actividades evitables e inevitables que se realizan en cada proceso y las variables críticas del proceso. Basado en las variables críticas se construyó y analizó el modelo de simulación del proceso de planta, con el resultado del análisis se realizó un modelo de interacción de los factores para la propuesta de las 19 secuencias de procesamiento basado en el orden de procesamiento y cantidad de material. Se desarrollaron y analizaron los modelos de simulación de las secuencias y de planta, se comparó la cantidad de material procesado, utilidad de la maquinaria, los tiempos de producto en espera, inactividad de la maquinaria, el tiempo de ciclo y la productividad del proceso.

Los resultados del análisis de las secuencias de procesamiento del trabajo, la manufactura esbelta y planificación sistemática de diseño (SLP) proponen la implementación de la secuencia de procesamiento 2 y un programa que consta de seis acciones enfocadas en el personal, mantenimiento, cadena de suministro, estandarización de trabajo, comunicación y calidad, para eliminar tiempos que no agregan valor, mejora la planeación de la producción y disminuyen los tiempos de máquina inactiva o tiempos muertos (57 h en grabado y 55 h en corte), con un

aumento en la productividad a 0.98 y la utilidad a 50% de las máquinas de grabado y corte del proceso, considera una producción que inicia en el procesamiento del calibre más grueso (51  $\mu\text{m}$ ) al más delgado (7  $\mu\text{m}$ ) con rollos de 50 kilos de material, se logrará una producción total de 0.65 ton en un ciclo de 16 h en la manufactura de laminación de papel aluminio.

## **Trabajo futuro**

Se sugiere a continuar con el desarrollo de simulación en los demás procesos que son parte de la manufactura de laminación de papel aluminio, tales como, laqueado, laminación y encerado. Si se analiza todo el proceso en conjunto se logra un mejor flujo del proceso que agregue valor al producto mejorando la productividad con la reducción de tiempos de producto en espera, tiempos de máquina inactiva para lograr la competitividad en el mercado.

## Referencias

- Alliance Packaging Group. (s.f.). *Foil de aluminio*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021, de <https://www.apgglobe.com/foil-de-aluminio-2/>
- Antonelli, D., Litwin, P., y Stadnicka, D. (2018). Multiple system dynamics and discrete event simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP*, 78, 178-183.
- ATSDR. (2008). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021, de Resumen de Salud Pública. Aluminio: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs22.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs22.pdf)
- AutoMod. (s.f.). *AutoMod*. Recuperado el 23 de Abril de 2021, de AutoMod: <http://www.automod.se/eng/home.html>
- Baca, G. U., Cruz, M. V., Cristóbal, I. M., Baca, G. C., Pacheco, A. A., Rivera, A. E., . . . Obregón, M. G. (2014). *Introducción a la ingeniería industrial* (Segunda ed.). Ciudad de México: Grupo editorial patria.
- Bartkowiak, T., y Pawlewski, P. (2016). Reducing negative impact of machine failures on performance of filling and packaging production line- A simulative study. *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, 2912-2923.
- BirtLH. (s.f.). *Procesos de fabricación por corte y conformado*. Recuperado el 14 de Marzo de 2022, de Defectos de la laminación.
- CANACERO. (s.f.). *Cámara Nacional del Hierro y el Acero*. Recuperado el 30 de Mayo de 2021, de <https://www.canacero.org.mx/>
- Canalum. (s.f.). *Canalum, Camara Nacional de la Insuatria del Aluminio en Mexico*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2022, de <https://www.canalum.org.mx/notialum>
- Casadiago, R. A. (2013). *Guia de usuario para el modelamiento y análisis con el Software Flexsim*. Cúcuta: Grupo de Investigación en Productividad y Competitividad.
- Casting. (s.f.). *Alluminium production*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021, de Aluminium for future Generations: <https://primary.world-aluminium.org/processes/casting/>

- Chen, W., Chen, M., Jin, X., y Zhang, P. (2020). Effect of heating rate during annealing on microstructure and texture evolution of AA8021 aluminum foil. *Materials Research Express*, 7, 096514.
- Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G., y Sartor, M. (2020). Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*, 226, 107617.
- Data México. (s.f.). *Aluminio y sus manufactureras*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2022, de <https://datamexico.org/es/profile/industry/alumina-and-aluminum-production-and-processing#IED-by-country>
- Data México. (s.f.). *Articulos de Aluminio*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2022, de <https://datamexico.org/es/profile/product/aluminium-articles>
- De la Fuente, D. G., y Fernández, I. Q. (2005). *Distribución en planta*. Oviedo: Ediuno.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., y De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers y Industrial Engineering*, 149, 106868.
- Feng, T., y Wang, C. (2021). Optimization of distribution cabinet assembly process based on value. *Journal of Physics: Conference Series*, 1827, 012059.
- FlexSim. (s.f.). *FlexSim*. Recuperado el 23 de Octubre de 2020, de FlexSim: <https://www.flexsim.com/es/flexsim/>
- Florescu, A., y Barabas, S. A. (2020). Modeling and simulation of a flexible manufacturing system- A basic component of Industry 4.0. *Applied sciences*, 10, 20.
- Gao, H., y Ma, M. (2020). Research on improving assembly line balancing of household refrigerator. *2020 2nd International Conference on Economic Management and Model Engineering (ICEMME)*, 117-120.
- Gómez, M. A. (2020). Modelo de máxima verosimilitud. *Libre Empresa*, 17, 121-138.
- Grover, M. P. (2007). Introducción y panorama de manufactura. En M. P. Grover, *Fundamentos de Manufactura Moderna* (págs. 1-20). Ciudad de México: McGraw Hill.
- Henry Metal Material. (s.f.). *Papel aluminio*. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de Henry Metal Material: <http://www.foildealuminio.com/aluminum-foil/>

- Hernández, J. C., y Vizán, A. I. (2013). *Lean Manufacturing; Conceptos, técnicas e implantación*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.
- Hodson, W. K. (1996). *Maynard Manual del Ingeniero Industrial*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Incontrol Simulation Software. (s.f.). *Enterprise Dynamics*. Recuperado el 23 de Abril de 2021, de <https://www.incontrolsim.com/software/enterprise-dynamics/>
- Ishak, A., Faiz, A. Z., y Sekar, A. C. (2020). Production line simulation in vise using the flexsim application. *IOP conference series: Materials science and engineering*, 1003, 012103.
- ISO7271:2011. (s.f.). *Aluminium and aluminium alloys — Foil and thin strip — Dimensional tolerances*.
- Jaime, C. D., y Cuevas, A. V. (2020). Comercio intraindustrial y los índices A y B de Brühlhart del acero y el aluminio para el comercio México-Estados Unidos. *Análisis Económico*, 35(89), 173-192.
- Kalpakjian, S., y Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y tecnología* (Quinta ed.). Ciudad de México: Pearson Edicación.
- Keles, O., y Dundar, M. (2007). Aluminum foil: Its typical quality problems and their causes. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 125-137.
- Kerry, Y. J. (2012). Aluminium foil packaging. En *Packaging Technology. Fundamentals, materials and processes*. (págs. 163-177). Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- Krynke, M. (2021). Personnel management on the production line using the FlexSim simulation environment. *Manufacturing Technology*, 21(5), 657-667.
- Kumar, B. S., Mahesh, V., y Kumar, B. S. (2015). Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing System with FlexSim. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 5, 6.
- Law, A. M. (2013). *Simulation, Modeling and Analysis*. New York: McGraw Hill.
- Liu, W., y Lin, J. (2022). Research on Simulation and Optimization of Production Line Based on Flexsim. *Forest Chemicals Review*, 1969-1985.
- Ma, X., Yin, Y., y Liu, T. (2011). The simulation and optimizing of different distribution strategies for the distribution centre based on Flexsim. *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, 201-204.

- Madariaga, F. N. (2013). *Lean manufacturing: Exposición adaptada a la fabricación repetitiva de familias de productos mediante procesos discretos*. Bubok Publishing S.L.
- Maldonado, M. A. (2008). Acciones para aumentar la eficiencia, en el área de convertido en una empresa de papael aluminio. (*Tesis de licenciatura*). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma.
- Mariño, S. I., y Alfonzo, P. L. (2020). Aprendizaje activo en educación superior, un caso en la asignatura de modelos y simulación. *Quaderns digitals.net*, 153-172.
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., y Beaver, B. M. (2006). *Introducción a la probabilidad y estadística* (Décima tercera ed.). México: CENGAGE Learning.
- Meyers, F. E., y Stephens, M. P. (2006). *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales* (Tercera ed.). Ciudad de México: Pearson Educación.
- Mouafo, N. G., y Wang, H. (2022). Port Terminal Performance Evaluation and Modeling. *Logistics*, 6, 10.
- Mujica, M. H. (1999). Redistribución y aplicación de tiempos y movimientos en una planta industrial. (*Tesis de licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Ciudad de Mexico.
- Muther, R. (1970). *Distribución en planta* (Segunda ed.). Barcelona: Hispano Europea.
- Niebel, B. W., y Andris, F. (2009). *Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Puche, J. F., Carpena, J. J., Gómez, J. G., Vilar, R. L., Villalba, S. S., y Perpiñan, J. S. (2005). *Guía práctica para simulación de procesos industriales*. Murcia: Centro Tecnológico del Mueble y la Madera de la Región de Murcia.
- Radhwan, H., Sayfull, Z., Farizuan, M. R., Effendi, M. S., y Irfan, A. R. (2019). Redesign of Bahulu Production Layout to Improve the Efficiency of Process Flow. *AIP Conference Proceedings* 2129, 020153.
- Rao, G. V., Nallusamy, S., y Raman, P. (2019). Enhancement of Production in Subassembly Line of a Medium Scale Industry Using Different Lean Tools and Flexsim Simulation Software. *International journal of engineering research in Africa*, 44, 229-239.

- Rodríguez, A. (1 de Julio de 2022). *La actualidad de la industria del aluminio en México*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2022, de Ulbrinox: <https://www.ulbrinox.com.mx/blog/la-actualidad-de-la-industria-del-aluminio-en-mexico>
- S.A.B, G. V. (s.f.). *Almexa*. Recuperado el 17 de Marzo de 2021, de Almexa: <http://www.grupovasconia.com/nuestro-grupo/nuestros-negocios/almexa/>
- Sanjuan, R. G., Vasquez, P. M., y Hernández, J. I. (2021). Análisis de las etapas de un proceso de manufactura de papel aluminio a partir de un estudio de tiempos. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial (COINI)*, 10.
- Scharer, U. S. (2003). *Procesos Industriales. Laminación Rolado y trefilado de metales*. Ciudad de México: Centro de Investigaciones de Diseño Industrial.
- SEGOB, Diario Oficial de la Federación. (27 de Diciembre de 2019). Recuperado el 10 de Junio de 2022, de RESOLUCIÓN Final de la investigación antidumping sobre las importaciones de bobinas de papel aluminio originarias de la República Popular China, independientemente del país de procedencia.: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5582975yfecha=27/12/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5582975yfecha=27/12/2019#gsc.tab=0)
- Shafiq, S. I., Sanin, C., y Szczerbicki, E. (2020). Knowledge-Based Virtual Modeling and Simulation of Manufacturing Processes for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, 51, 19.
- Siemens PLM. (s.f.). *Plant Simulation*. Recuperado el 23 de Abril de 2021, de <https://www.plm.automation.siemens.com/store/es-es/trial/plant-simulation.html>
- Simul8. (s.f.). *Simul8*. Recuperado el 23 de Abril de 2021, de <https://www.simul8.com/>
- Vargas, S. A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Murcia, España: Colección Ciencia y Técnica.
- Vieira, L. M., Dobah, Y., Dos Santos, J., Panzera, T., Campos, J., y Scarpa, F. (2022). Impact Properties of Novel Natural Fibre Metal Laminated Composite Materials. *Applied Sciences*, 12, 1869.
- Wilmer. (8 de Septiembre de 2016). *8 problemas más frecuentes en el proceso de laminación de flexibles*. Obtenido de El empaque más conversión: <https://www.elempaque.com/blogs/8-problemas-mas-frecuentes-en-el-proceso-de-laminacion-de-flexibles+114907>



- Wu, S., Xu, A., Song, W., y Li, X. (2019). Structural optimization of the production process in steel plants based on flexsim simulation. *Steel research international*, 90, 1900201.
- Zhu, X., Zhang, R., Chu, F., He, Z., y Li, J. (2014). A Flexsim-based Optimization for the Operation Process of Cold-chain Logistics Distribution Centre. *Journal of Applied Research and Technology*, 12, 270-278.
- Zomparelli, F., Petrillo, L., Di Salvo, B., y Petrillo, A. (2018). Re-engineering and Relocation of manufacturing process through a simulative and multicriteria decision model. *IFAC PapersOnLine*, 51, 1649-1654.

# Anexos

## Anexo 1. Estadística descriptiva de cada uno de los procesos de planta generado en minitab.

### Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo de impresión

#### Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
10	0	15191.2	7874.79	11694.3	7411.8	26998.2	0.840965	-1.25945

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.949	0.010		
Transformación Box-Cox	0.433	0.240		
Lognormal	0.578	0.098		
Lognormal de 3 parámetros	0.373	*	0.130	
Exponencial	1.535	0.023		
Exponencial de 2 parámetros	0.397	>0.250	0.001	
Weibull	0.822	0.026		
Weibull de 3 parámetros	0.536	0.179	0.073	
Valor extremo más pequeño	1.136	<0.010		
Valor extremo por máximos	0.809	0.028		
Gamma	0.763	0.049		
Gamma de 3 parámetros	0.615	*	0.230	
Logística	0.940	0.007		
Loglogística	0.582	0.083		
Loglogística de 3 parámetros	0.409	*	0.205	
Transformación de Johnson	0.326	0.454		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	15191.22000		7874.78939	
Transformación de Box-Cox*	0.00881		0.00204	
Lognormal*	9.51588		0.49037	
Lognormal de 3 parámetros	8.50730		1.13755	6840.17987
Exponencial		15191.21999		
Exponencial de 2 parámetros		8643.71318		6547.42868
Weibull		2.20688	17276.24135	
Weibull de 3 parámetros		1.26910	10065.17547	5889.41136
Valor extremo más pequeño	19150.59055		7603.79965	
Valor extremo por máximos	11802.23629		5235.24584	
Gamma		4.60084	3301.83951	
Gamma de 3 parámetros		2.17899	4907.31641	4497.84872
Logística	14129.68492		4446.19796	
Loglogística		9.47424	0.28033	
Loglogística de 3 parámetros		8.92545	0.45514	4995.04396
Transformación de Johnson*		0.04528	0.89218	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

### Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo de grabado

#### Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
13	0	1161.6	887.511	784.2	228.6	2598.6	0.586473	-1.26946

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.664	0.064		
Transformación Box-Cox	0.436	0.251		
Lognormal	0.436	0.251		
Lognormal de 3 parámetros	0.480	*	1.000	
Exponencial	0.494	0.481		
Exponencial de 2 parámetros	0.424	>0.250	0.057	
Weibull	0.458	0.241		
Weibull de 3 parámetros	0.453	0.287	0.212	
Valor extremo más pequeño	0.842	0.024		
Valor extremo por máximos	0.586	0.117		
Gamma	0.453	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	0.437	*	0.177	
Logística	0.661	0.047		
Loglogística	0.448	0.216		
Loglogística de 3 parámetros	0.484	*	0.487	
Transformación de Johnson	0.196	0.861		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1161.60000		887.51081	
Transformación de Box-Cox*	6.72285		0.90875	
Lognormal*	6.72285		0.90875	
Lognormal de 3 parámetros	6.75986		0.84380	-21.90946
Exponencial		1161.59992		
Exponencial de 2 parámetros		1010.74727		150.85021
Weibull		1.35775	1271.00027	
Weibull de 3 parámetros		1.09816	1068.60841	128.78941
Valor extremo más pequeño	1606.31960		846.76109	
Valor extremo por máximos	762.67016		650.11237	
Gamma		1.64074	707.97517	
Gamma de 3 parámetros		1.05206	966.51431	144.75611
Logística	1080.99480		515.83413	
Loglogística		6.75362	0.53352	
Loglogística de 3 parámetros		6.58814	0.63596	95.55810
Transformación de Johnson*		-0.09098	1.10826	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

### Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo de corte

#### Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
16	0	1531.01	914.067	1410.6	624.6	4429.8	2.45649	6.91060

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	1.704	<0.005		
Transformación Box-Cox	0.416	0.294		
Lognormal	0.598	0.100		
Lognormal de 3 parámetros	0.466	*	0.237	
Exponencial	2.682	<0.003		
Exponencial de 2 parámetros	0.899	0.080	0.000	
Weibull	1.223	<0.010		
Weibull de 3 parámetros	0.749	0.053	0.021	
Valor extremo más pequeño	2.505	<0.010		
Valor extremo por máximos	0.673	0.071		
Gamma	0.878	0.026		
Gamma de 3 parámetros	0.799	*	0.354	
Logística	1.019	<0.005		
Loglogística	0.429	0.240		
Loglogística de 3 parámetros	0.385	*	0.328	
Transformación de Johnson	0.352	0.423		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1531.01250		914.06670	
Transformación de Box-Cox*	0.02774		0.00598	
Lognormal*	7.21750		0.46558	
Lognormal de 3 parámetros	6.78264		0.66660	419.03441
Exponencial		1531.01250		
Exponencial de 2 parámetros		966.82522		564.17342
Weibull		1.88720	1738.24264	
Weibull de 3 parámetros		1.34591	1144.64298	490.75028
Valor extremo más pequeño	2051.44954		1250.08049	
Valor extremo por máximos	1198.39284		494.65504	
Gamma		4.46332	343.02064	
Gamma de 3 parámetros		3.49647	386.20846	180.62684
Logística	1364.71565		384.62541	
Loglogística		7.18415	0.23660	
Loglogística de 3 parámetros		6.75447	0.36815	439.77893
Transformación de Johnson*		0.03799	0.99700	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

## Anexo 2. Estadística descriptiva de cada uno de los procesos de la cantidad de procesamiento de 50 kg generado en minitab.

### Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 9 en impresión ( $m = 50 \text{ kg}$ )

#### Estadísticas descriptivas

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	5952	793.7073	6012	5130	6714	-0.338234	*

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.194	0.608		
Transformación Box-Cox	0.192	0.621		
Lognormal	0.201	0.577		
Lognormal de 3 parámetros	0.252	*	0.825	
Exponencial	1.110	0.049		
Exponencial de 2 parámetros	0.364	>0.250	0.002	
Weibull	0.248	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.524	0.100	1.000	
Valor extremo más pequeño	0.248	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.275	>0.250		
Gamma	0.257	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	0.767	*	1.000	
Logística	0.229	>0.250		
Loglogística	0.237	>0.250		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	5952.00000		793.70272	
Transformación de Box-Cox*	1.15176E+06		2.43889E+05	
Lognormal*	8.68544		0.13526	
Lognormal de 3 parámetros	14.78672		0.00025	-2.63517E+06
Exponencial			5952.00000	
Exponencial de 2 parámetros			1232.81201	4719.06266
Weibull	10.92407		6241.65083	
Weibull de 3 parámetros	51.18799		28345.01479	-2.23106E+04
Valor extremo más pequeño	6269.11144		549.14765	
Valor extremo por máximos	5625.51349		587.09821	
Gamma	82.93014		71.77125	
Gamma de 3 parámetros	3192.36321		11.48021	-3.10794E+04
Logística	5970.49162		400.52346	
Loglogística	8.69036		0.06819	
Loglogística de 3 parámetros	14.78541		0.00015	-2.63172E+06

\* Escala: Estimación de ML ajustado

### Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 51 en impresión ( $m = 50 \text{ kg}$ )

#### Estadísticas descriptivas

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	1881	216.375	1881	1728	2034	*	*

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.795	0.109		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.007	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1881.00000		216.37468	
Transformación de Box-Cox*	1.00002		0.00000	
Lognormal*	7.53624		0.11529	
Exponencial			1881.00000	
Exponencial de 2 parámetros			305.85055	1575.07473
Weibull	14.71641		1951.90977	
Valor extremo más pequeño	1956.68146		127.53415	
Valor extremo por máximos	1805.31854		127.53415	
Gamma	150.81126		12.47254	
Logística	1881.00000		99.13149	
Loglogística	7.53624		0.05282	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 15 en grabado ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
5	0	3672	1517.48	3915	1371	5280	-0.858274	0.431495

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.208	0.719		
Transformación Box-Cox	0.208	0.719		
Lognormal	0.404	0.208		
Lognormal de 3 parámetros	0.240	*	0.204	
Exponencial	0.920	0.110		
Exponencial de 2 parámetros	0.654	0.098	0.118	
Weibull	0.294	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.175	>0.500	0.438	
Valor extremo más pequeño	0.175	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.338	>0.250		
Gamma	0.369	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.681	*	1.000	
Logística	0.210	>0.250		
Loglogística	0.375	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.210	*	0.250	

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	3672.00000		1517.48262	
Transformación de Box-Cox*	3672.00000		1517.48262	
Lognormal*	8.11283		0.53459	
Lognormal de 3 parámetros	13.60275		0.00168	-8.04677E+05
Exponencial			3672.00000	
Exponencial de 2 parámetros			2876.21316	795.75737
Weibull	3.14817		4110.53536	
Weibull de 3 parámetros	749.24520		7.91864E+05	-7.87559E+05
Valor extremo más pequeño	4305.46096		1056.14028	
Valor extremo por máximos	2959.52201		1392.25446	
Gamma	5.38815		681.49526	
Gamma de 3 parámetros	4957.87355		19.33024	-9.31488E+04
Logística	3794.95601		797.53471	
Loglogística	8.19249		0.26380	
Loglogística de 3 parámetros	13.59618		0.00099	-7.99263E+05

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 17 en grabado ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	2343	101.823	2343	2271	2415	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.870	0.084		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.001	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	2343.00000		101.82338	
Transformación de Box-Cox*	1.00042		0.00000	
Lognormal*	7.75872		0.04347	
Exponencial			2342.99995	
Exponencial de 2 parámetros			143.92967	2199.03516
Weibull	39.02725		2377.77476	
Valor extremo más pequeño	2378.61480		60.01607	
Valor extremo por máximos	2307.38520		60.01607	
Gamma			1058.62663	2.21324
Logística	2343.00000		46.65011	
Loglogística	7.75872		0.01992	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 51 en grabado ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	1867	404.025	2001	1413	2187	-1.32831	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.283	0.316		
Transformación Box-Cox	0.228	0.493		
Lognormal	0.310	0.255		
Lognormal de 3 parámetros	0.363	*	0.593	
Exponencial	0.972	0.076		
Exponencial de 2 parámetros	0.458	>0.250	0.014	
Weibull	0.362	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.327	0.417	0.669	
Valor extremo más pequeño	0.324	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.389	>0.250		
Gamma	0.385	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.173	*	1.000	
Logística	0.330	>0.250		
Loglogística	0.360	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.330	*	0.596	

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1867.00000		404.02475	
Transformación de Box-Cox*	1.33406E+11		7.98978E+10	
Lognormal*	7.51505		0.23086	
Lognormal de 3 parámetros	13.52623		0.00044	-7.46932E+05
Exponencial			1867.00000	
Exponencial de 2 parámetros			680.89617	1186.03461
Weibull	7.42218		2001.88157	
Weibull de 3 parámetros	77.15544		18846.32357	-1.68274E+04
Valor extremo más pequeño	2020.07098		241.75808	
Valor extremo por máximos	1694.65426		322.25712	
Gamma			29.51665	63.25244
Gamma de 3 parámetros	4411.44539		4.98054	-2.03343E+04
Logística	1904.47068		201.87513	
Loglogística	7.53845		0.11511	
Loglogística de 3 parámetros	13.49639		0.00028	-7.24883E+05

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 9 en corte ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	3448.5	1185.82	3448.5	2610	4287	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.584	0.234		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.089	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	3448.50000		1185.81807	
Transformación de Box-Cox*	1.00000		0.00000	
Lognormal*	8.11522		0.35089	
Exponencial		3448.50000		
Exponencial de 2 parámetros		1676.79520		1771.60240
Weibull	4.83510	3781.80164		
Valor extremo más pequeño	3863.26406	698.93718		
Valor extremo por máximos	3033.73594	698.93718		
Gamma	16.57418	208.06457		
Logística	3448.50000	543.27943		
Loglogística	8.11522	0.16076		

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 15 en corte ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	3907.5	2933.79	3907.5	1833	5982	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.326	0.600		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	1.000	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	3907.50000		2933.78604	
Transformación de Box-Cox*	8.10511		0.83637	
Lognormal*	8.10511		0.83637	
Exponencial		3907.49974		
Exponencial de 2 parámetros		4148.96833		-241.48417
Weibull		2.02854	4436.61076	
Valor extremo más pequeño	4933.65150	1729.21308		
Valor extremo por máximos	2881.34850	1729.21308		
Gamma		3.17729	1229.82158	
Logística	3907.50000	1344.10636		
Loglogística	8.10511	0.38318		

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 20 en corte ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	1061	233.641	1155	795	1233	-1.51742	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.329	0.216		
Transformación Box-Cox	0.259	0.385		
Lognormal	0.353	0.177		
Lognormal de 3 parámetros	0.421	* 0.567		
Exponencial	0.974	0.076		
Exponencial de 2 parámetros	0.487	0.232	0.015	
Weibull	0.433	0.242		
Weibull de 3 parámetros	0.393	0.254	0.600	
Valor extremo más pequeño	0.393	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.433	0.242		
Gamma	0.441	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.293	* 1.000		
Logística	0.383	>0.250		
Loglogística	0.411	0.229		
Loglogística de 3 parámetros	0.383	* 0.569		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1061.00000		233.64075	
Transformación de Box-Cox*	1.52717E+12		1.00725E+12	
Lognormal*	6.94913		0.23678	
Lognormal de 3 parámetros	12.95514		0.00045	-4.21945E+05
Exponencial		1061.00000		
Exponencial de 2 parámetros		398.93917		662.02028
Weibull		7.47445	1138.33062	
Weibull de 3 parámetros		3053.32630	4.09592E+05	-4.08444E+05
Valor extremo más pequeño	1148.42487	134.20705		
Valor extremo por máximos	960.70587	188.67072		
Gamma		28.20401	37.61877	
Gamma de 3 parámetros		4637.41951	2.80997	-1.21064E+04
Logística	1085.86856	116.34535		
Loglogística	6.97550	0.11775		
Loglogística de 3 parámetros	12.92129	0.00028		-4.07842E+05

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 25 en corte ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	1047	207.889	1047	900	1194	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.713	0.145		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.024	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1047.00000		207.88939	
Transformación de Box-Cox*	0.99994		0.00000	
Lognormal*	6.94373		0.19988	
Exponencial		1047.00000		
Exponencial de 2 parámetros		293.85641	753.07180	
Weibull	8.48821	1111.69458		
Valor extremo más pequeño	1119.71356	122.53281		
Valor extremo por máximos	974.28644	122.53281		
Gamma		50.39373	20.77639	
Logística	1047.00000		95.24398	
Loglogística	6.94373		0.09157	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 39 en corte ( $m = 50 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	959	494.357	747	606	1524	1.57489	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.349	0.183		
Transformación Box-Cox	0.240	0.450		
Lognormal	0.293	0.293		
Lognormal de 3 parámetros	0.443	*	1.000	
Exponencial	0.609	0.254		
Exponencial de 2 parámetros	0.286	>0.250	0.059	
Weibull	0.398	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.416	0.270	1.000	
Valor extremo más pequeño	0.451	0.223		
Valor extremo por máximos	0.426	0.249		
Gamma	0.399	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	0.448	*	1.000	
Logística	0.407	0.234		
Loglogística	0.341	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.358	*	1.000	

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	959.00000		494.35716	
Transformación de Box-Cox*	0.00122		0.00051	
Lognormal*	6.78401		0.48350	
Lognormal de 3 parámetros	8.91973		0.05304	-6609.23303
Exponencial			959.00000	
Exponencial de 2 parámetros			529.47309	429.50897
Weibull		2.58509	1086.35410	
Weibull de 3 parámetros		3.64554	1518.18583	-406.78944
Valor extremo más pequeño	1171.60992		400.66438	
Valor extremo por máximos	774.75674		280.02950	
Gamma		6.26859	152.98494	
Gamma de 3 parámetros		385.38457	20.34850	-6962.99288
Logística	904.30309		245.89278	
Loglogística	6.73756		0.24140	
Loglogística de 3 parámetros	7.05263		0.18433	-299.71674

\* Escala: Estimación de ML ajustado



### Anexo 3. Estadística descriptiva de cada uno de los procesos de la cantidad de procesamiento de 100 kg generado en minitab.

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 9 en impresión ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

#### Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	11904	1587.41	12024	10260	13428	-0.338234	*

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.194	0.608		
Transformación Box-Cox	0.192	0.621		
Lognormal	0.201	0.577		
Lognormal de 3 parámetros	0.252	*	0.825	
Exponencial	1.110	0.049		
Exponencial de 2 parámetros	0.364	>0.250	0.002	
Weibull	0.248	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.524	0.100	1.000	
Valor extremo más pequeño	0.248	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.275	>0.250		
Gamma	0.257	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	0.767	*	1.000	
Logística	0.229	>0.250		
Loglogística	0.237	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.229	*	0.828	

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	11904.00000		1587.40543	
Transformación de Box-Cox*	3.50395E+06		7.41972E+05	
Lognormal*	9.37859		0.13526	
Lognormal de 3 parámetros	15.47986		0.00025	-5.27035E+06
Exponencial			11904.00000	
Exponencial de 2 parámetros			2465.62403	9438.12532
Weibull		10.92407	12483.30167	
Weibull de 3 parámetros		51.18799	56690.02958	-4.46212E+04
Valor extremo más pequeño	12538.22287		1098.29530	
Valor extremo por máximos	11251.02698		1174.19642	
Gamma		82.93014	143.54250	
Gamma de 3 parámetros		3192.36321	22.96041	-6.21589E+04
Logística	11940.98324		801.04692	
Loglogística	9.38351		0.06819	
Loglogística de 3 parámetros	15.47856		0.00015	-5.26343E+06

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 51 en impresión ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

#### Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	3762	432.749	3762	3456	4068	*	*

#### Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.795	0.109		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.007	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

#### Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	3762.00000		432.74935	
Transformación de Box-Cox*	1.00002		0.00000	
Lognormal*	8.22939		0.11529	
Exponencial			3762.00000	
Exponencial de 2 parámetros			611.70110	3150.14945
Weibull		14.71641	3903.81954	
Valor extremo más pequeño	3913.36291		255.06831	
Valor extremo por máximos	3610.63709		255.06831	
Gamma		150.81126	24.94509	
Logística	3762.00000		198.26298	
Loglogística	8.22939		0.05282	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 15 en grabado (m = 100 kg)**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
5	0	7344	3034.97	7830	2742	10560	-0.858274	0.431495

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.208	0.719		
Transformación Box-Cox	0.208	0.719		
Lognormal	0.404	0.208		
Lognormal de 3 parámetros	0.240	*	0.204	
Exponencial	0.920	0.110		
Exponencial de 2 parámetros	0.654	0.098	0.118	
Weibull	0.294	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.175	>0.500	0.438	
Valor extremo más pequeño	0.175	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.338	>0.250		
Gamma	0.369	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.681	*	1.000	
Logística	0.210	>0.250		
Loglogística	0.375	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.210	*	0.250	

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	7344.00000		3034.96524	
Transformación de Box-Cox*	7344.00000		3034.96524	
Lognormal*	8.80598		0.53459	
Lognormal de 3 parámetros	14.29707		0.00168	-1.61125E+06
Exponencial		7344.00000		
Exponencial de 2 parámetros		5752.42632		1591.51474
Weibull		3.14817	8221.07073	
Weibull de 3 parámetros		749.31894	1.58388E+06	-1.57527E+06
Valor extremo más pequeño	8610.92192		2112.28057	
Valor extremo por máximos	5919.04402		2784.50893	
Gamma		5.38815	1362.99052	
Gamma de 3 parámetros		4957.87355	38.66047	-1.86298E+05
Logística	7589.91203		1595.06943	
Loglogística	8.88564		0.26380	
Loglogística de 3 parámetros	14.29038		0.00099	-1.60022E+06

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 17 en grabado (m = 100 kg)**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	4686	203.647	4686	4542	4830	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.870	0.084		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.001	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	4686.00000		203.64675	
Transformación de Box-Cox*	1.00045		0.00000	
Lognormal*	8.45186		0.04347	
Exponencial		4685.99990		
Exponencial de 2 parámetros		287.85934		4398.07033
Weibull		39.02725	4755.54952	
Valor extremo más pequeño	4757.22961		120.03214	
Valor extremo por máximos	4614.77039		120.03214	
Gamma		1058.62663	4.42649	
Logística	4686.00000		93.30022	
Loglogística	8.45186		0.01992	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 51 en grabado (m = 100 kg)**

**Estadísticas descriptivas**

N	N°	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	3734	808.050	4002	2826	4374	-1.32831	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.283	0.316		
Transformación Box-Cox	0.228	0.493		
Lognormal	0.310	0.255		
Lognormal de 3 parámetros	0.363	*	0.593	
Exponencial	0.972	0.076		
Exponencial de 2 parámetros	0.458	>0.250	0.014	
Weibull	0.362	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.326	0.418	0.670	
Valor extremo más pequeño	0.324	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.389	>0.250		
Gamma	0.385	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.173	*	1.000	
Logística	0.330	>0.250		
Loglogística	0.360	>0.250		
Loglogística de 3 parámetros	0.330	*	0.596	

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	3734.00000		808.04950	
Transformación de Box-Cox*	1.39451E+12		8.35183E+11	
Lognormal*	8.20820		0.23086	
Lognormal de 3 parámetros	14.21963		0.00044	-1.49425E+06
Exponencial		3734.00000		
Exponencial de 2 parámetros		1361.79235		2372.06922
Weibull		7.42218	4003.76315	
Weibull de 3 parámetros		76.67203	37457.98356	-3.34189E+04
Valor extremo más pequeño	4040.14196		483.51617	
Valor extremo por máximos	3389.30851		644.51424	
Gamma		29.51665	126.50487	
Gamma de 3 parámetros		4411.44539	9.96107	-4.06687E+04
Logística	3808.94137		403.75026	
Loglogística	8.23160		0.11511	
Loglogística de 3 parámetros	14.18953		0.00028	-1.44976E+06

\* Escala: Estimación de ML ajustado



**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 9 en corte ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	6897	2371.64	6897	5220	8574	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.584	0.234		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	0.089	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	6897.00000		2371.63614	
Transformación de Box-Cox*	1.00000		0.00000	
Lognormal*	8.80837		0.35089	
Exponencial		6897.00000		
Exponencial de 2 parámetros		3353.59040		3543.20480
Weibull	4.83510	7563.60329		
Valor extremo más pequeño	7726.52811	1397.87435		
Valor extremo por máximos	6067.47189	1397.87435		
Gamma	16.57418	416.12915		
Logística	6897.00000	1086.55887		
Loglogística	8.80837	0.16076		

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 15 en corte ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	7815	5867.57	7815	3666	11964	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.250	0.227		
Transformación Box-Cox	0.250	0.227		
Lognormal	0.250	0.227		
Exponencial	0.326	0.600		
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250	1.000	
Weibull	0.365	>0.250		
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250		
Gamma	0.359	>0.250		
Logística	0.318	>0.250		
Loglogística	0.318	>0.250		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	7815.00000		5867.57207	
Transformación de Box-Cox*	8.79826		0.83637	
Lognormal*	8.79826		0.83637	
Exponencial		7814.99949		
Exponencial de 2 parámetros		8297.93666		-482.96833
Weibull	2.02854	8873.22151		
Valor extremo más pequeño	9867.30301	3458.42617		
Valor extremo por máximos	5762.69699	3458.42617		
Gamma	3.17729	2459.64315		
Logística	7815.00000	2688.21272		
Loglogística	8.79826	0.38318		

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 20 en corte ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	2122	467.281	2310	1590	2466	-1.51742	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	0.329	0.216		
Transformación Box-Cox	0.259	0.385		
Lognormal	0.353	0.177		
Lognormal de 3 parámetros	0.421	* 0.567		
Exponencial	0.974	0.076		
Exponencial de 2 parámetros	0.487	0.232	0.015	
Weibull	0.433	0.242		
Weibull de 3 parámetros	0.393	0.254	0.600	
Valor extremo más pequeño	0.393	>0.250		
Valor extremo por máximos	0.433	0.242		
Gamma	0.441	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	1.293	* 1.000		
Logística	0.383	>0.250		
Loglogística	0.411	0.229		
Loglogística de 3 parámetros	0.383	* 0.569		

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	2122.00000		467.28150	
Transformación de Box-Cox*	2.44830E+13		1.61478E+13	
Lognormal*	7.64228		0.23678	
Lognormal de 3 parámetros	13.64808		0.00045	-8.43712E+05
Exponencial		2122.00000		
Exponencial de 2 parámetros		797.87833		1324.04056
Weibull		7.47445		2276.66124
Weibull de 3 parámetros		3053.32748		8.19185E+05
Valor extremo más pequeño	2296.84974		268.41411	
Valor extremo por máximos	1921.41174		377.34144	
Gamma		28.20401		75.23754
Gamma de 3 parámetros		4637.41951		5.61993
Logística	2171.73711		232.69070	
Loglogística	7.66865		0.11775	
Loglogística de 3 parámetros	13.61444		0.00028	-8.15683E+05

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 25 en corte ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
2	0	2094	415.779	2094	1800	2388	*	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P LRT P
Normal	0.250	0.227
Transformación Box-Cox	0.250	0.227
Lognormal	0.250	0.227
Exponencial	0.713	0.145
Exponencial de 2 parámetros	0.345	>0.250 0.024
Weibull	0.365	>0.250
Valor extremo más pequeño	0.365	>0.250
Valor extremo por máximos	0.365	>0.250
Gamma	0.359	>0.250
Logística	0.318	>0.250
Loglogística	0.318	>0.250

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	2094.00000		415.77879	
Transformación de Box-Cox*	0.99994		0.00000	
Lognormal*	7.63688		0.19988	
Exponencial			2093.99940	
Exponencial de 2 parámetros			587.71282	1506.14359
Weibull	8.48821	2223.38915		
Valor extremo más pequeño	2239.42711		245.06563	
Valor extremo por máximos	1948.57289		245.06563	
Gamma		50.39373	41.55279	
Logística	2094.00000		190.48796	
Loglogística	7.63688		0.09157	

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Identificación de la distribución individual de tiempo de ciclo del calibre 39 en corte ( $m = 100 \text{ kg}$ )**

**Estadísticas descriptivas**

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
3	0	1918	988.714	1494	1212	3048	1.57489	*

**Prueba de bondad del ajuste**

Distribución	AD	P LRT P
Normal	0.349	0.183
Transformación Box-Cox	0.240	0.450
Lognormal	0.293	0.293
Lognormal de 3 parámetros	0.443	* 1.000
Exponencial	0.609	0.254
Exponencial de 2 parámetros	0.286	>0.250 0.059
Weibull	0.398	>0.250
Weibull de 3 parámetros	0.416	0.270 1.000
Valor extremo más pequeño	0.451	0.223
Valor extremo por máximos	0.426	0.249
Gamma	0.399	>0.250
Gamma de 3 parámetros	0.448	* 1.000
Logística	0.407	0.234
Loglogística	0.341	>0.250
Loglogística de 3 parámetros	0.358	* 1.000

**Estimaciones ML de los parámetros de distribución**

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	1918.00000		988.71432	
Transformación de Box-Cox*	0.00061		0.00025	
Lognormal*	7.47716		0.48350	
Lognormal de 3 parámetros	9.61287		0.05304	-1.32185E+04
Exponencial			1918.00000	
Exponencial de 2 parámetros			1058.94618	859.01794
Weibull	2.58509	2172.70820		
Weibull de 3 parámetros	3.64554	3036.37167		-813.57888
Valor extremo más pequeño	2343.21984		801.32876	
Valor extremo por máximos	1549.51347		560.05900	
Gamma		6.26859	305.96987	
Gamma de 3 parámetros		385.38457	40.69700	-1.39260E+04
Logística	1808.60617		491.78555	
Loglogística	7.43071		0.24140	
Loglogística de 3 parámetros	7.74578		0.18433	-599.43347

\* Escala: Estimación de ML ajustado

**Anexo 4. Cantidad de rollos procesados en impresión, grabado y corte por simulación.**

<b>Secuencia de procesamiento</b>	<b>Cantidad de rollos que iniciaron el ciclo</b>	<b>Cantidad de rollos procesados en impresión</b>	<b>Cantidad de rollos procesados en grabado</b>	<b>Cantidad de rollos procesados en corte</b>	<b>Cantidad de rollos con ciclo completo</b>
1	43	42	41	41	41
2	47	46	45	45	45
3	44	43	43	41	41
4	48	47	46	44	44
5	49	48	47	47	47
6	44	43	43	41	41
7	20	19	19	17	17
8	24	23	22	21	21
9	22	21	20	19	19
10	23	22	22	22	22
11	26	25	23	22	22
12	22	21	21	19	19
13	17	16	16	16	16
14	20	19	19	19	19
15	18	17	17	17	17
16	20	19	19	19	19
17	19	18	16	16	16
18	17	16	16	15	15

Los datos son de un tiempo de simulación de 48 h. Los tiempos de procesamiento están estandarizados a  $m = 50$  kg (secuencia 1-6),  $m = 100$  kg (secuencia 7-12) y  $m =$  cantidad procesada en planta (secuencia 13-18).

**Anexo 5. Cantidad de material procesado por rollo de cada calibre en las secuencias de procesamiento por simulación.**

Secuencia de procesamiento	Cantidad de material procesado por calibre (kg)													Total de material procesado con inicio del ciclo (ton)	Total de material procesado con ciclo completo (ton)
	Calibres														
	7	7.6	9	11	15	17	20	25	30	35	39	50	51		
1	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.10	2.05
2	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.30	2.25
3	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.15	2.05
4	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.35	2.20
5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.40	2.35
6	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	2.15	2.05
7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1.90	1.70
8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.30	2.10
9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.10	1.90
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.20	2.20
11	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.50	2.20
12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.10	1.90
13	82.3	132.2	59.5	120	44.6	27.1	91.2	67.6	32.4	16.4	54.1	360.2	53	2.11	1.14
14	41.1	66.1	32.5	120	44.6	27.1	91.2	127.7	64.7	32.9	105.6	720.3	106	2.78	1.58
15	82.3	132.2	32.5	120	44.6	27.1	91.2	67.6	32.4	16.4	54.1	720.3	106	2.29	1.53
16	41.1	66.1	32.5	120	44.6	27.1	147.1	127.8	32.4	32.9	91.7	720.3	106	2.56	1.59
17	41.1	66.1	32.5	120	44.6	0	151	127.8	64.7	16.4	105.6	0	106	2.42	0.88
18	41.1	66.1	59.5	120	44.6	27.1	91.2	67.6	64.7	16.4	54.1	360.2	53	2.3	1.07

Los datos son de un tiempo de simulación de 48 h. Los tiempos de procesamiento están estandarizados a  $m = 50$  kg (secuencia 1-6),  $m = 100$  kg (secuencia 7-12) y  $m =$  cantidad procesada en planta (secuencia 13-18).

**Anexo 6. Cantidad de rollos procesados de cada calibre en las secuencias de procesamiento.**

Secuencia de procesamiento	Cantidad de rollos procesados por calibre													Total de rollos procesados con inicio del ciclo	Total de rollos con ciclo completo
	Calibres														
	7	7.6	9	11	15	17	20	25	30	35	39	50	51		
1	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	42	41
2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	46	45
3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	43	41
4	2	3	3	2	2	2	6	4	2	4	4	4	6	47	44
5	2	2	3	3	3	2	4	6	6	2	4	4	6	48	47
6	3	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	43	41
7	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19	17
8	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	23	21
9	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	21	19
10	1	1	2	1	1	1	4	2	1	2	2	2	2	22	22
11	1	1	1	1	2	1	2	2	4	1	2	2	2	25	22
12	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	21	19
13	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	16
14	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	20	19
15	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	18	17
16	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	20	19
17	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	2	0	2	19	16
18	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	17	15

Los datos son de un tiempo de simulación de 48 h. Los tiempos de procesamiento están estandarizados a  $m = 50$  kg (secuencia 1-6),  $m = 100$  kg (secuencia 7-12) y  $m =$  cantidad procesada en planta (secuencia 13-18).



# CSINI 2021

XIVº Congreso Internacional  
de Ingeniería Industrial



**aacini**  
ASOCIACION ARGENTINA DE CARRERAS  
DE INGENIERIA INDUSTRIAL



**UTN.BA**  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES





# Información Editorial

**COINI 2021**  
XIVº Congreso Internacional  
de Ingeniería Industrial

COINI 2021 : XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial / Jorge Eduardo Abet ... [et al.] ; compilación de Mario Lurbe ... [et al.] ; editado por Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4998-86-6

1. Ingeniería. 2. Industrias. 3. Educación. I. Abet, Jorge Eduardo. II. Lurbe, Mario, comp. III. Cejas, Fernando, ed.

CDD 620.007



Universidad Tecnológica Nacional - República Argentina

Rector: Ing. Ruben Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaria Académica y Posgrado: Ing. Liliana Raquel Cuenca Pletsch

Secretario de Ciencia, Tecnología: Ing. Omar del Gener



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires

Decano: Ing. Guillermo Oliveto

Vicedecano: Ing. Andrés Bursztyn

Secretario Académico: Dra Miriam Capelari

Secretario Ciencia y Tecnología: Lic. Patricia Cibeira

Director Departamento de Ingeniería Industrial: Ing. Guillermo Valvano



eduTecNe-Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando H. Cejas



Asociación Argentina de Carreras de Ingeniería Industrial

Presidente: Esp. Arq. Miguel Ángel Risetto

Vicepresidente: Ing. Jorge A. Mohamad

## Comité Editorial

Dr. Ing. Mario Lurbe (AACINI)

Mg. Ing. Iván Barón (FRSR)

Esp. Arq. Miguel Risetto (AACINI)

Ing. Juan Ignacio Sáenz (FRSR)

Armado, diagramación y Diseño Editorial: Esp. Lic. Jimena Lloret (FRSR)

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© eduTecNe, 2022

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AA) Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina - Published in Argentina

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

## Análisis de las etapas de un proceso de manufactura de papel aluminio a partir de un estudio de tiempos.

Sanjuan-Galindo, Rene\*, Vasquez-Macias, Paulina, Hernández-Vega José-Isidro

*Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Nuevo León, Apodaca, N.L., México.*

*[rene.sanjuan@itnl.edu.mx](mailto:rene.sanjuan@itnl.edu.mx); [pauvasmac@gmail.com](mailto:pauvasmac@gmail.com); [jose.isidro.hernandez@itnl.edu.mx](mailto:jose.isidro.hernandez@itnl.edu.mx)*

### RESUMEN

El papel aluminio es un producto muy conocido debido a que es usado en el hogar y en varios sectores de la industria. Se utiliza en la envoltura de productos alimenticios o farmacéuticos y también en el envasado de bebidas. La manufactura de papel aluminio se realiza a través en un flujo de procesos como corte, impresión y grabado, por ejemplo. La duración de cada proceso está determinada por las operaciones que se desarrollan y por factores técnicos, humanos y de procedimiento. Lograr la eficiencia de aprovechamiento de la maquinaria es de interés en toda empresa, a fin de mejorar la producción global de la planta y, por lo tanto, ganar competitividad, bajar costos, mantenerse en el mercado, etc. El presente estudio consistió en el análisis de la variabilidad de los tiempos de procesamiento de tres procesos de una línea de manufactura de papel aluminio. Se usaron datos colectados de un estudio de tiempos y movimientos, herramientas estadísticas y un modelo desarrollado en el software Flexsim. Este análisis se desarrolló para lograr el objetivo siguiente: Proponer una estrategia de atención a las actividades identificadas como innecesarias, que son evitables y que dispersan los tiempos de procesamiento, así como evaluar su alcance en la manufactura de papel aluminio. Se presenta el análisis de los procesos, la identificación de actividades y una propuesta de seis acciones que impacte en el rendimiento global.

**Palabras Claves:** Papel aluminio, modelado computacional, tiempo de procesamiento.

### ABSTRACT

Aluminum foil is a well-known product because of its wide use at home or in several industries. It is used to wrap food, pharmaceutical products or as beverage container. Aluminum foil is manufactured through a flow of processes such as cutting, printing and embossing, for instance. The duration of each process is determined by the operations involved but also by technical, human and procedural factors. Achieving efficiency in the use of machinery is of interest of any company, in order to improve the overall production of the plant and therefore, gain competitiveness, to reduce costs, remain in the market, etc. The present study consisted in the analysis of the processing times variability of three processes of an aluminum foil manufacture line. Collected data from a time and motion study, statistical tools and a computational model using Flexsim software were used. This analysis was carried out to achieve the following goal: To propose a strategy to address the activities identified as unnecessary, which are avoidable and disperse the processing times, as well to evaluate their scope in the aluminium foil manufacture. It is presented the processes analysis, the activities identification and a six actions proposal which will impact on the global performance.

**Keywords:** Aluminum foil, computational modeling, manufacture process time.



## 1. INTRODUCCIÓN

El aluminio es el metal más abundante sobre la corteza terrestre [1, 2]. Su gran demanda en la industria, comercio y servicios lo posiciona como el segundo metal más utilizado en el mundo, después de las aleaciones de acero. En México, la producción de aluminio y otros metales continúa siendo primordial en la cadena productiva, en el desarrollo económico y en su balanza comercial. México es un importante proveedor de este metal a países importadores como Estados Unidos de Norteamérica [3]. La manufactura y procesamiento de aluminio, junto al hierro y el acero, son de relevancia estratégica en la cadena productiva para la producción de numerosos insumos requeridos en sectores como el transporte, automotriz, aeroespacial, eléctrico, electrónico, construcción, alimentos, envasado, empaçado, farmacéutico, electrodomésticos, informáticos, telecomunicaciones, entre otros. El aluminio tiene uso industrial y doméstico debido a su baja densidad y a la resistencia que ofrece ante la corrosión, ambas características permiten la diversificación de los usos del aluminio, que le dan ventaja preferencial frente al acero. Para mejorar sus propiedades, las aleaciones de aluminio se preparan con metales como Mg, Si, Fe, o La o Ce, inclusive [4]. La forma más general de uso del aluminio es el papel aluminio. Este producto consiste en una lámina muy fina y muy maleable, de espesor que oscila entre 0.006 mm (6  $\mu\text{m}$ ) como límite inferior y 0.2 mm (200  $\mu\text{m}$ ) como límite superior, según lo establece la norma ISO 7271:2011 [5]. Entre sus usos más comunes están el de envoltura o empaque para artículos del sector alimenticio, farmacéutico, golosinas, chocolates, y varios más [6]. Sus funciones son las de proteger y conservar el producto, mejorar la presentación ante el consumidor, prevenir el daño por humedad, evitar cambios de aspecto, textura o sabor del producto, brinda protección contra insolación, polvo, entre otros usos [7.]. Para tal propósito, la manufactura del aluminio se conoce como laminación, en el que es tratado y adherido a películas plásticas, papel, tintas o cartulinas.

De la manera más general, la fabricación del papel de aluminio está definida por los siguientes procesos: laminación, impresión, corte, laqueado, grabado y encerado [6,7]. En su manufactura, el aluminio es transportado como bobinas que deben desenrollarse para permitir el procesamiento y al término de cada proceso el aluminio debe secarse, volver a enrollarse en bobinas y continuar al siguiente proceso. Sin embargo, en un proceso poco automatizado y con alto nivel de intervención de los operadores, el factor humano es primordial en la variabilidad de los tiempos de proceso pues de ellos depende la operación de la maquinaria, la manipulación del producto. La eficiencia de cada proceso dependerá de la buena organización de la empresa, de la comunicación entre las áreas, del nivel de entrenamiento del personal y de la capacidad de respuesta para cumplir los programas de mantenimiento preventivo o correctivo.

Básicamente, la laminación de aluminio consiste en adelgazar y estirar el metal en caliente o en frío, al ser pasado entre rodillos rotatorios. La impresión del papel aluminio consiste en el grabado de formas o figuras y puede ser necesaria la aplicación de una tinta, inclusive. También puede ser necesaria la aplicación de un adhesivo y un material secundario como papel bond, polietileno, terfane, cartón, entre otros. El laqueado se realiza después del proceso de impresión y consiste en la aplicación de una capa uniforme de laca por una o ambas caras del papel. En el proceso de encerado, el papel aluminio se sumerge en la cera para que actúe como un adhesivo entre el aluminio y el material del empaque. En el proceso de corte, el papel aluminio se hace pasar por la máquina hendedora en la cual las cuchillas proceden a cortar, de acuerdo a la distancia indicada y dependiendo de la familia del producto, es decir, de acuerdo a la clasificación del material de acuerdo a su grosor. Mediante el proceso de grabado se le da relieve y se modifica la textura del papel [7]. Algunos problemas recurrentes en la manufactura de laminación de papel aluminio son: a) Formación de túneles o formación de pliegues transversales debido a la falta de tensión uniforme a lo ancho del material, ocasionada por desalineamiento de los rodillos y/o variación de calibre o desgaste en los rodillos; b) Formación de arrugas diagonales dirigidas hacia el mismo punto, causadas por algún rodillo, o debido a torceduras de lámina de aluminio, variación en el diámetro del rodillo, variación de presión en el nip en los rodillos o diferencias de temperatura a lo ancho del rodillo; c) Tallado o rizado, se presenta en las capas más cercanas al core o núcleo de la bobina, del material que sale de la impresión. Este defecto es la mayor causal de desperdicio y se debe a la contracción de capas externas y al aire atrapado entre las capas. También se produce al haber insuficiente torque diferencial, pérdida de tensión, falta del control de tensión, cambios de velocidad, o desaceleración rápida del rollo; d) *Curling*, o pérdida de la planitud, es la deformación del material cuando tiende a irse hacia arriba o hacia abajo y se produce por la elongación de alguna de las capas; e) Defectos de apariencia causados por temperatura inadecuada del adhesivo, baja aplicación de adhesivo, o inadecuada temperatura del rodillo de laminación; f) Burbujas o formación de puntos grises que se producen por la ausencia de tinta, falta de contacto del material con la tinta, presencia de partículas extrañas o aire atrapado; e) La delaminación se presenta en el proceso de impresión y es causado por residuales de solventes o un tratamiento inadecuado con los adhesivos; y f) Telescopio, se refiere al desplazamiento lateral de las capas del rollo desde el core hacia el perímetro (deformación de la bobina), se produce por un excedente de adhesivo o por la presencia de aire atrapado durante el embobinado [8]. La aparición de estos defectos puede prevenirse con un adecuado programa de mantenimiento de la maquinaria, supervisión del proceso y entrenamiento



de los operadores; de otra forma, estos defectos son causales de material defectuoso y del retraso en alguna etapa la manufactura, paros de máquinas, cuellos de botella y, por lo tanto, pérdidas para la empresa.

En los procesos de manufactura actuales, las industrias no solamente deben actualizar su tecnología [9]. Las empresas que incorporan en sus procesos de manufactura las herramientas de la Industria 4.0 ganan competitividad en el mercado, mejoran sus procesos, su logística y la gestión en general de la empresa. Así también, logran optimizar el uso de sus insumos, la materia prima, el uso de maquinaria, el recurso humano, la información, los espacios, el consumo de servicios, el manejo de almacenes y la distribución de producto terminado. La automatización, IoT, Machine learning, la visión artificial, la realidad virtual, el modelado por computadora de los procesos de manufactura, y otros más, son herramientas de la industria 4.0 que permiten estudiar, analizar y mejorar los procesos industriales para detectar áreas de oportunidad, cuellos de botella y evaluar cambios en la línea de producción, con la ventaja de no agregar costos adicionales y su experimentación no afecta la línea de producción. El modelado computacional de las operaciones de los procesos de manufactura permite simular, visualizar y monitorear la dinámica de los procesos para evaluar cambios y estrategias de mejora que sustenten la toma de decisiones, no solamente en la estructura organizacional, sino también en la línea de producción o en la proyección de crecimiento y desarrollo de la empresa [10, 11]. En el trabajo de De Carlo *et al.*, [9] los autores reportaron una simulación computacional de eventos discretos enfocado a un análisis de comparación de la eficiencia de tres posibles opciones de distribución de planta. Los parámetros que consideró el estudio fueron el tiempo de producción, el tiempo de espera del operario, la relación entre el tiempo de producción y el tiempo de valor añadido, el número de pedidos anuales. El resultado que obtuvieron permitió la identificación de la mejor distribución de planta, reducir residuos y costes de rediseño, así también, el estudio definió mejoras que, al implementarse, permitirían mejor rendimiento del sistema. El software FlexSim es una herramienta computacional que se ha propuesto para evaluar el desempeño de la organización, sin intervenir físicamente y de manera anticipada a la implementación práctica de alguna modificación en los procesos [12, 13]. En otro estudio, Zomparelli *et al.* se desarrolló un modelo computacional para identificar la mejor redistribución del proceso de manufactura de colchones [14]. El punto de partida del estudio fueron las condiciones de inicio y los tiempos de procesamiento, como resultado de dicho estudio fue una definición de mejoras que impactarían los costos, el desempeño de trabajo y la eficiencia. En otro estudio desarrollado por García y Romero, se evaluó el efecto del número de colaboradores en la eficiencia de una línea de tejido en el sector textil para la producción de insumos de seguridad. Mediante simulación por computadora, los autores compararon el desempeño de cuatro posibles escenarios. Sus resultados sugieren que la implementación de sus hallazgos sería promotora del incremento de la productividad hasta 20 % [15].

En el presente trabajo se describe el análisis de las etapas de manufactura de papel aluminio de una planta que desarrolla corte, impresión y grabado. Se observan problemas de retraso en el procesamiento de material. En la planta se procesan materiales de diferente grosor, clasificado por familias. El orden de procesamiento es indistinto, pero los tiempos de operación son inconsistentes y dependen de múltiples factores, varios de los cuales pueden ser previsible y eliminados. El análisis que se presenta, está centrado en atender el tiempo de procesamiento del material de cada proceso y los factores que lo afectan. El tiempo requerido en el proceso de corte alcanza 5.6 h, el proceso de impresión alcanza 30.9 h y el proceso de grabado alcanza hasta 6.3 h. En suma, el procesamiento de una sola bobina en estos tres procesos puede requerir más de 42 h. Durante este intervalo se registran cambios de turno, rol de operarios, paros por fallos de la operación del proceso, etc. El tiempo de procesamiento incluye el tiempo de uso de la máquina y el tiempo necesario para las maniobras de la bobina. En la planta no se observó el seguimiento de planes del cumplimiento de metas de mejora.

Derivado de lo anterior, los tiempos excesivos de procesamiento y la necesidad de un plan de mejora, justifican la necesidad del presente trabajo, desarrollado para impactar en el tiempo de procesamiento de las bobinas de aluminio. El estudio que se exhibe está basado en información obtenida de un análisis tiempos y movimientos de tres etapas de manufactura: corte, impresión y grabado, se aplican herramientas estadísticas -función PDF gamma- y un modelo mediante el software de simulación Flexsim. El objetivo del presente trabajo es proponer una estrategia de atención a las actividades identificadas como innecesarias, que son evitables y que dispersan los tiempos de procesamiento, así como evaluar su alcance en la manufactura de papel aluminio.

## 2. PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y MÉTODOS

### 2.1. Manufactura de papel aluminio.

El estudio que se presenta se basó en un estudio de tiempos y movimientos desarrollado por Mujica [16] para una línea de producción de manufactura de papel aluminio de una planta del corporativo Almexa, una empresa especializada en la fabricación de productos de aluminio [6]. Para el estudio de tiempos se siguió la técnica de cronómetro, que es una de las metodologías usadas con mayor frecuencia para estos propósitos [17]. En la Figura 1 se muestra el diagrama de las



operaciones de la manufactura de laminado de papel aluminio. Los procesos que fueron considerados son corte, impresión, y grabado. Se observa que los procesos de corte y de grabado se desarrollan en solamente tres operaciones. Sin embargo, el proceso de impresión se desarrolla en cinco operaciones: desbobinado, impresión, secado, impresión y embobinado. Esta condición los posiciona en el de mayor cantidad de operaciones. Se observa que cada proceso inicia con una operación común que es el desbobinado del papel aluminio, posteriormente, el material se introduce a la máquina en la que es procesado y al término del proceso, el material se vuelve a embobinar para ser trasladado al siguiente proceso.

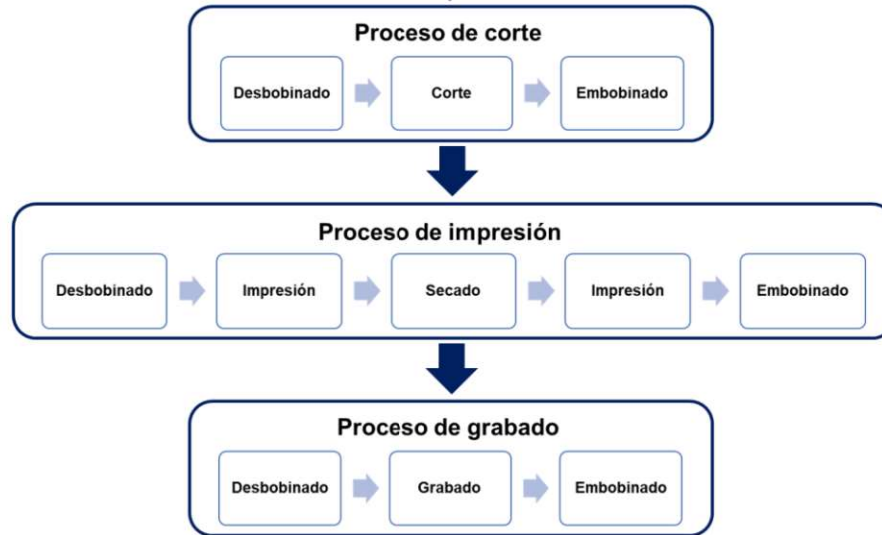


Figura 1 Diagrama de operaciones de los procesos considerados en la manufactura de papel aluminio.

## 2.2. Modelado computacional.

La construcción del modelo de simulación se realizó en el software Flexsim 7.7 siguiendo la configuración del esquema mostrado en la Figura 2.



Figura 2 Diagrama de construcción del modelo de simulación en Flexsim.

En el modelo de simulación se integraron los procesos descritos en la sección 2.1: laminado, corte, impresión, y grabado. La simulación consideró 16 objetos en total, fueron incluidos 7 operadores, 3 máquinas y 6 líneas de espera (Tabla 1). El modelo también considera seis filas o líneas de espera, por ejemplo, cada fila corresponde a la espera del material previo al proceso. El material de flujo del proceso es el aluminio y es transportado entre cada máquina por los operadores.

*Tabla 1 Cantidad de objetos considerados en los procesos para simulación.*

<b>Procesos</b>	<b>Cantidad de operadores</b>	<b>Máquinas</b>	<b>Líneas de espera</b>	<b>Total de objetos</b>
Corte	2	1	2	
Impresión	3	1	2	
Grabado	2	1	2	
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>16</b>

El layout para el modelo de simulación se realizó conforme a las dimensiones de la planta de manufactura del papel aluminio. Las distancias y la colocación de objetos del proceso corresponden a la escala del proceso de manufactura. El layout de la planta se realizó en AutoCad® y se exportó a FlexSim, posteriormente se agregaron las locaciones (máquinas, operadores, conveyors, etc.). En la Figura 3 se muestra el Layout del modelo de simulación preparado en Flexsim y la conexión de objetos y locaciones. En el modelo de simulación se muestra todo el proceso, sin embargo, en el análisis solamente están consideradas las operaciones de corte, impresión y grabado.



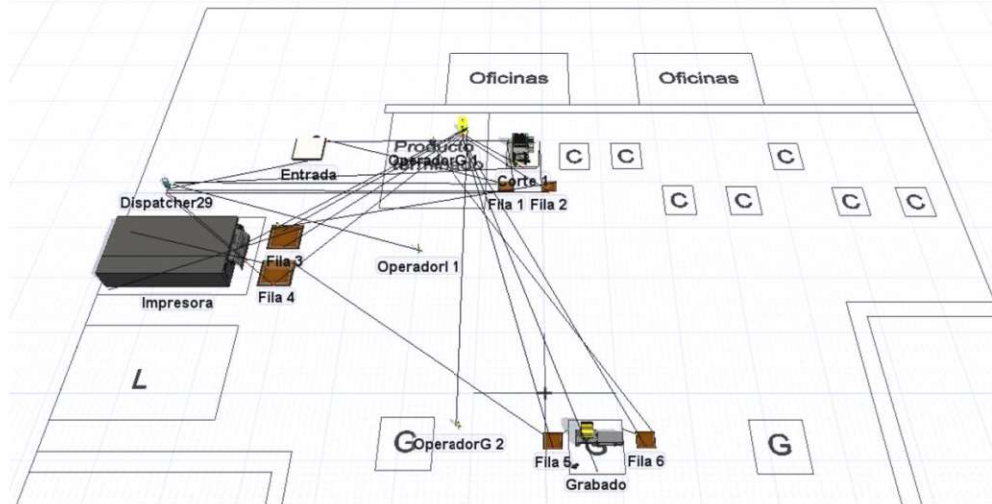


Figura 3 Layout del modelo estructurado en Flexsim para simulación de la manufactura de laminado de papel aluminio. Se muestra la conexión entre los objetos.

### 2.3. Frecuencias de entrega de materia prima y de tiempos de proceso.

La frecuencia de alimentación de la materia prima que entra a la manufactura se programó en Flexsim evitando la saturación de producto antes de entrar a proceso. La frecuencia de alimentación de producto a los procesos de corte, impresión y grabado fue determinada mediante una prueba de verosimilitud desarrollada en el software Minitab con un nivel de confianza de 95%. La distribución gamma (Ecuación 1) fue elegida al satisfacerse la prueba de ajuste de bondad para  $p > 0.05$  [18]. Los parámetros estimados con esta función fueron alimentados a Flexsim para modelar conforme una distribución de datos similar a la real.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, & x > 0 \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (1)$$

La función de densidad mostrada en la Ecuación 1 considera para los parámetros de ajuste que  $\alpha > 0$  y  $\beta > 0$ , siendo la media  $\mu = \alpha\beta$  y la desviación estándar  $\sigma^2 = \alpha\beta^2$  [19].

En el proceso real, el tiempo que demora cada proceso no está bien definido. Es una variable que depende de múltiples factores: tipo de producto, fallas de operación, etc. Sin embargo, los datos de la duración de procesos también siguen una distribución gamma, por lo que, para modelar el proceso, también se hizo de manera aleatoria en Flexsim. El tiempo total de simulación en Flexsim fue de 48 horas.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Comparación de actividades y tiempos de proceso en la planta.

El análisis a las actividades que realizan los operadores en cada proceso se muestra en la Tabla 2. Estas actividades fueron clasificadas en cuatro grupos: operación, transporte, inspección y demora. El proceso más complejo es el de impresión, pues demanda al operador el mayor número de actividades. Se proporcionan ejemplos para cada grupo. Operación: ajustar cuchillas, prueba de grabado después de cambiar la laca, ajuste del rodillo, etc. Transporte: trasladarse por el rodillo, trasladarse para buscar alguna herramienta, hacer una consulta con el supervisor, etc. Inspección: obtención de muestra para evaluación de calidad, revisar viscosidad de la laca, etc. Demora: distracción de los operadores, espera, búsqueda de herramienta, cambio de turno.

Puede observarse que la mayor cantidad de actividades que realiza el operador, independientemente del proceso, son demoras, lo que representa una gran área de oportunidad para proponer una mejora al proceso. En la Figura 4 se compara la distribución del tiempo acumulado de las actividades de cada grupo. Nuevamente, se corrobora que las actividades de demora son las que más retienen al operador.

El conjunto de actividades que realiza el operador se clasificó de acuerdo a la contribución reflejada en el proceso de manufactura. De esta manera, las actividades que son indispensables fueron clasificadas como inevitables, por ejemplo: fallos, eliminación de material defectuoso, ajustes en la máquina, remplazo de piezas en la máquina, inspección de material, ajuste de parámetros de operación de la máquina, calibración de la operación de la maquinaria, limpieza de la maquinaria, etc. Por otro lado, las actividades que no contribuyen al proceso de manufactura fueron clasificadas como evitables, a partir de las cuales se puede diseñar una estrategia que las elimine.



Tabla 2 Comparativo de actividades y tiempos que demandan los procesos de corte, impresión y grabado.

Comparación de tiempos de los procesos	Clasificación y cantidad de actividades observadas				Total de actividades por proceso
	Proceso	Operación	Transporte	Inspección	
Corte	9	0	3	28	40
Impresión	25	5	9	67	106
Grabado	9	0	1	39	49

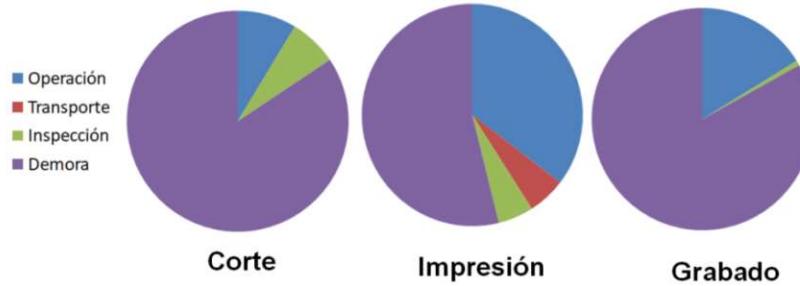


Figura 4 Distribución del tiempo de preparación en porcentaje.

También pueden mencionarse algunos ejemplos de actividades evitables: espera al técnico, actividad duplicada, uso de piezas equivocadas, falta de material preparado para cargar la máquina, búsqueda de herramienta, paros de máquina no justificados, espera de un operador, uso de material defectuoso, actividades propias del operador o abandono de la máquina, realización equivocada de alguna actividad, uso de material mal etiquetado, actividades diversas, etc. Estas actividades limitan el desarrollo de los procesos y son causales de los paros de máquina, paros de proceso o detienen material sin procesar en la línea de manufactura.

Tabla 3 Comparativo de los tiempos de cada proceso de acuerdo al tipo de actividades que realiza el operador para preparar el material y al tiempo de uso de la máquina.

Comparación de tiempos de los procesos	Clasificación del tiempo		Tiempo de preparación del proceso [A] + [B] = [C] (min)	Tiempo de máquina [D]		Tiempo de proceso por bobina [C] + [D]	
	Inevitable [A] (min)	Evitable [B] (min)		Tiempo mínimo (min)	Tiempo máximo (min)	Tiempo mínimo (min)	Tiempo máximo (min)
Corte	98.80	167.2	266	10.51	73.43	276.51	339.43
Impresión	706.88	696.56	1,403	122.97	449.97	1,526.41	1,853.41
Grabado	202.01	121.30	323	3.01	54.4	326.32	377.71
<b>Intervalo de tiempo necesario para procesar una sola bobina (min):</b>						<b>2,129.24</b>	<b>2,570.55</b>

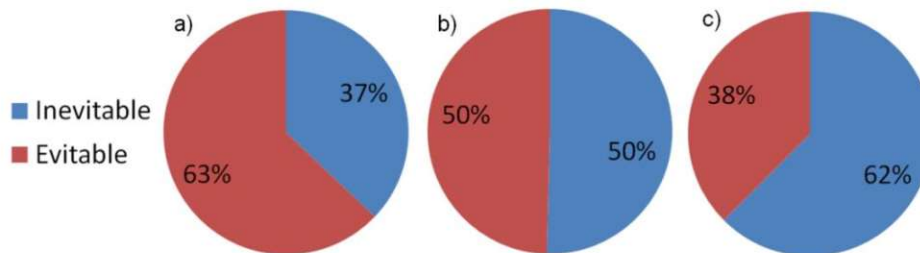


Figura 5 Acumulación de tiempos por proceso: a) Corte Impresión, b) Impresión y c) Grabado.

La cuantificación en tiempo de las actividades evitables y las inevitables se exhibe en la Tabla 3. La preparación de material para impresión es donde se registra la mayor cantidad de actividades. La comparación porcentual de actividades evitables e inevitables se muestra en la Figura 5 para los tres procesos.

El impacto que tiene el conjunto de actividades en el procesamiento del material se puede conocer en la Tabla 3. El tiempo de preparación del material [C] es el resultado de sumar el tiempo que consumen las actividades inevitables [A] y las actividades evitables [B]. Los tiempos exclusivos de uso de la máquina requerido para procesar el aluminio depende de múltiples factores y no está estandarizado. Se encontró que depende del grosor del material, de los paros técnicos, de los



defectos encontrados, etc. En la Tabla 3 también se reporta el rango de datos (tiempo mínimo y tiempo máximo) medido en la planta por cada máquina: corte, impresión y grabado. Puede observarse en esta misma tabla también que el tiempo total requerido para el procesamiento total de una sola bobina hay un rango de variación de va de 2,129 min (35 h) a 2,570 min (42 h).

### 3.2. Simulación de la variabilidad de los procesos.

El orden de las piezas procesadas en la simulación por Flexsim fue aleatorio, sin preferencia específica por algún tipo de material o familia (grosor de la lámina). En el estudio no se observó que hubiera acumulación de material en ninguna de las filas de espera. Los tiempos mínimos ( $t_{min}$ ) y máximo ( $t_{max}$ ) que se obtuvieron por simulación se presentan en la Tabla 4, y se comparan con el rango de tiempos registrados en la planta de manufactura.

Tabla 4 Comparación de la distribución de tiempos de proceso en planta, respecto a la simulación.

Proceso	Planta		Simulación	
	$t_{min}$ (min)	$t_{max}$ (min)	$t_{min}$ (min)	$t_{max}$ (min)
Corte	10.51	73.43	10.02	54.60
Impresión	122.97	449.97	117.99	355.80
Grabado	3.01	54.4	6.37	50.18

Para conocer la correspondencia de los valores obtenidos por simulación con los datos de planta, en la Figura 6 se compara la distribución gamma (Ecuación 1) de los tiempos de procesamiento. Los datos se muestran en la manera siguiente, según el proceso: Figura 6a – corte, Figura 6b – impresión y Figura 6c – grabado.

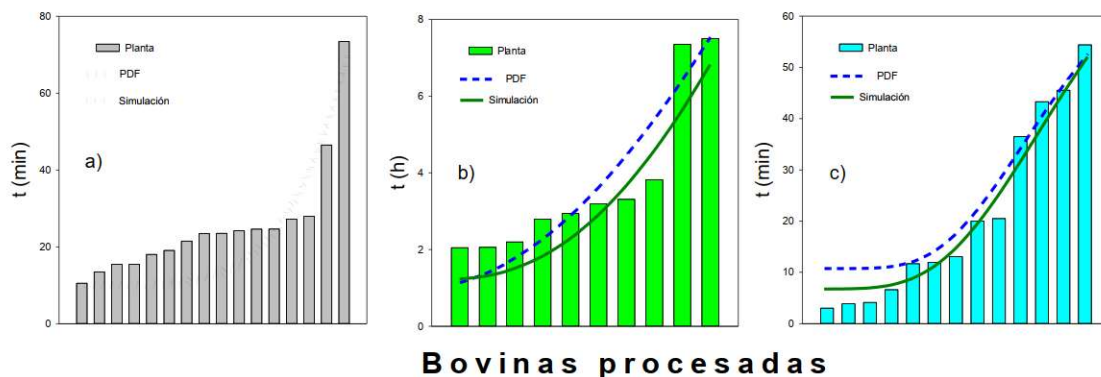


Figura 6 *Dispersión de los tiempos de procesamiento de planta y su distribución por estimación estadística y por validación computacional para los procesos de: a) Corte, b) Impresión y c) Grabado. Las barras representan los tiempos de procesamiento de bobinas individuales medidos en planta. La distribución gamma se representa con una en color verde y la validación computacional se representa con líneas segmentadas en color azul.*

En la Figura 6, los datos de los tiempos medidos en planta están representados con gráficos de barras verticales. Cada barra corresponde al tiempo de procesamiento de una sola pieza (bobina de aluminio). Esta pieza fue procesada en orden aleatorio en la planta de producción, independientemente al espesor del material (familia). La longitud de las barras representa el tiempo necesario para que la pieza sea procesada en la máquina incluyendo cuatro tipos de actividades propias de la operación de la máquina: a) las que son propias del proceso: desbobinado, lavado, secado, embobinado, b) los tiempos de carga y descarga y el tiempo para resolver roturas, c) las actividades que realiza el operario para el funcionamiento de la máquina: ajuste de cuchillas, toma de muestras, revisión de los parámetros de la maquinaria, ajuste de rodillos y d) los paros de la máquina por falla en la presión de la máquina, derrame de tinta o fallos mecánicos o eléctricos. Se observa que el tiempo de procesamiento más extenso ocurre en el proceso de impresión (más de 7 h), mientras que los procesos de corte y grabado demandan tiempos más cortos (73 y 54 min respectivamente).

La diferencia de tamaño entre la barra más corta y la barra más larga del mismo proceso, corresponde a la información que se mostró en la Tabla 4 ( $t_{min}$  y  $t_{max}$ ). Las dos funciones de densidad gamma (Ecuación 1) también se presentan en la Figura 6. La curva que representa la distribución de los datos registrados en la planta está representada por la curva PDF mostrada en color azul y segmentada). La segunda curva mostrada (línea continua en los procesos de laminado, impresión



y grabado, y discontinua en el gráfico del proceso de corte) corresponde a la función PDF de los valores que fueron estimados mediante simulación computacional en Flexsim.

Las curvas mostradas representan la variabilidad que se registra en la duración de los procesos y que es atribuible a varios factores, básicamente, los tipos de familia del material procesado, el número de operaciones, el factor humano y los eventos inherentes a la operación de la maquinaria, que, a su vez, también son muy numerosos y diversos. Cada familia es susceptible de causar diferentes tipos paros, por ejemplo, deformación de la bobina, incumplimiento del estándar de calidad del producto, producto defectuoso por fallas, desestabilización de la maquinaria, entre otros.

### **3.3. Propuesta de mejora y su efecto en la manufactura.**

El análisis del desempeño de las etapas de la manufactura de papel aluminio permitió identificar 20 actividades evitables en el proceso de corte, 56 en el proceso de impresión y 23 en el proceso de grabado. La extinción de dichas actividades es posible, siguiendo la filosofía de trabajo de manufactura esbelta. La identificación y extinción de todo tipo de desperdicios, incluyendo aquellas actividades que demandan exceso de recursos mejora el aprovechamiento del tiempo de uso de maquinaria, reduce los tiempos de espera, los movimientos, el sobre-procesamiento, los traslados y los productos con defecto [20]. La estrategia que se propone se conforma por seis acciones y se enfoca a extinguir actividades no necesarias, tal como se describe a continuación.

#### **3.3.1 Implementación de un programa de capacitación al personal de planta.**

Este programa permitirá que los operadores de la maquinaria atiendan de manera pronta operaciones como ajuste de las máquinas, manejo de material y en general, realización de actividades de mantenimiento autónomo de las máquinas, entre otras.

#### **3.3.2 Implementación de un programa efectivo de mantenimiento.**

Este programa debe considerar y verificar la ejecución de mantenimiento preventivo y correctivo oportuno de toda la maquinaria y equipo. Su efecto se verá traducido en prevención de fallas no esperadas y evitar demoras o paros del proceso.

#### **3.3.3 Mejoramiento del aprovisionamiento en la cadena de suministro.**

La elaboración de un plan efectivo de distribución de insumos, materia prima y la instalación de una estación cercana al área de trabajo que esté abastecida con herramientas indispensables. Esta acción evitará la distracción de los operarios, el abandono de su área de trabajo y la falta de atención al proceso.

#### **3.3.4 Implementación de un plan de estandarización de trabajos.**

Este plan permitirá la homologación del desarrollo de actividades de los procesos, y permitirá que todos los operadores que intervienen en la operación de maquinaria y manejo de material realicen sus actividades de manera homogénea y oportuna.

#### **3.3.5 Implementación de un sistema de comunicación efectiva.**

Un sistema de comunicación por radio, por internet, apoyado con focos de colores o sonidos, evitará que operador requiera trasladarse para comunicarse con el supervisor o con el personal de mantenimiento.

#### **3.3.6 Sistema de muestreo y verificación programado.**

Se refiere a la implementación de un sistema coordinado para la toma de muestras para el aseguramiento de la calidad del producto, de manera que el muestreo no provoque paros excesivos.

Se asume que la implementación coordinada de esta estrategia debe reducir la variabilidad del tiempo de procesamiento en cada proceso, y de manera secundaria, impactar en la reducción de paros, disminución de material defectuoso, eficiencia del uso de la maquinaria, aumento del número de piezas procesadas, entre otros. De esta manera, la estimación de los tiempos de producción considerando la eliminación total de actividades evitables permite establecer metas que impacten en cada proceso. En porcentaje, la reducción estimada de los tiempos de procesamiento es: 51% en el tiempo en el corte, 62% en el tiempo de impresión y 68% en el tiempo en el grabado. El beneficio de tal propuesta no solamente se espera en la mejora del tiempo de producción, sino también en el incremento de bobinas procesadas y la reducción del consumo de servicios como la electricidad, entre otros.

## **4. CONCLUSIONES.**

Se analizaron las actividades desarrolladas en los procesos de manufactura de papel aluminio. A partir de un estudio de tiempos y movimientos se realizó la identificación de las actividades que realizan los operadores de la maquinaria: operación, transporte, inspección y demora. Se observó que en el grupo de demora se concentran el mayor número de actividades que realiza el operario y consume la mayor parte de tiempo, más del 50 %, inclusive. Esta condición es relevante y merece atención.

También se analizó la clasificación de las actividades de acuerdo a la contribución que tienen a la manufactura. Se evidenciaron actividades que son indispensables para los procesos y por lo tanto son inevitables. Sin embargo, otro grupo de actividades son evitables debido a que no aportan a la manufactura, causan retrasos o paros y reducen la eficacia de todo el proceso. Se



observó que las actividades evitables son numerosas y se eleva más del 60 % en el proceso de grabado, por ejemplo. Esta diferenciación de actividades explica parcialmente los tiempos extendidos que duran los procesos, hasta 30 h en el proceso de impresión, y justifica la necesidad de contar con estrategias de mejora.

También se estudió la duración de los tiempos de cada proceso y se encontró amplia variabilidad y una dispersión que sigue una función de distribución gamma. Esta misma variable fue modelada en Flexsim. Se determinó que la dispersión de los tiempos de procesamiento se debe a múltiples factores, entre otros, el cambio del tipo de producto de procesamiento, el factor humano, la maquinaria y el cumplimiento de los planes de mantenimiento, o la interrupción de servicios de apoyo.

Para cumplir el objetivo del estudio se desarrolló una propuesta de mejora con un enfoque de manufactura esbelta para la eliminación de las actividades evitables, principalmente las demoras. Esta propuesta contempla seis acciones estratégicas que se concentran en capacitación, mantenimiento, aprovisionamiento, estandarización, comunicación y verificación. El alcance de esta propuesta es reducir considerablemente la duración de cada proceso e impactar en la reducción del tiempo de procesamiento de cada bobina. Su implementación está basada en el cumplimiento de metas para disminuir hasta el 68 % del tiempo de proceso. El nivel de implementación y el seguimiento correspondiente agregarán valor a la cadena de producción, que estará reflejado en la reducción de los tiempos de procesamiento, la prevención de paros y en el rendimiento global.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades; (2008). Resumen de Salud Pública. Aluminio. Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs22.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs22.pdf) (última consulta: agosto, 2021).
- [2] Casting. Alluminium in packaging. Disponible en: <http://packaging.world-aluminium.org> (última visita: 30 de mayo de 2021).
- [3] CANACERO. Cámara Nacional del Aluminio y el Acero; (2021). Disponible en: [www.canacero.org.mx](http://www.canacero.org.mx) (última consulta: agosto, 2021).
- [4] Gasik, Michael M.; Mazur, Vladislav I. (2003). Creation of master alloys for aluminum. Cap. 3. En: *Handbook of aluminium*. Totten George E.; Mackenzy, D Scott. Vol. 2. Marcel Dekker Inc. New York. Pp. 81-114.
- [5] ISO 7271:2011. Aluminium and aluminium alloys — Foil and thin strip — Dimensional tolerances.
- [6] Maldonado M. A. (2008). *Acciones para aumentar la eficiencia, en el área de convertido en una empresa de papel aluminio*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo.
- [7] Kerry Y. J. (2012). Aluminium foil packaging. Cap. 9. En: *Packaging technology. Fundamentals, materials and processes*. Woodhead Publishing. Estados Unidos. Pp 163-177.
- [8] Wilmer. (S/f). El empaque y conversión. [www.elempaque.com](http://www.elempaque.com) (última visita: 15 de junio de 2021).
- [9] De Carlo, F.; Arleo, M. A.; Borgia, O.; Tucci, M. (2013). Layout design for a low capacity manufacturing line: A case study. *International Journal of Engineering Business Management*. 5: 1-10.
- [10] Law Averill M.; (2015) *Simulation Modelling and Analysis*. Fifth Edition. McGraw Hill. Tucson, Arizona, USA.
- [11] Florescu, A.; Barabas, S. A. 2020. Modeling and simulation of a Flexsim manufacturing system- A basic component Industry 4.0. *Applied Sciences*, 10, 20.
- [12] Ishak A.; Faiz A. Z.; Sekar A. C. (2020). Production line simulation in vise using the Flexsim application. IOP conference series: *Materials Science and Engineering*, 1003, 012103.
- [13] Antonelli, D.; Litwin, P.; Stadnicka, D. (2018). Multiple system dynamics and discrete event simulation for manufacturing system performance evaluation. 6<sup>th</sup> CIRP Global Web Conference. Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era. *Procedia CIRP*. 78: 178-183.
- [14] Zomparelli, F.; Petrillo, L.; Di Salvo, B.; Petrillo, A. (2018). Re-engineering and relocation of manufacturing process through a simulative and multicriteria decision model. *IFAC PapersOnLine*, 51, 11, 1649-1654.
- [15] García, F. J.; Romero, J. G. (2020). Diseño de un modelo de simulación, utilizando un software de eventos discretos, en una línea de producción de tejido industrial. *Revista Internacional de Investigación Innovación Tecnológica*, 44, 22-40. Coahuila, México.
- [16] Mujica, M. H. (1999). *Redistribución y aplicación de tiempos y movimientos en una planta industrial*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- [17] Zandin, Kjell; Maynard, Harold. (2001). *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. McGraw-Hill. New York.
- [18] Mendenhall, W.; Beaver, R. J.; Beaver, B. M. (2006) *Introducción a la probabilidad y estadística*. Décima tercera edición. CENGAGE Learning. México.



[19] Vargas Sabadías, Antonio. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Universidad de Castilla-La Mancha. Segunda edición. Colección Ciencia y Tecnología. España.

[20] Hernández, J. C.; Vizán, A. I. (2013). *Lean Manufacturing; Conceptos, técnicas e implantación*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.

### **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México), por la beca otorgada en la Convocatoria de Becas Nacionales 2020 a la coautora P. Vasquez - Macias.

# COINI 2021

## XIV° Congreso de Ingeniería Industrial

Se certifica que

Rene Sanjuan Galindo,  
Paulina Vasquez Macias,  
José Isidro Hernández Vega

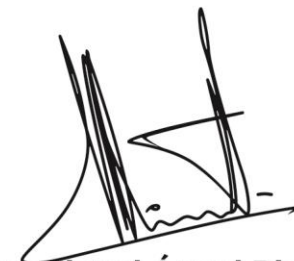
ha participado del XIV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial (COINI) - Virtual,  
realizado del 1 al 6 de noviembre de 2021, como Autores del trabajo:  
CO21-C31. Análisis de las etapas de un proceso de manufactura de papel aluminio a partir de  
un estudio de tiempos.



**Ing. Guillermo J. Oliveto**  
Decano UTN Buenos Aires



**Ing. Guillermo Valvano**  
Presidente COINI 2021



**Esp. Miguel Ángel Risetto**  
Presidente ACCINI

# Análisis de la variabilidad del desarrollo de un proceso de laminado de papel aluminio.

Vasquez-Macias, Paulina, Hernández-Vega José-Isidro, Osorio-Abraham Mario-César, Sanjuan-Galindo, Rene\*  
\*rene.sanjuan@itnl.edu.mx

Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Nuevo León, Apodaca, N.L., México.

## Antecedentes

El aluminio tiene amplio uso industrial y doméstico. Su uso más general es como papel, que se presenta como una lámina muy fina según la norma ISO 7271:2011 [1]. Las aplicaciones comerciales del papel son como envoltura o empaque de artículos del sector alimenticio o farmacéutico, entre otros [2]. La manufactura del papel aluminio, es conocida como laminación y consiste en una cadena de procesos semiautomatizados, por lo que el factor humano en la operación de la maquinaria y manipulación del producto, así como otros factores técnicos y de procedimiento, juegan un papel de importancia. El estudio que se presenta corresponde a la laminación de una planta en la que se procesan materiales de diferente grosor, clasificados por familias. En la línea se procesan cantidades diferentes de material y la secuencia de procesamiento de familias es indistinta, por lo que los tiempos de operación son inconsistentes.

## Justificación

En el laminado de papel aluminio, la variabilidad de los tiempos de procesamiento están determinados por problemas diversos, entre otros: desarrollo de actividades que no aportan al proceso, heterogeneidad de las familias que se procesan, diferentes cantidades de material procesados de las familias y secuencias aleatorias de procesamiento. El efecto de dichos factores en el proceso hacen inconsistente el tiempo de operación y causa paros prolongados y desperdicios.

## Objetivos

### Objetivo general:

Analizar la variabilidad en el proceso de laminado de papel aluminio y proponer un modelo computacional de su desarrollo.

### Objetivos específicos:

Analizar los registros de tiempos y movimientos de un proceso de laminado de papel aluminio.  
Diseñar una estrategia de simulación computacional para mejorar el proceso de laminado de papel aluminio.

## Alcances

Se desarrolla una secuencia de familias para el procesamiento de laminado de papel aluminio a partir del análisis del proceso y un modelo computacional.

## Propuesta de solución

En el presente estudio se analizan los registros de tiempos y movimientos de un proceso de laminado de papel aluminio y se desarrolla una estrategia de simulación computacional del laminado de papel aluminio de los procesos de impresión, grabado y corte.

## Metodología

### Diagrama de proceso y simulación computacional.

El proceso de laminado de papel aluminio se estudió de acuerdo al diagrama mostrado en la Fig. 1. [3 y 4] y el modelado se realizó en el software Flexsim de acuerdo al layout mostrado en la Fig. 2, conforme a las dimensiones reales de la planta. El procesamiento del material se realizó mediante una secuencia ordenada de acuerdo al calibre (de menor a mayor) y considerando 50 Kg de material en cada caso.

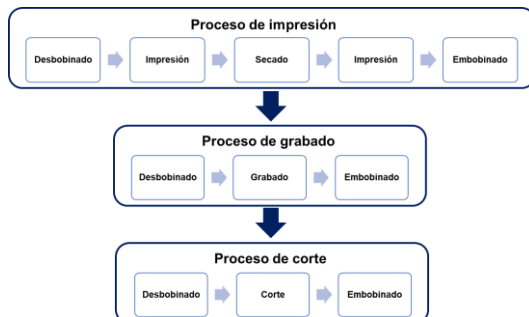


Fig. 1. Diagrama de operaciones del proceso de laminado de papel aluminio.

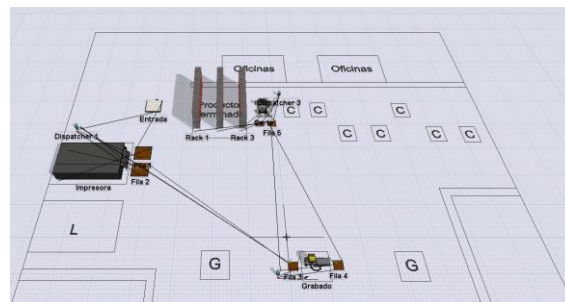


Fig. 2. Layout del modelo en Flexsim del proceso de laminado de papel aluminio.

## Resultados

### Validación de los tiempos de procesamiento y factores del proceso.

La distribución del tiempo de procesamiento fue determinado mediante la prueba de verosimilitud con un nivel de confianza de 95%, la distribución gamma satisface la prueba de ajuste de bondad para  $p > 0.05$  (Fig. 3). En el análisis del proceso se detectaron factores que afectan el tiempo total del laminado (Fig. 4), que merecen analizarse para desarrollar una propuesta integral de mejora.

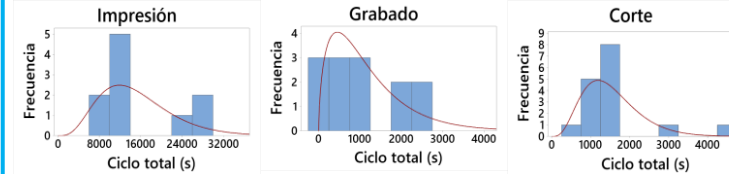


Fig. 3. Análisis de distribución del tiempo de procesamiento.



Fig. 4. Factores del proceso de laminado.

### Variabilidad de las actividades.

Las actividades que realizan los operadores en la planta fueron clasificadas en cuatro grupos (Fig. 5), siendo las actividades de demora (espera de un operador, búsqueda de herramienta, etc.) las que más retienen al operador.

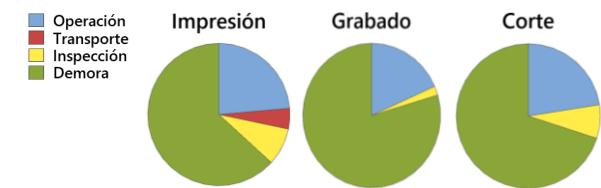


Fig. 5. Clasificación del tiempo de actividades realizadas por los operadores.

### Comparación de tiempos de proceso.

La variabilidad de los tiempos de cada proceso, normalizados y de acuerdo al calibre, se muestra en la Fig. 6.

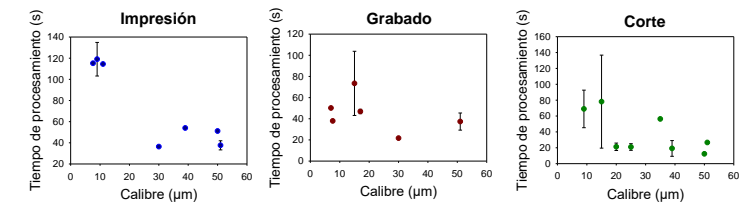


Fig. 6. Variabilidad de los procesos de impresión, grabado y corte de acuerdo a la familia (calibre) en el laminado de papel aluminio.

### Simulación del proceso.

Mediante simulación computacional se sugiere una secuencia de procesamiento que podría mejorar el aprovechamiento de la utilización de la maquinaria de los procesos de grabado y corte hasta en 40% (Fig. 7). Mediante el método desarrollado, podrán evaluarse diferentes secuencias que permitan detectar áreas de oportunidad en el aprovechamiento del uso de maquinaria y de las actividades que no aportan eficiencia al proceso.

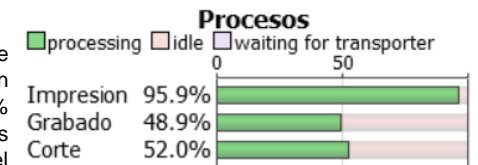


Fig. 7. Tiempo de procesamiento en impresión, grabado y corte.

## Bibliografía

- [1] ISO 7271:2011. Aluminium and aluminium alloys — Foil and thin strip — Dimensional tolerances.
- [2] Maldonado M. A. (2008). *Acciones para aumentar la eficiencia, en el área de convertido en una empresa de papel aluminio*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Hidalgo.
- [3] Mujica, M. H. (1999). *Redistribución y aplicación de tiempos y movimientos en una planta industrial*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- [4] Zandin, Kjell; Maynard, Harold. (2001). *Maynard's Industrial Engineering Handbook*. McGraw-Hill. New York.



# EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

## RECONOCIMIENTO

A

**PAULINA VASQUEZ MACIAS, RENÉ SANJUAN GALINDO, JOSÉ ISIDRO  
HERNÁNDEZ VEGA AND MARIO CÉSAR OSORIO ABRAHAM**

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTICULO:

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL DESARROLLO DE UN PROCESO DE LAMINADO DE  
PAPEL ALUMINIO.

EN EL MARCO DE LA 8ª JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA, CELEBRADA  
DEL 25 AL 27 DE MAYO DE 2022, EN EL TECN/CENIDET.

CUERNAVACA, MORELOS, 27 DE MAYO DE 2022



**DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ**  
**DIRECTORA DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

AXqfpRctL4t8DBoIKvI2JvYIbe0QKM10WbssUj0E6o3zXPDaeEPE/aJq12g3Co8tMKBU1zWDZ1fbp+axu7nNo6  
no1TWnTjhm94sYwJ4gTv+ze2noEaFCw07BuUrbn5lqXnj+Er09hLNdQx67d4X8BmaOX1EkYRNwJ4fBvpej9xRR  
VoX9BWGEX3wDyF5mQXOT1GC+CwHlRpaOrF2Qyee/7sK1s0BL39ufcoNC2LsVeMNCLOW+Oijr1jZmSWz0rWBOs  
JgaTUMFkOnyEKoqMGJRh4s0c/07LQauv5J3WNeyp1WzYjt8KsKeDV54895P2j4fsbeU1RIWBGCEVUViRJQ0w==

JCYTA041822

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>