

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial



OPTIMIZACIÓN DE FORMATOS DE PAPEL DE UNA EMPRESA CARTONERA PARA LA REDUCCIÓN DE HORAS PARADAS Y GASTOS UTILIZANDO UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Gabriel William Valenzuela Llauca

Código 20183377

Asesor

Paul Angello Daniel Sanchez Soto

Lima – Perú

Octubre de 2024

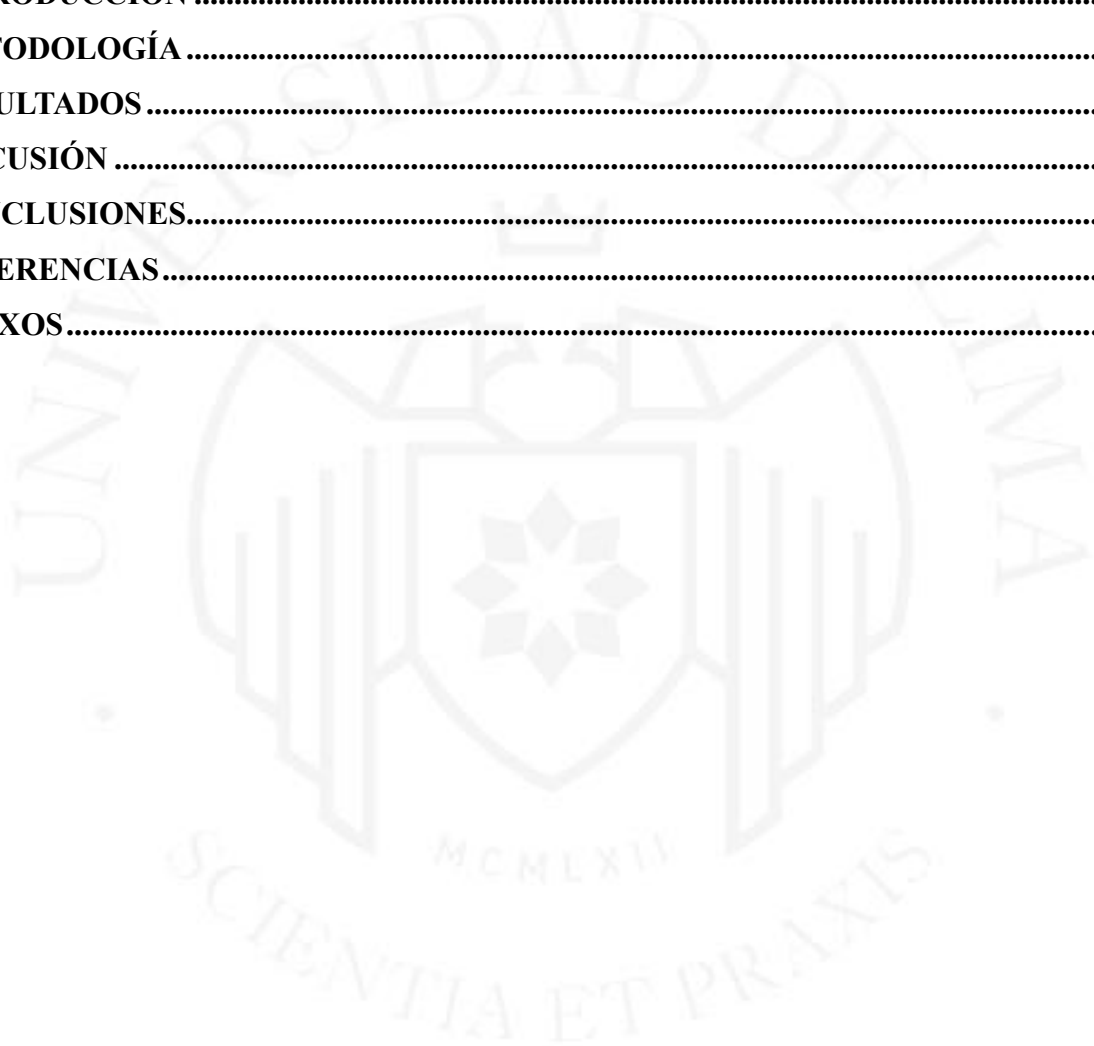




**OPTIMIZATION OF PAPERS FORMATS OF A
CARTON COMPANY TO REDUCE DOWNTIME
AND EXPENSES USING A MIXED INTEGER
LINEAL PROGRAMMING MODEL**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
METODOLOGÍA.....	5
RESULTADOS.....	7
DISCUSIÓN.....	13
CONCLUSIONES.....	14
REFERENCIAS.....	15
ANEXOS.....	18



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Formatos de papel que cada corrugadora utiliza.....	8
Tabla 3.2 Variación de desperdicio utilizando los formatos óptimos	12
Tabla 3.3 Variación de utilidad utilizando los formatos óptimos.....	12
Tabla 3.4 Variación de horas paradas por el problema de diversidad de formatos	12
Tabla 3.5 Variación de horas paradas totales utilizando formatos óptimos	13



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diseño del modelo.....	6
Figura 3.1 Value Stream Mapping - Situación Inicial.....	7
Figura 3.2 Árbol de Problemas para las paradas no planificadas en la actividad de corrugado	7
Figura 3.3 Diagrama de Pareto para las paradas no planificadas en la actividad de corrugado	8
Figura 3.4 Restricciones de capacidad y demanda para el modelo de optimización.....	9
Figura 3.5 Comparación de valores: Desperdicio - Horas Paradas - Utilidad.....	13



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 1.....	18
Anexo 2 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 2.....	18
Anexo 3 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 3.....	18



Optimización de formatos de papel de una empresa cartonera para la reducción de horas paradas y gastos utilizando un Modelo PLEM

Gabriel William Valenzuela Llauca

20183377@aloe.ulima.edu.pe

Universidad de Lima

Resumen: El crecimiento de la demanda cartón corrugado exige la eficiencia de los procesos de las empresas cartoneras. Por ello, la presente investigación se enfoca en la reducción de horas paradas y desperdicios en la actividad de corrugado. Para diagnosticar las causas, se utiliza las herramientas Value Stream Mapping, Diagrama de Árbol de Problemas y Diagrama de Pareto. La causa principal es la diversidad de formatos; por lo que, se aplica un Modelo Matemático de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) en el software LINGO. Con la solución del modelo, se redujo de 45 a 15 formatos de papel, luego se realizó un escenario de producción del mes de agosto con los formatos óptimos logrando reducir en 23.55% de desperdicio y 41.68% de horas paradas totales. Asimismo, la utilidad incrementó en 2.90%. La solución del modelo funciona para el cartón corrugado tipo industrial mientras exista la disponibilidad de stock de los formatos óptimos.

Palabras Claves: Cajas de cartón, optimización, formatos papel, paradas, desperdicios

Abstract: The grown in demand for corrugated cardboard requires the efficiency of the processes of cardboard companies. Therefore, the present research focuses on the reduction of downtime and waste in the corrugated activity. To diagnose the causes, the Value Stream Mapping, Problem Tree Diagram and Pareto Diagram tools are used. The main cause is the diversity of formats; then, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) Mathematical Model is applied in the LINGO software. With the model solution, it was reduced from 45 to 15 paper formats, then a production scenario for the month of august was made with the optimal formats, managing to reduce waste by 23.55% and total downtime by 41.68%. Profit also increased by 2.90%. The model solution works for industrial-type corrugated cardboard as long as there is stock availability of the optimal formats.

Keywords: cardboard boxes, optimization, paper formats, unplanned downtime, waste

1. INTRODUCCIÓN

El cartón corrugado es un material producto del pegado de la superposición de capas de papel procedente de fibras celulósicas extraídas de madera o papel reciclado (“Cartón Corrugado: tipos y usos en el embalaje”, 2018) con el objetivo de proteger, transportar y almacenar productos (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo [Mincetur], 2009).

Según el anuario del Ministerio de Producción (2022), la producción de cajas de cartón corrugado en el Perú incrementó en 15.88% en el 2020 y 6.30% en el 2021 respecto al año anterior. Asimismo, la tendencia de la producción de cajas de cartón es lineal positiva, por lo que se pronostica la necesidad de incrementar la producción. Esto se debe a que, en los últimos años, la demanda se ha incrementado por el crecimiento y nacimiento de nuevas empresas; según un estudio de Exactitude Consultancy (2022), se estima un crecimiento anual compuesto de 4% en el mercado global de empaques corrugados del 2022 a 2029. Este crecimiento conlleva, a las cartoneras, optimizar los procesos de producción del cartón corrugado.

Problemática

La empresa que participa en esta investigación es una de las líderes en el mercado peruano de cartón corrugado cuyo objetivo es el crecimiento y aumento de participación del mercado; sin embargo, su participación de mercado se redujo en 22%, en el primer trimestre del 2023. En parte se debe por la ineficiencia de las corrugadoras ocasionado por las 422,67 horas paradas no planificadas al mes con un desperdicio mensual de 3 282 TM.

Pregunta de investigación

La pregunta de investigación es: ¿Se puede reducir las horas paradas no planificadas y el desperdicio mediante la optimización de formatos de papel con Modelo de Programación Lineal Entera Mixta?

Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es proponer un modelo matemático de optimización lineal entera mixta que permita reducir las horas paradas no planificadas en las 3 corrugadoras. Los objetivos secundarios son disminuir el desperdicio y aumentar la rentabilidad.

Justificación

Las horas paradas no planificadas y el desperdicio generan gastos que afectan a la rentabilidad de la empresa y al cumplimiento de pedidos de los clientes. Estos problemas influyen en la pérdida de participación del mercado de cartón corrugado, ya que los clientes exigen un lead time menor

con un bajo costo. Con esta investigación, se reducen las horas paradas y el desperdicio, brindando a la empresa la disponibilidad de seleccionar estrategias de captación de clientes por lead time menor y bajos costos. Asimismo, contribuye a futuras investigaciones de optimización de formatos de papel en una empresa cartonera, ya que existe poca información del presente tema.

Marco Teórico

Modelo de Programación Lineal de Enteros Mixta: Se diferencia de la programación lineal por no cumplir con el principio de divisibilidad, asimismo, usa variables enteras y binarias (Fonseca, 2017, p.19).

Cartón Corrugado: Es un embalaje para productos diversos como: frutas, máquinas, producto de manufactura y entre otros. Su utilización se debe a la posibilidad de combinar papeles que permiten la resistencia, flexibilidad y calidad requerida (Mincetur, 2009).

Formatos: Se refiere a la dimensión que tiene el papel, las longitudes se elaboran de acuerdo con el uso que se quiere dar (“Formatos de papel: tamaños y usos más comunes”, 2019).

Value Stream Mapping: Es una herramienta que “permite a los stakeholders de una organización, visualizar y entender el proceso; además, permite conocer el valor, diferenciarlo del desperdicio y crear un plan de acción para eliminarlo dentro del proceso” (como se cita en Paredes, 2017, p.263).

Antecedentes

Qhispe y Arroyo (2021) realizaron un análisis de optimización a una empresa ecuatoriana de envases de cartón cilíndricos. Utilizaron el Value Stream Mapping como herramienta de diagnóstico y de optimización. Su investigación validó el uso del VSM como herramienta para la determinación de problemas en los procesos productivos, así como las posibles soluciones.

Medina et al. (2020) trabajaron en un modelo matemático para optimizar el corte de pliegues de cartulina de una empresa poligráfica de Cuba. Para ello, utilizaron la programación lineal de enteros desarrollando un modelo de minimización de cortes según formatos de la materia prima disponible. Lograron disminuir el desperdicio y demostraron que el uso de un modelo matemático permite disminuir los desperdicios.

Lucero et al. (2014) estudiaron la formulación de programaciones enteras con el fin de optimizar el problema de corte de banda de 2 esquelas (2-SSPCsc). El modelo desarrollado permite la producción de los pedidos disminuyendo los residuos laterales por el corte. Como conclusión,

afirmaron que el uso de una programación entera resulta efectivo para optimizar el número de cortes necesarios disminuyendo los residuos.

Hamadeh y Hellstrom (2008) analizan dos enfoques para optimizar la cantidad de cartones y cumplir con los pedidos de los clientes. El primer enfoque es de programación lineal y el segundo, algoritmos evolutivos. Los resultados concluyeron que el primero optimiza los desechos recortados y el segundo es una optimización combinatoria entre costos, servicios al cliente y otros objetivos; sin embargo, aún falta desarrollar y estudiar más el algoritmo.

Velasquez et al. (2007) propusieron un algoritmo evolutivo multiobjetivo para optimizar el nivel de planificación ponderada, pérdidas y costes. La finalidad de la planificación es lograr el equilibrio en entregar al cliente a tiempo y optimizar los recursos de la empresa.

Acevedo et al. (2003) analizaron el problema del refile o desperdicio cuando se programa cajas en la corrugadora. Evaluaron 7 restricciones en el modelo global con el objetivo de garantizar el flujo de materiales en función de la máquina restrictiva cumpliendo la fecha de entrega del pedido. El modelo No Lineal propuesto creó la posibilidad de disminuir el problema de desperdicio; sin embargo, no ofrece una solución óptima.

Lopez (2017) desarrolló una investigación de problemas de optimización combinatoria donde toca problemas de cortes y otros. Los problemas de corte están relacionados a empresas papeleras y para ello desarrolló una metodología cuya técnica a usar es Programación Lineal Entera, ya que permite brindar una solución óptima de anchos cuyo desperdicio era el mínimo.

Leottau y Rodriguez (2012) realizaron una investigación de minimización de desperdicios en los cortes de formatos de láminas en una empresa carpintera, para ello utilizaron un algoritmo genético. Implementando la mejora de diseño genético se redujo en 10.55% el desperdicio; por lo que, se concluyeron que un modelo matemático permite la optimización de formatos de láminas.

Chacón et al. (2012) investigaron la optimización de los procesos de fabricación del cartón. Para ello, desarrollaron un sistema semiautomático de los brazos de cargas del montarrollos. Como conclusión, se redujo los tiempos perdidos en esta actividad de $3\frac{1}{2}$ horas a 0. La presente investigación desarrollará la optimización de formatos para minimizar el cambio de rollos y así disminuir tiempos muertos de SetUp.

Luque (2021) investigó la optimización de producción de piezas bidimensionales mediante soluciones algorítmicas, esto trajo como consecuencia la disminución de material desperdiciado. El nuevo algoritmo propuesto mejora con respecto al algoritmo genético la fase de ordenación; sin

embargo, el modelo desarrollado se quedó en prototipo que podrá realizarse con una inversión y desarrollo del sistema de una empresa.

Tornadijo (2009) propuso la utilización de un algoritmo genético para cortes mínimos continuos de paños de cartón. La solución propuesta resultó funcional y operativa para el mundo real; para mayor adaptación a la empresa a implementar, se debe escoger variables de modo más preciso, parámetros en la onduladora y relativos al proceso posterior de las etapas de transformación del cartón.

Con las presentes compilaciones de investigaciones, se determina que la herramienta Value Stream Mapping y el Modelo de Programación Lineal permite diagnosticar y optimizar la actividad de corrugar en la empresa cartonera.

2. METODOLOGÍA

El diseño presente de la investigación es de tipo No Experimental porque se realiza sin la manipulación de las variables deliberadamente sino sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para su análisis (Fernandez & Baptista, 2020, p. 152). Asimismo, es una investigación aplicada porque se orienta a resolver problemas prácticos a través de la adquisición de nuevo conocimiento (Álvarez, 2020, p. 3).

El alcance de la investigación es exploratorio-descriptivo, ya que estudia un problema que no ha sido muy abordado con investigaciones científicas (Hernandez et al., 2011, p. 71) como los formatos óptimos de papel en una empresa cartonera. Por otro lado, es un estudio descriptivo porque busca propiedades y características importantes del fenómeno analizado (Fernandez & Baptista, 2020, p. 92) como las dimensiones de papel que la corrugadora puede procesar y el desperdicio que puede generar.

El estudio tiene la orientación de explorar y describir las variables dentro de su ambiente natural; la variable independiente es el motivo de ocurrencia de otro fenómeno (Amiel, 2007, p. 171) como el formato del papel Liner que es el objeto de estudio para entender la variable dependiente que es el fenómeno que resulta (Amiel, 2007, p. 171) siendo las horas de paradas no planificadas en las corrugadoras; así como el desperdicio generado.

El enfoque de la investigación es cuantitativo porque recicla datos para establecer suposiciones con base en la medición numérica y el análisis estadístico (Fernandez & Baptista, 2020, p. 4).

El tipo de muestra a utilizar es No Probabilística, ya que no depende de la probabilidad sino del proceso de toma de decisiones del investigador (Hernandez et al., 2011, p. 176); por ello,

se ha seleccionado, por conveniencia, la data de producción del cartón corrugado de 17 meses donde se obtiene el consumo de papel Liner y el cartón desperdicio generado.

Para el desarrollo de esta investigación se realiza un diagnóstico con la herramienta Value Stream Mapping, ya que es una herramienta para la competitividad porque permite analizar la situación actual siendo posible identificar y eliminar el desperdicio logrando la agilización de procesos claves y reducción de costos (Keun & Yoon, 2016). Después, se realiza un Diagrama de Árbol de Problemas por ser un modelo de relaciones causales que explican el problema (Hernández-Hernández et al., 2005, p. 38). Además, se realiza un Diagrama Pareto porque permite identificar la causa que tiene un mayor impacto y priorizar las iniciativas de mejora (Laoyan, 2023). Estas herramientas permitieron detectar el problema principal que es la diversidad de formatos de papel que ingresan a la corrugadora generando 246,22 horas de paradas entre las tres corrugadoras al mes.

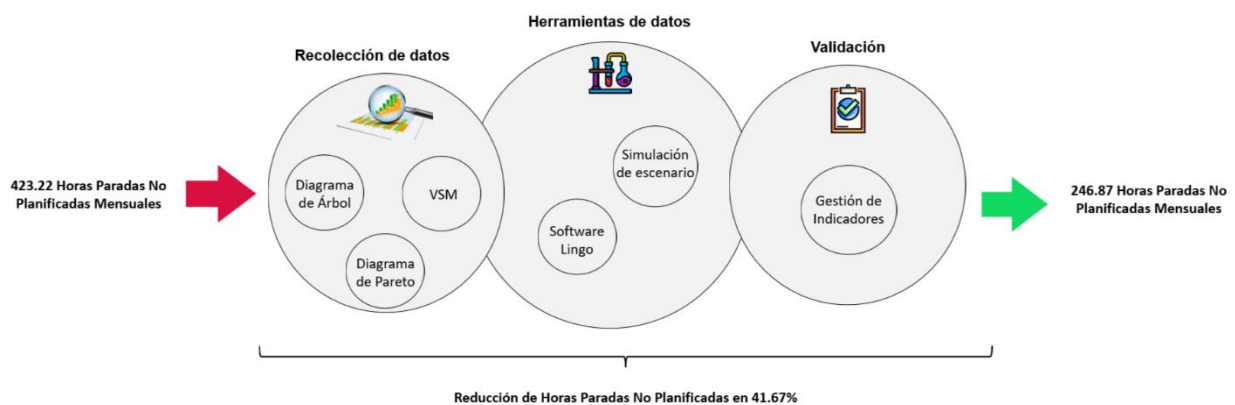
Para reducir la diversidad de formatos de papel, se utiliza un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta por brindar una solución de optimización al problema del negocio, el modelo consta de 3 elementos: función objetivo, variables de decisión y restricciones (International Business Machines Corporation [IBM], s.f).

Identificado los formatos óptimos, se realiza una estimación en Excel de los pedidos producidos en el mes de agosto con los formatos óptimos de Lingo para calcular las nuevas horas paradas, el desperdicio y la rentabilidad aumentada.

El modelo empleado en la investigación es el siguiente:

Figura 2.1

Diseño del modelo



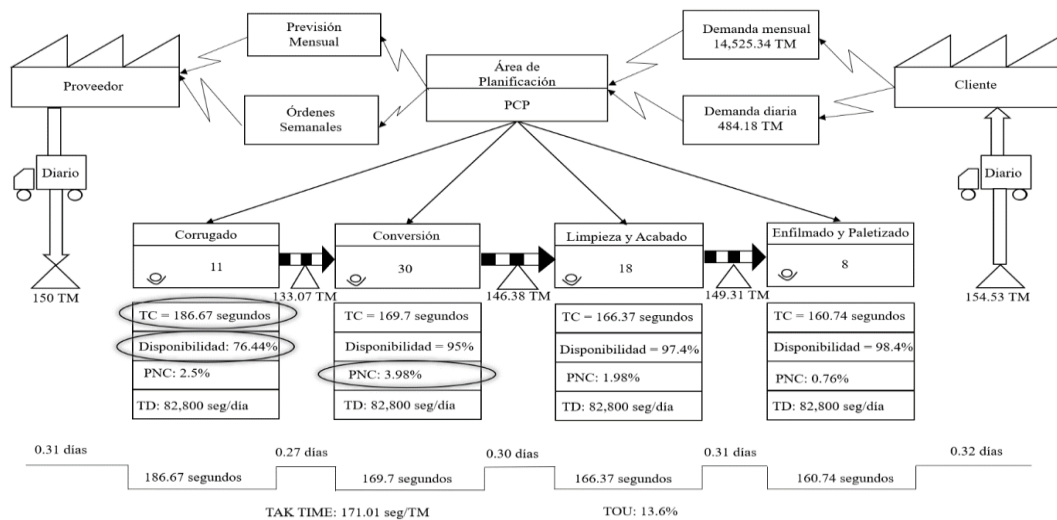
3. RESULTADOS

Situación inicial

La presente investigación inicia el desarrollo de la herramienta Value Stream Mapping (VSM) identificando las oportunidades de mejora; los datos utilizados se obtuvieron de la base de datos de PC-Topp y SAP, softwares que maneja la empresa.

Figura 3.1

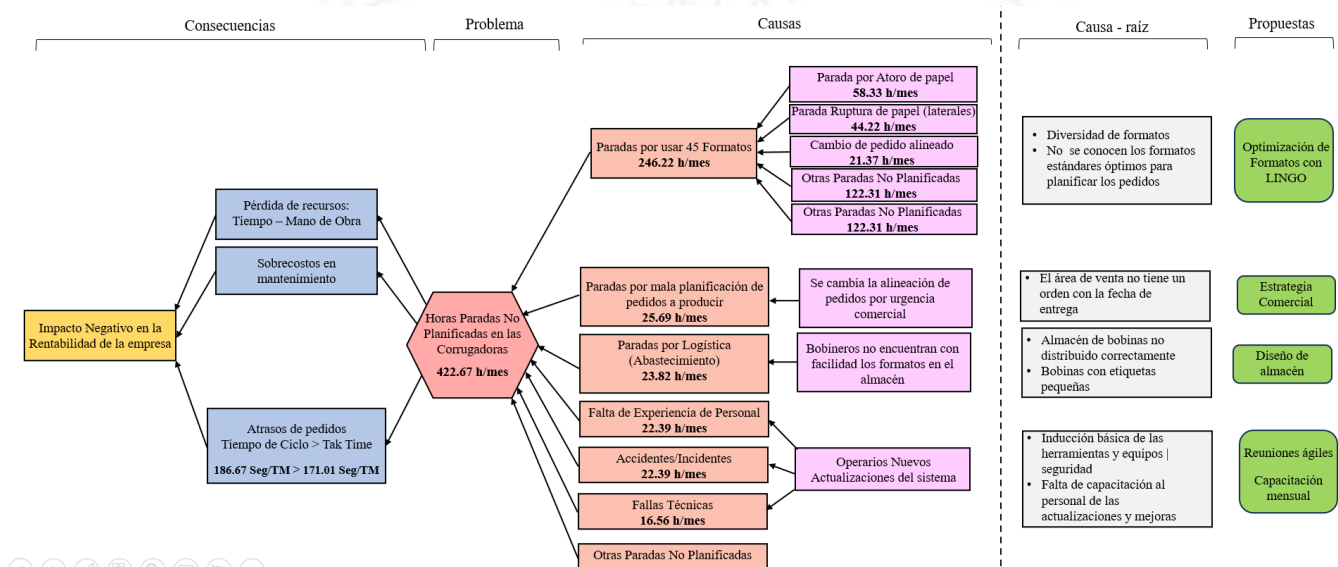
Value Stream Mapping - Situación Inicial



En el VSM, existe un cuello de botella en la actividad de corrugado; ya que el Tiempo de Ciclo es mayor al TAK TIME; lo que quiere decir que existirán atrasados en el cumplimiento de pedidos a los clientes. La siguiente herramienta que utilizar es el Diagrama de Árbol de Problemas en la actividad de corrugado:

Figura 3.2

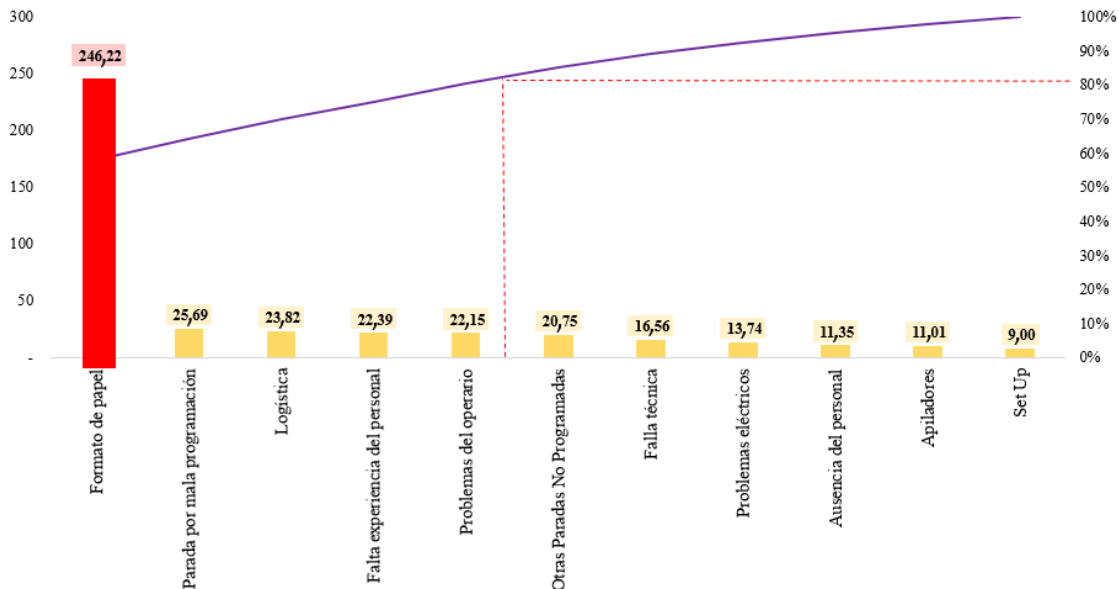
Árbol de Problemas para las paradas no planificadas en la actividad de corrugado



El Árbol de Problemas muestra las causas que originaron las 422,67 h paradas al mes, para determinar las causas con más impacto por solucionar se realiza un Diagrama de Pareto.

Figura 3.3

Diagrama de Pareto para las paradas no planificadas en la actividad de corrugado



La causa principal de las 422h de paradas no planificadas/mes es la diversidad de formatos de papel, a la vez, estos generan 3 282,70 TM de desperdicio al mes.

Optimización

Identificado la causa relevante, se realiza un Modelo Matemático de Optimización para conocer la cantidad de bobinas (unidad) de cierto formato que se debe producir para reducir las horas paradas y el desperdicio. Por ello, se escoge un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta.

Tabla 3.1

Formatos de papel que cada corrugadora utiliza

Corrugadora	Formatos de cada corrugadora (cm)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	135	144	165	172	182	188	196	204	209	214	220	228	236	242	250
2	140	155	170	175	182	190	200	205	211	218	225	234	241	250	253
3	56	60	67	73	77	83	87	91	98	105	115	118	122	125	130

Nota. El software Lingo dará como solución óptima los 5 formatos que cada corrugadora debería utilizar.

Estructura del modelo para optimizar cada corrugadora independientemente:

a) Definición de las variables

X_i : Cantidad de bobinas de papel de formato i a producir

Y_i : $\begin{cases} 0: \text{ No se fabrica la bobina de formato } i \\ 1: \text{ Se fabrica la bobina de formato } i \end{cases}$

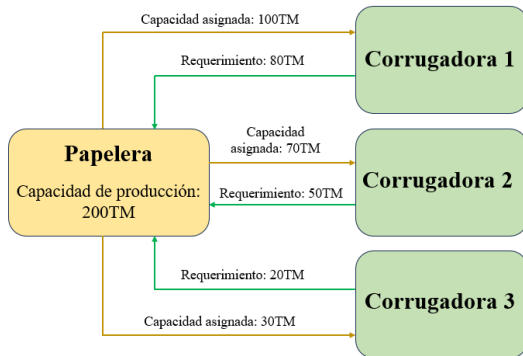
b) Función objetivo:

$$MAX Z = \sum_{i=1}^{15} (Ingreso_{(i)} \times X_{(i)} \times Y_{(i)} - Costo_Prod._{(i)} \times X_{(i)} \times Y_{(i)} - Gasto_Desperdicio_{(i)} \times X_{(i)} \times Y_{(i)})$$

Las variables y la función objetivo son las mismas para las tres corrugadoras; sin embargo, las restricciones varían:

Figura 3.4

Restricciones de capacidad y demanda para el modelo de optimización



Restricción 1: Capacidad de producción de bobinas asignada para cada corrugadora

- Corrugadora 1: Se puede producir máximo 100 TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \leq 100 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$
- Corrugadora 2: Se puede producir máximo 70TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \leq 70 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$
- Corrugadora 3: Se puede producir máximo 30TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \leq 30 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$

Restricción 2: Necesidad/Demanda de cada corrugadora

- Corrugadora 1: Se necesita 80TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \geq 80 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$
- Corrugadora 2: Se necesita 80TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \geq 50 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$
- Corrugadora 3: Se necesita 20TM de papel para esta corrugadora

$$\sum_{i=1}^{15} X_i \times Y_i \times Peso_Bobina_i \geq 20 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$$

Restricción 3: Cantidad máxima de bobinas a producir para cada formato

- Corrugadora 1: Máximo producir 10 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \leq 10 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 2: Máximo producir 10 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \leq 10 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 3: Máximo producir 8 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \leq 8 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$

Restricción 4: Cantidad mínima de bobinas a producir para cada formato

- Corrugadora 1: Mínimo producir 5 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \geq 5 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 2: Mínimo producir 5 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \geq 5 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 3: Mínimo producir 4 bobinas de papel por tipo de formato
 $X_i \geq 4 \times Y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$

Restricción 5: Cantidad de formatos necesarios a realizar para cada corrugadora

- Corrugadora 1: De 15 formatos a 5 formatos
 $\sum_{i=1}^{15} Y_i = 5 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 2: De 15 formatos a 5 formatos
 $\sum_{i=1}^{15} Y_i = 5 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Corrugadora 3: De 15 formatos a 5 formatos
 $\sum_{i=1}^{15} Y_i = 5 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$

Restricción 6: Variable entera y variable binaria

- X_i es entera $\forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$
- Y_i es binaria $\forall i = 1, 2, 3, \dots, 15$

El modelo matemático se realizó de manera independiente para cada corrugadora en el software Lingo debido a las variables limitadas en la versión aprendizaje de estudiante. Los resultados valor objetivo para cada corrugadora son las siguientes:

- Corrugadora 1: *Valor Objetivo = S/ 57 276,77 por día*
- Corrugadora 2: *Valor Objetivo = S/ 47 158,20 por día*
- Corrugadora 3: *Valor Objetivo = S/ 15 774,06 por día*

Asimismo, los formatos óptimos para programar en cada corrugadora son los siguientes:

- Corrugadora 1: en centímetros
 - *Óptimos: 144, 172, 209, 214, 242*
- Corrugadora 2: en centímetros
 - *Óptimos: 190, 200, 234, 250, 253*
- Corrugadora 3: en centímetros
 - *Óptimos: 60, 77, 91, 122, 130*

Simulación de los formatos óptimos en arena

En el Software Arena se compara los tiempos de producción de la situación inicial y los tiempos con los formatos óptimos. Para ello, se seleccionó 105 pedidos que duraron 35 horas en el proceso productivo. Posterior a ello, se simuló en arena estos pedidos con los formatos óptimos obteniendo una duración de 10.01 horas.

La distribución de los pedidos en las corrugadoras fue de 45%, 44% y 11% respectivamente por el atributo “dimensiones de cajas” que cada corrugadora puede fabricar. Asimismo, cada una tiene una velocidad estándar que varía con el volumen de cajas solicitadas en el pedido.

Con esta simulación se demostró que hay una reducción de 71.43% horas en procesar 105 cajas; sin embargo, se debe simular un mes productivo para considerar todos los pedidos solicitados con sus dimensiones y volúmenes correspondientes. De esta manera, obtener una mayor precisión en el éxito de la optimización.

Simulación de escenario de producción con formatos óptimos en mes de agosto

La simulación del mes productivo se realiza de manera independiente para cada corrugadora obteniendo tres escenarios.

En cada escenario se utilizó los formatos óptimos para calcular el desperdicio generado, la cantidad de horas paradas y la utilidad que se generaría con el valor del desperdicio.

Los indicadores para evaluar son la reducción de desperdicio, horas paradas y utilidad (S/) generada. Este escenario es desarrollado con los datos de producción del mes de agosto 2023 en el software Excel porque permite estimar 9 768 clientes como input en la operación mientras otros softwares limitan esta cantidad, así como el output de la operación (desperdicio). Los resultados de la simulación del escenario son los siguientes:

Tabla 3.2*Variación de desperdicio utilizando los formatos óptimos*

Corrugadora	Desperdicio Inicial (TM/mes)	Desperdicio Optimizado (TM/mes)	Variación de desperdicio %
1	1153,21	1013,82	-12,24%
2	2217,20	1628,09	-26,57%
3	437,99	271,25	-38,07%
Total	3810,43	2913,16	-23,55%

Nota. Si solo se hubieran utilizado los formatos óptimos en el mes de agosto, se hubiera producido 23,55% de desperdicio.

Tabla 3.3*Variación de utilidad utilizando los formatos óptimos*

Corrugadora	Situación Inicial					Formatos Óptimos			Variación de Utilidad	
	Producción (TM/mes)	Ingreso (S/)	Costo (S/)	Gasto Desperdicio (S/)	Utilidad (S/)	Costo (S/)	Gasto Desperdicio (S/)	Utilidad (S/)		
1	4923,73	5425,99	5205,41	28 881	191 709	5200,26	25 345	200 396	8687	4,53%
2	6217,68	6839,45	6553,65	55 430	230 368	6564,33	40 702	234 413	4045	1,76%
3	1443,89	1588,28	1523,32	10 950	54 009	1526,42	6781	55 081	1072	1,98%
Total	12 594,29	13 853,72	13 282,38	95 261	476 086	13 291,00	72 829	489 890	13 804	2,90%

Nota. Si solo se hubieran utilizado los formatos óptimos en el mes de agosto, se hubiera generado una utilidad 2,90% más.

Tabla 3.4*Variación de horas paradas por el problema de diversidad de formatos*

Corrugadora	Situación Inicial		Formatos Óptimos		Reducción de Horas (h/mes)	Variación de Horas Paradas %
	Horas paradas por formato (h/mes)		Horas Paradas por formato (h/mes)			
1	78,72		25,61		53,10	-67,46%
2	116,97		34,94		82,03	-70,13%
3	59,30		18,17		41,22	-69,41%
Total	255,08		78,72		176,35	-69,14%

Nota. Con los formatos óptimos, se pudo reducir en 69,14% las horas paradas por diversidad de formatos en las corrugadoras.

Tabla 3.5

Variación de horas paradas totales utilizando formatos óptimos

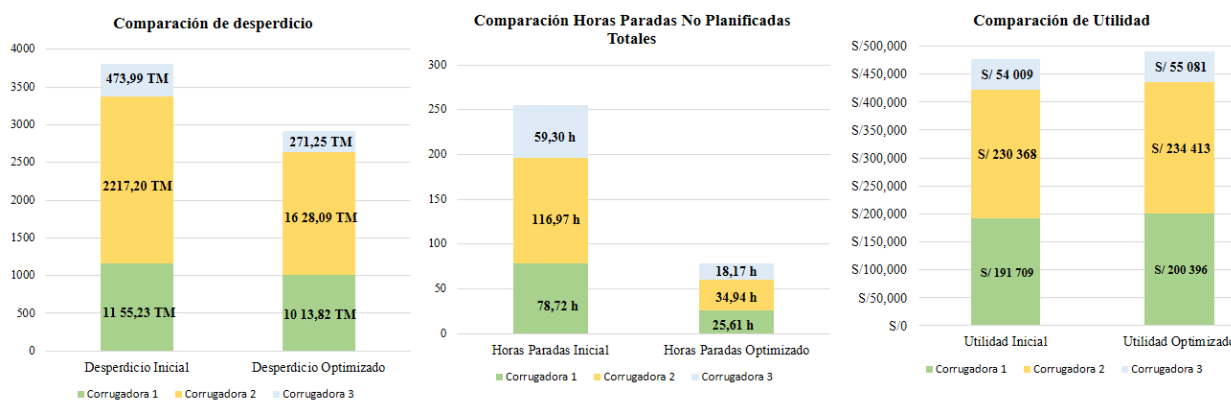
Corrugadora	Situación Inicial	Optimización	Escenario Optimizado	Variación
	Horas Paradas Totales (h/mes)	Reducción de horas (h/mes)	Horas Paradas Totales (h/mes)	
1	128,45	53,10	75,35	-41,34%
2	193,23	82,03	111,20	-42,45%
3	101,54	41,22	60,32	-40,60%
Total	423,22	176,35	246,87	-41,67%

Nota. Las horas paradas totales se hubieran reducir en 41,67% si se hubiera utilizad los formatos óptimos.

Para mejorar la visualización se realiza gráficas de columnas apiladas que permiten visualizar la variación:

Figura 3.5

Comparación de valores: Desperdicio - Horas Paradas - Utilidad



En las gráficas de la figura 3.5, se visualiza las comparaciones de los indicadores de desperdicio, hora parada no planificada y utilidad. En la primera comparación, se redujo en 23,55% de 3810,43TM a 2 913,16TM entre las tres corrugadoras al mes. En la segunda comparación, se redujo en 41,67% las horas paradas no planificadas de 433,22h a 246,87h entre las tres corrugadoras al mes y en la tercera comparación, la utilidad aumentó en 2,90% de S/476,08 a S/489,89 al mes.

4. DISCUSIÓN

Se escogió la herramienta VSM porque permite visualizar de manera global el proceso productivo detectando de los puntos a mejorar como las horas paradas y desperdicio. Al igual que Qhishpe y Arroyo (2021) la herramienta les permitió disminuir los tiempos muertos reduciendo en 100% los tiempos de espera en el cuello de botella, en la presente investigación se redujo en 41,67% las horas de paradas no planificada en la actividad de corrugado.

Para la optimización de formatos se escogió un Modelo de Programación Lineal Entera Mixta, ya que, a diferencia de la No Lineal, se puede optimizar la utilidad y no buscar puntos

óptimos. Por otro lado, Hamadeh y Hellstrom (2008) analizaron un modelo de lineal y uno de algoritmo evolutivo. El modelo evolutivo requiere un desarrollo más complejo del algoritmo, así como un software avanzado.

Por otro lado, Tornadijo (2009) propuso algoritmos genéticos que permitían reducir los cortes mínimos de paños de cartón, de esta forma, aprovechar las dimensiones de los paños y hacer mayor cantidad de cajas posibles en un paño. Sin embargo, las imprentas no están diseñadas para poder hacer cortes e imprimir varios colores. Se requiere una inversión y evaluar la viabilidad de ese modelo.

Entonces, la diversidad de softwares para resolver un modelo de programación lineal entera permitió la viabilidad de este modelo en esta investigación, y demostró al igual que la investigación de los autores Medina et al (2020) el modelo de programación lineal de enteros reduce el desperdicio y gastos.

La simulación del escenario con los formatos óptimos se desarrolló en el Software Microsoft Excel, ya que la hoja permite trabajar con varios datos. Asimismo, las diversidades de fórmulas permitieron calcular el desperdicio, horas paradas y la utilidad. Por otro lado, este software es accesible a diferencia de otros como Arena, que se requiere inversión para poder manejar grandes cantidades de datos.

5. CONCLUSIONES

Las herramientas VSM, Diagrama de Árbol y Diagrama de Pareto son herramientas de recolección de información e identificación de los problemas. De esta manera se logró detectar el cuello de botella en la actividad corrugado y sus causas que las generaban, los usos de estas herramientas son confiables y sencillas de aplicar.

Los modelos de Programación Lineal Entera Mixta permiten optimizar la actividad de corrugado de una empresa del mercado de cartón conllevando a la reducción de costos y maximizando su utilidad, además son viables, ya que existen diversidad de softwares versiones free o estudiante como LINGO. De esta manera, se cumple el objetivo de la investigación logrando diseñar un modelo matemático que reduce en 23,55% el desperdicio, 41,68% las horas paradas no planificadas y aumentar en 2,90% la utilidad por mes.

El modelo propuesto solo funciona para el tipo de cartón 121C siempre en cuando existe la disponibilidad de los formatos óptimos, en caso que no haya uno, se generará mayor desperdicio por que se estará forzando utilizar otro formato más ancho.

Se puede optimizar cualquier actividad productiva cuando exista data del proceso a evaluar siendo accesible a esta, así como la accesibilidad de softwares con herramientas avanzadas. Asimismo, las simulaciones permiten comprobar la efectividad de la optimización.

El mercado de cartón corrugado y papel está en constante evolución; por lo que se podrá optimizar los formatos para todas las líneas de productos; se debe realizar un modelo de optimización para cada tipo, ya que la demanda es cíclica en agroindustria por las temporadas de frutas y verduras, así como las temporadas de veda en la industria pesquera.

Se requiere una inversión para utilizar softwares de simulación como ARENA, así poder acceder a mayor capacidad, sin embargo, la simulación en Excel permite conocer el escenario de producción con formatos óptimos.

6. REFERENCIAS

- Acevedo, N., Carrillo, A., Paternina, C. & Raish, J. (2003). Modelo para programación de operaciones en la fabricación de cajas de cartón corrugado. *Ingeniería y Desarrollo*, (13), 24-40. <https://www.redalyc.org/pdf/852/85201303.pdf>
- Álvarez, A. (2020). *Clasificación de las investigaciones* [Notas académicas]. Universidad de Lima. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/10818>
- Amiel, J. (2007). Las variables en el método científico. *Revista de la sociedad y química del Perú*, 73 (3), 171-177. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v73n3/a07v73n3.pdf>
- Cartón corrugado: tipos y usos de embalaje*. (2018, 11 de octubre). Raja Blog. <http://bit.ly/3QGNPJe>
- Chacón, A., Ramos, A. & Ruiz, A. (2012). Sistema semiautomático de control para procesos de corrugado en fabricación de cartón. *Revista Revisión Electrónica*, 2, 113-125. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4234952>
- Exactitude Consultancy. (2022). *Mercado de envases corrugados por tipo de producto (tablero de pared simple, tablero de un cara, tablero de pared doble, tablero de pared triple), tipo de empaque (caja (caja ranurada, caja para carpetas, caja telescópica, caja troquelada), cajas, bandejas, octabin, paleta), uso final (alimentos y bebidas, electricidad y electrónica, productos para el cuidado del hogar, productos para el cuidado personal, comercio electrónico, transporte y logística, atención sanitaria, otros) y región (América del Norte, Europa, Asia - Pacífico,*

América del Sur, Oriente Medio y África), tendencias globales y pronósticos de 2022 a 2029.

<https://exactitudeconsultancy.com/es/reports/3152/mercado-de-empaques-corrugados/>

Fernández, C. & Baptista, P. (2020). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill Education.

<https://bit.ly/3QnRw1x>

Fonseca Núñez, J. E. (2017). *Modelos de Programación Lineal Entera Mixta para la planificación de la producción en artículos con vida útil corta*. [Tesis para obtener el grado de Máster en Ingeniería de Análisis de Datos, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio de la Universidad de Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/89439?show=full>

Formatos de papel: tamaños y usos más comunes. (2019, 04 de abril). ProPrintWeb.

<http://bit.ly/40iCbaq>

Hamadeh, A. & Hellstrom, D. (2008). *The problem of corrugator sequencing and its impacts in packaging processes*. <https://portal.research.lu.se/en/publications/the-problem-of-corrugator-sequencing-and-its-impact-on-packaging->

Hernández, C., Fernández, C. & Baptista, P. (2011). *Metodologías de la Investigación*. Mc Graw Hill Education. https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf

Hernández-Hernández, N. & Garnica-González, J. (2015). Árbol de problemas del Análisis al Diseño y Desarrollo de Productos. *Consciencia Tecnológica*, (50), 38-46.

<https://www.redalyc.org/pdf/944/94443423006.pdf>

International Business Machines Corporation. (2021). *¿Qué es la programación lineal de enteros mixtos?*. <https://www.ibm.com/docs/es/icos/12.9.0?topic=programming-what-is-mixed-integer-linear>

Keun, B. & Yoon, T. (2016). Improving it process management through value stream mapping approach: a case study. *Journal of Information Systems and Technology Management*, 13(3), 389-404. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203249448002>

Leottau Sanmiguel, S. & Rodríguez Noriega, J. C. (2012). *Minimización de los costos de desperdicios a través de un algoritmo genético para la distribución de piezas en formatos. Caso de estudio de la empresa FERROCARPINTERÍA FORMAR* [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Bolívar]. Repositorio de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

<https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/986#page=1>

- Laoyan, S. (2023, 11 de enero). Qué es el principio de Pareto o la regla 80/20. *Asana*.
<https://asana.com/es/resources/pareto-principle-80-20-rule>
- López Potosme, R. A. (2017). *Algunos problemas clásicos de Optimización Combinatoria: Una propuesta metodológica* [Tesis para optar al grado de doctor en matemática aplicada, Universidad Autónoma de Nicaragua-Managua]. Repositorio Institucional UNAN-Managua.
<https://repositorio.unan.edu.ni/8824/>
- Lucero, S., Marengo, J. & Martínez, F. (2014). An integer programming approach for the 2-schemes strip cutting problem with a sequencing constraint. *Optim Eng*, 16, 605-632.
<https://doi.org/10.1007/s11081-014-9264-8>
- Luque, M. (2021). *Optimización del trazado de patrones de cortes* [Tesis para optar el grado en Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio de la Universidad Autónoma de Madrid.
https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/698396/luque_miguel_angel_tfg.pdf?sequence=1
- Medina, J., De León, N. & Leiva, J. (2020). La modelación matemática para la optimización de corte de pliegues en una empresa poligráfica. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(1), 121-128.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1426/1447>
- Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (2009). *Guía de Envases y Embalajes*.
<http://bit.ly/3FMr2oM>
- Paredes, A. (2017). Aplicación de Herramienta Value Stream Mapping a una empresa embaladora de productos de vidrio. *Entramado*, 13(1), 262-277.
<https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25103>
- Qhispe, F. & Arroyo, F. (2021). Análisis y Optimización en la producción de envases de cartón, empleando el Value Stream Mapping. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(3), 536-542.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2130>
- Tornadijo, T. (2009). Una combinación de algoritmo voraz con algoritmos genéticos para optimizar la producción de cartón ondulado. *Revista de Métodos Cuantitativos para la economía y empresa*, 8, 71-86. <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2130>
- Velasquez, G., Bellini, G. & Paternina-Arboleda, C. (2007). A multi-objective approach based on soft computing techniques for production scheduling in corrugator manufacturing plants. *Ingeniería y Desarrollo*, 21, 73-92. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85202106>

ANEXOS

Anexo 1

Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 1

The screenshot displays the LINGO Model window and the Solution Report window. The model window contains the following code:

```
sets:
formato/1..15:/peso,costo_produccion,ingreso,desperdicio,tiempo_produccion,x,y;
end sets
data:
peso= 1.65 1.61 1.73 1.32 1.91 1.73 1.97 1.87 1.28 1.62 1.15
1.28 2.38 1.75 1.61;
costo_produccion=1745.23 1699.86 1829.65 1395.98
2015.36 1820.15 2079.72 1976.31 1345.33
1713.58 1208.16 1352.72 2508.12 1886.63
1697.75;
ingreso= 2821.52 2674.67 2235.55 2574.68 2724.07
2500.75 2987.67 3063.34 2161.29 3213.21
1220.17 1368.03 2744.66 3648.86 2251.18;
desperdicio= 54.4 50.19 5.77 6.41 72.43 14.1 7.29 73.68 51.245
9.46 46.66 0.38 55.145 16.5 69.89;
end data
max=@sum(formato(i):ingreso(i)*x(i)*y(i)-
costo_produccion(i)*x(i)*y(i)-desperdicio(i)*x(i)*y(i));
!restriccion 1: CAPACIDAD DE LA PLANTA;
@SUM(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))<=70;
!restriccion 2: DEMANDA;
@sum(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))>=50;
!restriccion 3:Cantidad de bobinas máxima por formato;
@for(formato(i):x(i)<=10*y(i));
!restriccion 4:Cantidad de bobinas mínima por formato;
@for(formato(i):x(i)>=5*y(i));
!restriccion 5:Maximo formatos;
@sum(formato(i):y(i))=5;
```

The Solution Report window shows the following results:

LINGO/WIN32 19.0.55 (5 May 2022), LINDO API 13.0.4099.342	
Licensee info: Eval Use Only	
License expires: 25 JAN 2024	
Local optimal solution found.	
Objective value:	57276.77
Objective bound:	57276.77
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	29
Total solver iterations:	186
Elapsed runtime seconds:	0.08
Model Class: MIQP	
Total variables:	45
Nonlinear variables:	30
Integer variables:	30

Anexo 2

Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 2

The screenshot displays the LINGO Model window and the Solution Report window. The model window contains the following code:

```
sets:
formato/1..15:/peso,costo_produccion,ingreso,desperdicio,tiempo_produccion,x,y;
end sets
data:
peso= 1.39 1.09 1.39 1.95 1.99 1.83 1.3 1.66 2.34 1.11 1.4
1.87 1.7 1.81 1.96;
costo_produccion=1462.45 1148.01 1461.4 2055.45
2101.88 1934.11 1368.54 1755.79 2466.96
1165.95 1471.95 1975.26 1788.5 1594.35
2070.22;
ingreso= 2324.2 2031.58 2790.81 2201.89 3120.86
3161.64 2658.04 2549.21 4809.83 1344.59
1976.49 3214.1 1790.84 2305.5 2512.14;
desperdicio= 26.29 24.43 10.33 2.8 79.605 15.77 5.05 86.715
16.72 30.18 79.45 11.9 13.24 66.96 93.44;
end data
max=@sum(formato(i):ingreso(i)*x(i)*y(i)-
costo_produccion(i)*x(i)*y(i)-desperdicio(i)*x(i)*y(i));
!restriccion 1: CAPACIDAD DE LA PLANTA;
@SUM(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))<=100;
!restriccion 2: DEMANDA;
@sum(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))>=80;
!Cantidad de bobinas máxima por formato;
@for(formato(i):x(i)<=10*y(i));
!Cantidad de bobinas mínima por formato;
@for(formato(i):x(i)>=5*y(i));
!Maximo formatos;
@sum(formato(i):y(i))=5;
```

The Solution Report window shows the following results:

LINGO/WIN32 19.0.55 (5 May 2022), LINDO API 13.0.4099.342	
Licensee info: Eval Use Only	
License expires: 25 JAN 2024	
Local optimal solution found.	
Objective value:	47158.20
Objective bound:	47158.20
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	3
Total solver iterations:	52
Elapsed runtime seconds:	0.07
Model Class: MIQP	
Total variables:	45
Nonlinear variables:	30
Integer variables:	30

Anexo 3

Modelo de Programación Lineal Entera Mixta en LINGO para la corrugadora 3

The screenshot displays the LINGO Model window and the Solution Report window. The model window contains the following code:

```
sets:
formato/1..15:/peso,costo_produccion,ingreso,desperdicio,tiempo_produccion,x,y;
end sets
data:
peso= 2.08 1.69 1.11 1.43 1.96 2.29 1.11 1.28 1.68 1.45 1.66
1.71 1.19 2.11 0.88;
costo_produccion= 2111.38 1786.39 1167.01 1503.60
2071.28 2413.15 1165.95 1351.66 1773.72
1531.04 1750.51 1803.27 1258.81 2227.44
932.76;
ingreso= 3167.06 2679.58 1750.51 2255.40 3106.92
3619.73 1748.93 2027.49 2660.59 2296.56
2625.77 2704.90 1888.21 3341.16 1399.14;
desperdicio= 4.22 3.57 2.33 3.01 4.14 4.83 2.33 2.70 3.55 3.06
3.50 3.61 2.52 4.45 1.87;
end data
max=@sum(formato(i):ingreso(i)*x(i)*y(i)-
costo_produccion(i)*x(i)*y(i)-desperdicio(i)*x(i)*y(i));
!restriccion 1: CAPACIDAD DE LA PLANTA;
@SUM(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))<=30;
!restriccion 2: DEMANDA;
@sum(formato(i):x(i)*y(i)*peso(i))>=20;
!Cantidad de bobinas máxima por formato;
@for(formato(i):x(i)<=8*y(i));
!Cantidad de bobinas mínima por formato;
@for(formato(i):x(i)>=4*y(i));
!Maximo formatos;
@sum(formato(i):y(i))=5;
```

The Solution Report window shows the following results:

LINGO/WIN32 19.0.55 (5 May 2022), LINDO API 13.0.4099.342	
Licensee info: Eval Use Only	
License expires: 25 JAN 2024	
Local optimal solution found.	
Objective value:	15774.06
Objective bound:	15774.06
Infeasibilities:	0.000000
Extended solver steps:	110
Total solver iterations:	5186
Elapsed runtime seconds:	0.29
Model Class: MIQP	
Total variables:	45
Nonlinear variables:	30
Integer variables:	30

OPTIMIZACIÓN DE FORMATOS DE PAPEL DE UNA EMPRESA CARTONERA PARA LA REDUCCIÓN DE HORAS PARADAS Y GASTOS UTILIZANDO UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

ORIGINALITY REPORT

5%

SIMILARITY INDEX

5%

INTERNET SOURCES

2%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

clai02022.dc.uba.ar

Internet Source

1%

2

hdl.handle.net

Internet Source

1%

3

de.slideshare.net

Internet Source

<1%

4

futur.upc.edu

Internet Source

<1%

5

www.coursehero.com

Internet Source

<1%

6

backspace.uhemisferios.edu.ec

Internet Source

<1%

7

repositorio.ucv.edu.pe

Internet Source

<1%

8

revistas.unilibre.edu.co

Internet Source

<1%