

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GRADUADOS**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y GESTIÓN
LOGÍSTICA”**

TEMA:

**“DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN
DE LA SECUENCIACIÓN SEMANAL DE PRODUCCIÓN EN UNA
PLANTA INDUSTRIAL DEL SECTOR DE BALANCEADO ANIMAL”**

AUTOR:

ING. JORGE ZAMBRANO CARRIÓN

Guayaquil - Ecuador

2020

RESUMEN

La modelación matemática es una herramienta de gran utilidad en las plantas procesadoras ya que permite administrar de forma eficiente recursos humanos, materiales y de tiempo.

El método de investigación empleado en el desarrollo del presente proyecto es cuantitativo utilizando como herramientas la observación directa y entrevistas a colaboradores de la planta.

Con el uso del software matemático GAMS (General Algebraic Modeling System) se logró conocer tiempos reales que necesita la planta de nutrición animal para procesar los distintos componentes de cada producto. Se realiza una comparación de los tiempos que la empresa destina en la actualidad a producir, y cuanto conllevaría con la aplicación del modelo.

Con los resultados del modelo se logra verificar que es posible disminuir tiempos de producción con una adecuada planificación y así programar mantenimientos preventivos y otras actividades propias de la actividad de una planta procesadora.

La empresa objeto de estudio realiza su planificación de manera empírica, requiere 100% del tiempo de operación de su máquina principal (mezcladora) producir la demanda en la semana de estudio, con el modelo se puede cumplir con el total de la producción en un 65.21% del tiempo.

Palabras claves: *planificación, tiempo, modelo matemático, optimización.*

ABSTRACT

Mathematical modeling is a very useful tool in processing plants since it allows efficient management of human, material and time resources.

The research method used in the development of this project is quantitative tools taking concepts such as the direct observation, in addition to information obtained from interviews with plant collaborators.

By using the GAMS (General Algebraic Modeling System) mathematical software, it was possible to know the real times that the animal nutrition plant needs to process the different components of each product. A comparison is made of the times that the company currently spends producing, and how long would it take this process with the application of the model.

With the results of the model is possible to verify that production times are reduced like a consequence of the proper planning, making possible to schedule preventive maintenance.

The company through empirical planning requires 100% of the operating time of the mixing machine for the production of demand in the study week, while the model just is possible to comply with the total production in 65.21% of the time.

Keywords: planning, time, mathematical model, optimization.

DEDICATORIA

Dedicado a Andreita.

AGRADECIMIENTO

Concluir un periodo más de estudio involucra un cambio positivo en toda persona. Implica un paso más en la caminata que uno mismo se ha impuesto.

Este mérito no se logra solo, es necesario el apoyo de personas importantes, los cuales me brindaron sus conocimientos, apoyo y me impulsaron a que sea

constante.

Agradezco principalmente a mis Padres, Jorge y Margarita y a mi novia Andreita; supieron qué cuerda tocar para impulsarme en cada paso a la obtención del título.

Así mismo agradezco a todos mis profesores y compañeros con los que pasamos buenos momentos aprendiendo juntos.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.



Ing. Jorge Zambrano Carrión

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ph.D. Kleber Barcía Villacreses
PRESIDENTE



Mgr. Nadia Cárdenas Escobar
DIRECTOR



Mgr. Carlos Ronquillo Franco
VOCAL

ABREVIATURAS O SIGLAS

LP	Programación lineal.
MIP	Programación lineal mixta
NLP	Programación no lineal
GAMS	General Algebraic Modeling System

SIMBOLOGÍA

tm	Tonelada métrica
kg	Kilogramo
tm/h	Tonelada métrica por hora

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Hipótesis	5
1.6. Alcance	5
CAPÍTULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Modelación Matemática.....	6
2.1.1. Etapas en el desarrollo de un modelo de optimización.	7
2.2. Programación lineal.....	9
2.2.1. Introducción.....	9
2.2.2. Planteamiento del problema general de programación lineal.....	10
2.2.3. Tipos de modelo de programación lineal	12
2.3. La herramienta GAMS.....	15
2.4. Estructura básica del modelo	16
CAPÍTULO 3	17
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Diseño metodológico	17
3.1.1. Modalidad de la investigación.....	17
3.1.2. Tipos de investigación	17
3.1.3. Herramientas de la investigación.....	17
3.1.4. Técnica de recolección de datos	18
3.2. Diseño del modelo matemático	18
3.2.1. Distribución de planta	18
3.2.2. Datos del modelo	19
CAPÍTULO 4	39

4.	RESULTADOS	39
4.1.	Implementación del modelo.....	39
4.2.	Principales Resultados Obtenidos	39
4.2.1.	Producción de la mezcladora	39
4.2.2.	Producción de equipos y máquinas	42
4.2.3.	Producción por empaquetadora	45
4.2.4.	Cambios de componentes	48
4.3.	Comparación del sistema actual y propuesta de planificación del modelo.	49
4.3.1.	Producción de la mezcladora	49
4.3.2.	Producción equipos y máquina.....	50
4.4.	Análisis de sensibilidad	53
	CAPÍTULO 5	56
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1.	Conclusiones.....	56
5.2.	Recomendaciones.....	57
6.	Referencias	
7.	Apéndices y anexos	

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1. Línea productiva de un modelo de scheduling	15
Gráfico 2.2. Respuesta de un modelo de scheduling	15
Gráfico 4.1. Variaciones en tiempo de los equipos	55

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Capacidad de los bins beeq donde guarda solo un componente.....	23
Tabla 3.2. Componentes que pasan por ciertos equipos o máquina	24
Tabla 3.3. Conexión de los bins al equipo o maquina	26
Tabla 3.4. Conexión de los equipos con los bins	27
Tabla 3.5. Velocidad de la empaquetadora- ensacadora por producto	28
Tabla 3.6. Velocidad del equipo o máquina	29
Tabla 3.7. Demanda de producto por empaque y por día	31
Tabla 3.8. Componentes que contiene por producto.....	32
Tabla 4.1. Producción de mezcladora	40
Tabla 4.3. Tiempo sin producir mezcladora (horas	42
Tabla 4.4. Producción por equipo	42
Tabla 4.5. Tiempo por equipo (horas)	45
Tabla 4.6. Producción diaria por empaquetadora.....	47
Tabla 4.7. Tiempo de empaquetadora (horas)	48
Tabla 4.8. Número de cambios de componentes	49
Tabla 4.9. Comparación de tiempos mezcladora (horas)	49
Tabla 4.10. Comparación de tiempos equipo1 (horas)	50
Tabla 4.11. Comparación de tiempos equipo 2 (horas).....	50
Tabla 4.12. Comparación de tiempos máquina 1 (horas)	51
Tabla 4.13. Comparación de tiempos máquina 2 (horas)	51
Tabla 4.14. Comparación de tiempos empaquetadora 1 (horas).....	52
Tabla 4.15. Comparación de tiempos empaquetadora 2 (horas).....	52
Tabla 4.16. Comparación de tiempos empaquetadora 3 (horas).....	52
Tabla 4.17. Comparación de tiempos ensacadora 1 (horas)	53
Tabla 4.18. Comparación de tiempos ensacadora 2 (horas)	53
Tabla 4.19. Comparación de tiempos con crecimiento de la demanda	54

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En Ecuador existen 218 empresas dedicadas a la fabricación de alimentos balanceados para distintas especies, de acuerdo a datos proporcionados por la Asociación Ecuatoriana de Fabricantes de Alimentos Balanceados para Animales (AFABA) y la Asociación de productores de alimentos balanceados (APROBAL). La mayor concentración de empresas se encuentran ubicadas en las provincias de Tungurahua, El Oro y Cotopaxi.

Estas industrias generan los siguientes productos:

- Alimento balanceado para aves
- Alimento balanceado para porcinos
- Alimento balanceado para ganado bovino
- Alimento balanceado para peces
- Alimento balanceado para camarones
- Alimento balanceado para especies menores
- Alimento balanceado para mascotas

En la actualidad la globalización y competencia entre mercados, cada vez más industrializados, hace imprescindible que empresas en general, opten por buscar herramientas que permitan reducir y gestionar el riesgo a corto, medio y largo plazo.

La necesidad de generar más, al menor costo posible hace que en el día a día, personas, familias y ciudades velen por optimizar los recursos que poseen, intentando extraer el máximo provecho a todos y cada uno de ellos. De aquí, que el uso de medios y técnicas que faciliten la planificación y toma de decisiones se convierte no sólo en una opción,

sino que adquiere relevancia, especialmente en la agroindustria, por la importancia económica, riqueza y perspectivas de crecimiento que tiene este sector en el país.

Para el desarrollo de la presente investigación se ha considerado una empresa de mediana producción dedicada exclusivamente a la producción de alimento para mascotas (gatos y perros) y balanceado para pollos y cerdos.

En la empresa objeto del estudio, no se cuenta con herramientas de planificación de producción semanal. Se realizan análisis de manera empírica, por lo tanto, no se determinan óptimos de producción ni maximización de utilización de recursos.

Con el presente proyecto se dotará a la empresa de un modelo matemático para la secuenciación óptima de la producción semanal. Se brindará a la organización una herramienta que permita minimizar los tiempos del proceso productivos, aprovechar el total del recurso instalado y coordinación adecuada de tiempos muertos en producción para entrega a actividades del departamento de mantenimiento y limpiezas planificadas de forma correcta. El uso de esta herramienta generará una ventaja frente a la competencia; facilitará la respuesta de la compañía ante las necesidades de la demanda y cumplirá con los compromisos adquiridos para entregar los productos en el menor tiempo posible.

Con la identificación de recursos, velocidades de procesamiento, flujo de producción y relaciones variable / recursos, se utilizará un modelo de programación matemática que esquematice analíticamente el sistema productivo. En GAMS se ingresa el modelo, la respuesta obtenida será un programa de producción que minimice los tiempos perdidos en cambios de producto durante la semana evaluada.

1.2. Descripción del problema

La programación de la producción, o scheduling, es una respuesta operativa para optimizar la producción de un bien o servicio. Existen diversas técnicas de programación de la producción; sin embargo, los problemas de scheduling pueden ser resueltos óptimamente utilizando técnicas de programación matemática. Con la cantidad de variables de un proceso productivo, es considerada, hoy en día, una herramienta indispensable para tomar decisiones. La importancia de su aplicación radica en su fortaleza para modelar problemas complejos y resolver esquemas a gran escala.

Muchas veces el proceso de planificación y programación no está acompañado de herramientas que permitan eficiencia y eficacia en el desarrollo de las operaciones. Una errónea programación tiene efectos importantes en la pérdida de productividad y aprovechamiento de la materia prima; incidiendo en los costos de producción.

La planificación de la producción de la planta industrial que se analiza actualmente no maximiza el total de toneladas métricas producidas semanales, ni minimiza el tiempo necesario para producir los pedidos por el departamento logístico. La planificación se realiza de forma empírica, sin tener en cuenta posibles ahorros de tiempo en set up, tiempos de inversión en mantenimientos preventivos, utilización correcta de recursos y maximización de la producción.

El uso de este modelo permite ordenar los pedidos de producción solicitados de una manera óptima, cumpliendo con la entrega en el tiempo adecuado e indexando todas las variables representativas de la planta. Seguir un plan de secuenciación de la producción óptima permite, disminuir el tiempo total necesario para la realización de los pedidos a planta, siendo capaces de visualizar tiempos muertos en la cadena productiva para invertirlos en mantenimientos preventivos, compactar el uso de mano de obra con el fin de disminuir la necesidad de horas extras y cargar al 100% la capacidad instalada.

Los resultados son integrados a un proceso de mejora continua al sistema productivo.

1.3. Justificación

La planificación de la producción es una herramienta útil para la programación de tareas con el fin de cumplir con los plazos y evitar una sobrecarga de los recursos existentes. Es un proceso continuo cuyo objetivo es determinar anticipadamente decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos, refiriéndose a las decisiones tácticas para determinar las actividades y los recursos de la empresa a mediano plazo. El plan agregado debe ser coherente con el plan estratégico a largo plazo, y su desagregación progresiva determina planes y programas operativos, a corto plazo. Su enfoque es la determinación de la cantidad de producción, los niveles de inventarios y la cantidad de recursos necesarios con la finalidad de satisfacer la demanda para un horizonte temporal de planificación específico de mediano plazo.

El problema de secuenciar las órdenes de producción y, en general cualquier problema de scheduling, es un problema de optimización combinatoria difícil, que solo puede ser resuelto por medio de modelos matemáticos avanzados. La función del scheduling es la asignación de recursos limitados a tareas a lo largo del tiempo y tiene como finalidad la optimización de uno o más objetivos.

En este estudio el objetivo es generar un plan de producción óptimo que permita cumplir con la demanda del mercado y gestionar los tiempos necesarios para entregar equipos en mantenimientos preventivos y limpiezas programadas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un modelo matemático que permita la secuenciación óptima de la producción semanal en una planta industrial de nutrición animal.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo matemático para la optimización de la producción semanal en una planta industrial de nutrición animal.
- Analizar que los resultados del modelo matemático se ajusten a la realidad de la planta objeto de estudio.
- Evaluar la viabilidad del proyecto, mediante la comparación del tiempo total necesario para el cumplimiento órdenes de producción planificadas con el método actual y el tiempo total necesario para cumplir el mismo pedido de producción con el método planteado en el presente estudio.

1.5. Hipótesis

El uso de un modelo matemático en la planificación de la producción de una planta de nutrición animal, disminuye tiempos innecesarios de producción, que permitirá destinar tiempo para mantenimientos preventivos.

1.6. Alcance

La presente investigación se desarrolló en el interior de una planta de nutrición animal, la planta procesa alimento para mascotas (perros y gatos) y balanceado para (pollos y cerdos), la planta procesa 2.300 tm a la semana aproximadamente. Utiliza sus equipos durante las 24 horas, de lunes a viernes. Se eligió una semana tipo del año 2019 para el análisis de la producción.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Modelación Matemática

Modelo es una representación matemática simplificada de una situación compleja. Facilita la comprensión y estudia el comportamiento de un sistema, convirtiéndose en una herramienta de ayuda para la toma de decisiones, se fundamenta en un conjunto de procesos estructurados e interpreta la realidad (Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín, & Linares, 2010).

La modelación matemática es el intento de describir el mundo real, mediante la abstracción de eventos naturales en términos matemáticos, utiliza ecuaciones o inecuaciones, donde las variables son la representación de las diferentes posibilidades de un conjunto de respuestas (Alemán Romero, Brito Vallina, Fraga Guerra, Para García, & Arias de Tapia, 2011).

La optimización forma parte de la investigación de operaciones y es una herramienta apropiada para diseño de redes, lo que permite una adecuada toma de decisiones relacionados a aspectos logísticos como localización, número y tamaño de una planta. Los problemas de optimización nacen cuando existe la necesidad de asignar recursos escasos en distintas operaciones (Gamboa Ocampo & Tabares Pineda, 2012, pág. 23).

La investigación de operaciones es la aplicación de métodos científicos en la mejora de las operaciones y decisiones. Permite la construcción de un modelo del sistema para predecir y compara los resultados de diferentes estrategias con el fin de lograr una mejora en la gestión, planificación y predicción en la toma de decisiones (Gamboa Ocampo & Tabares Pineda, 2012).

2.1.1. Etapas en el desarrollo de un modelo de optimización.

La toma de decisiones es inherente a la mayoría de los aspectos en ramas de las finanzas, economía, industria y políticas. En la actualidad, los procesos de decisión que representen realidades son esenciales para la consecución de resultados.

Una de las herramientas que actualmente proporciona respuestas fiables es la optimización; se refiere al análisis y resolución de problemas en que se debe tomar una solución entre un conjunto de soluciones factibles. El objetivo es encontrar la mejor solución (no necesariamente única) de un sistema de funciones (Hosseini, sf).

Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín, & Linares, (2010) indican que “Los modelos de optimización, son aquellos donde existe un conjunto de variables de decisión que deben maximizar/minimizar una función objetivo sometidas a un conjunto de restricciones” (pág. 12).

Las etapas que componen el ciclo de vida de un modelo de optimización son las siguientes:

Identificación del problema: Se refiere a la recopilación y análisis de la información más importante para el problema, en muchas ocasiones los problemas reales no se definen con claridad, por lo que se debe realizar la traducción en frases adecuadas que permitan convertirlas en ecuaciones matemáticas. En esta etapa se desarrollan y se documentan los supuestos que serán comprobados en etapas posteriores. Esta es la etapa principal para que las soluciones y conclusiones que se definan sean de utilidad y las decisiones que se tomen sean las correctas, ya que los datos suelen ser primordiales para obtener realidad o aplicabilidad en las soluciones. (Ramos et al., 2010, pág. 12)

Especificación matemática y formulación: En esta etapa se formula matemáticamente el problema de optimización, se definen las variables, ecuaciones, la función objetivo y los parámetros. Se examina el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, MIP,

NLP). Se debe tener el mayor cuidado al precisar la formulación y a la escritura de las ecuaciones que detallan el problema. (Ramos et al., 2010, pág. 13)

Resolución: En esta etapa se implementa un algoritmo de obtención de la solución numérica óptima o cuasi-óptima, el que puede ser de propósito general (método simplex) o específico. Se pueden desarrollar distintos métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo que conlleve la solución de un problema depende en gran magnitud la técnica con la que fue formulado. La solución óptima debe dar elementos que se constituyan en una guía de actuación para el experto. (Ramos et al., 2010, pág. 13)

Verificación, validación y refinamiento: En esta etapa se eliminan los errores en la codificación (depuración), es decir, mediante la escritura en un lenguaje informático se consigue que el modelo haga lo que se ha detalló matemáticamente en la etapa anterior (Ramos et al.,2010).

Es necesario comprobar la validez de las simplificaciones realizadas a través de los resultados obtenidos, contrastando éstos con situaciones reales ya transcurridas o comprobando que los resultados son coherentes con respecto a lo que sucedería en la realidad. Esta etapa de verificación, validación y comprobación da lugar a nuevas necesidades de refinamiento en el modelado para mejorar la capacidad de representación del sistema [...]. (Ramos et al., 2010, pág. 13)

Interpretación y análisis de los resultados: En esta etapa se proponen soluciones, lo que permite conocer paso a paso el comportamiento del modelo, inicia con un análisis de sensibilidad en los parámetros de entrada, estudia diferentes escenarios de los parámetros, detecta soluciones alternativas cuasi óptimas pero de gran valor y permite comprobar la robustez de la solución óptima (Ramos et al, 2010, pág. 14)

2.2. Programación lineal

2.2.1. Introducción

Una de las áreas más importantes de la matemática aplicada y de la Optimización es la Programación Lineal (término utilizado para detallar técnicas de optimización, los problemas que representan un proceso se definen por ecuaciones lineales). Busca la optimización (minimización o maximización) de una función lineal conocida como función objetivo, sujeta a restricciones lineales de igualdad o desigualdad (Luengerger & Ye, 2008).

La programación lineal permite tomar decisiones donde intervienen un sinnúmero de variables con el fin de optimizar sistemas mediante el uso eficiente de los recursos para maximizar los beneficios y disminuir los costos (Puente & Gavilánez, 2018, pág. 11).

El desarrollo de la programación lineal ha sido clasificado como uno de los avances científicos más importantes de mediados del siglo XX. Su impacto desde 1950 ha sido extraordinario, siendo una herramienta que ha ahorrado miles o millones de dólares a muchas compañías o negocios, en los distintos países industrializados del mundo; su aplicación a otros sectores de la sociedad se ha ampliado con rapidez (Poincaré, sf).

Aunque existen evidencias que la programación lineal fue utilizada por G. Monge en 1776, se considera a L. V. Kantoróvich uno de sus creadores quien la expuso en 1939 en su libro titulado “Métodos matemáticos para la organización y la producción”; recibiendo un premio Nobel de economía en 1975 por sus aportaciones al problema de la asignación óptima de recursos humanos. (Merchante, 2000)

Como afirma el autor Martín (2003), la programación lineal recibió un gran impulso gracias a los ordenadores. Uno de los momentos más importantes fue la aparición del método del simplex, desarrollado por G. B. Dantzig en 1947, que consiste en la utilización de un algoritmo para

optimizar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las restricciones planteadas. (pag. 22)

2.2.2. Planteamiento del problema general de programación lineal

Todo problema de programación lineal, afirma Williams y Ornelas, (2007), requiere identificar cuatro componentes básicos:

- 1) El conjunto de datos.
- 2) El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus dominios respectivos de definición.
- 3) El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el conjunto de soluciones admisibles
- 4) La función lineal que debe ser optimizada (minimizada o maximizada).

Matricialmente, un problema de PL en notación estándar (con igualdades) se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= cx \\ \text{s.a } Ax &= b \quad (1) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Donde:

cx es la función objetivo a maximizar (minimizar),

$x \in \mathbb{R}^{+n}$ representa el vector de variables a determinar,

$c \in \mathbb{R}$ es el vector de costos asociados a las variables,

$A \in M_{m \times n}$ es la matriz de coeficientes y

$b \in \mathbb{R}^{+m}$ el vector de términos independientes relativos a las restricciones; de forma extendida:

$$\text{Maximizar } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + c_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + c_{2n}x_n &= b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + c_{mn}x_n &= b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned}$$

La función objetivo puede representar un problema de maximización o minimización. En un problema concreto, las restricciones pueden venir dadas en términos de igualdad o desigualdad (\geq o \leq) y las variables pueden ser no negativas ($x \geq 0$), no restringidas ($x \in \mathbb{R}$) o acotadas ($l \leq x \leq u$). Sin embargo, dichas variantes pueden transformarse en el problema anterior (1) en forma estándar añadiendo variables adicionales (Merino, 2012).

Para que un modelo de Programación lineal (PL) tenga validez, es necesario cumplir las siguientes propiedades según Martín, (2003):

- (I) Proporcionalidad.** La contribución al valor de la función objetivo y el consumo o requerimiento de los recursos utilizados, son proporcionales al valor de cada variable de decisión.
- (II) Aditividad.** Se puede valorar la función objetivo Z, así como también los recursos utilizados, sumando las contribuciones de cada uno de los términos que intervienen en la función Z y en las restricciones.
- (III) Divisibilidad.** Las variables de decisión son continuas y por lo tanto son aceptados valores no enteros para ellas. La hipótesis de divisibilidad más la restricción de no negatividad, significa que las variables de decisión pueden tener cualquier valor que sea positivo o por lo menos igual a cero.
- (IV) Certidumbre.** Los parámetros o constantes son estimados con certeza, o sea, no interviene una función de probabilidad para obtenerlos (Martín, 2003, pág. 25).

El modelo de programación lineal “es un caso especial de la programación matemática, pues debe cumplir que, tanto la función objetivo como todas las funciones de restricción, sean lineales” (Martín, 2003, pág. 25).

2.2.3. Tipos de modelo de programación lineal

2.2.3.1. Modelo de la mochila

Dado un conjunto de objetos $\{1 \dots n\}$, cada uno j caracterizado por un peso p_j y un valor v_j . Considera también un contenedor o mochila caracterizada por poder contener objetos cuyo peso total no excede de p_0 unidades. El problema de la mochila establece los objetos que son convenientes introducir en un contenedor de tal forma que el peso de los objetos no supere el límite impuesto por p_0 y al mismo tiempo el valor total de lo contenido sea máximo (Salazar, 2001).

Este modelo es útil cuando hay que seleccionar un conjunto de objetos en presencia de recursos limitados.

Una variable decisional x_j , asociada a cada objeto, representando:

$$x_j := \begin{cases} 0 & \text{Si el objeto } j \text{ debe introducirse} \\ 1 & \text{en el otro caso} \end{cases}$$

Entonces un modelo de programación lineal entera del modelo es:

$$\max \sum_{j=1}^n v_j x_j$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n p_j x_j \leq p_0$$

$$0 \leq x_j \leq 1$$

2.2.3.2. Modelo de transporte

Permite obtener una idea general de cómo solucionar planes óptimos de envío para problemas de transporte. Involucra la transportación de

artículos o productos semejantes desde diferentes orígenes hacia varios destinos. El modelo se aplica al control y diseño de plantas de fabricación, determinación de territorios de venta, localización de centros de distribución y almacenaje (Izar, 1996).

La función objetivo será el costo total de envíos, según Izar, (1996), se define con la siguiente ecuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{\substack{j=1 \\ i=1 \\ i=m \\ j=n}} C_{ij} X_{ij}$$

Donde:

C_{ij} = costo de enviar una unidad de mercadería del lugar principal de suministro i al centro de consumo j .

X_{ij} = número de unidades de mercancía que se enviarán del centro de suministro i al centro de consumo j

m = número de centros de suministros.

n = número de centros de consumo.

2.2.3.3. Modelo de Asignación

El modelo permite asignar a cada trabajador una actividad, conociendo que hay el mismo número (n) de trabajadores y n tareas. Cada trabajador es capaz de ejecutar una sola actividad y cada tarea es realizada por un solo trabajador (Salazar, 2001).

Según Cabrera, (sf), este modelo es la modelización en programación lineal del algoritmo húngaro, para lo cual es obligatorio definir una nueva variable, llamada variable dual que es representada por a_{ij} y su funcionamiento es el siguiente (Cabrera Rodríguez, s.f, pág. 7):

Si $a_{ij} = 1$ entonces el señor i ocupa el puesto j .

Si $a_{ij} = 0$ entonces el señor i no ocupa el puesto j .

Se llama variable dual porque sólo puede tomar dos valores: 1 o 0.

En el problema se define:

V_{ij} ----- valor de la persona i para el puesto j .

F.O.: Maximizar $\sum a_{ij} * V_{ij}$

S.a.: Para todo $i: \sum a_{ij} = 1$

Para todo $j: \sum a_{ij} \leq 1$

La primera restricción indica que una persona ocupará un puesto.

La segunda indica que un puesto sólo lo ocupará una persona o bien no estará ocupado.

2.2.3.4. Modelo de scheduling (secuenciación)

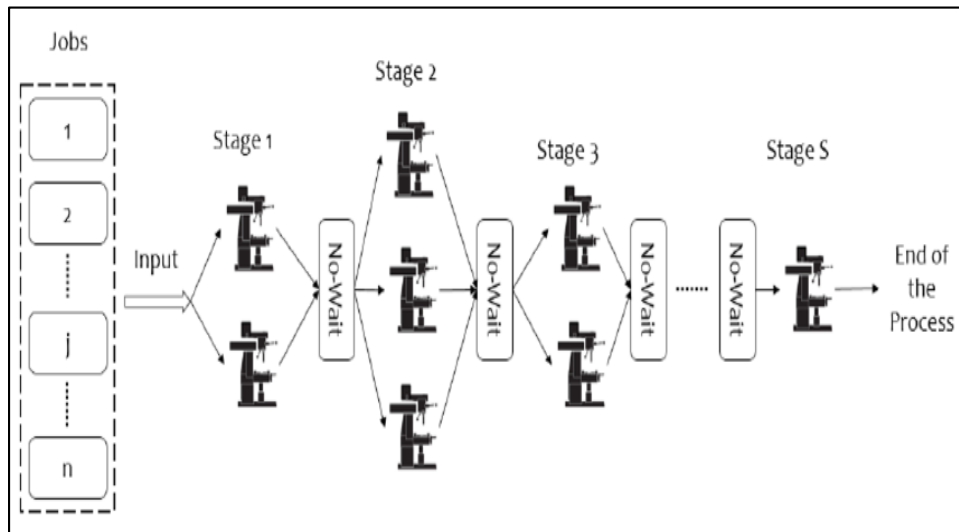
El scheduling es una tarea que conlleva una importante necesidad de cálculo y es extremadamente difícil. En general se ocupa para la optimización en áreas como: la planificación de producción en plantas industriales, asignación de tareas para recurso humano, entre otras (Salto, 2000).

Los problemas de scheduling corresponden a problemas de optimización combinatoria. Se asigna recursos restringidos a tareas a lo largo del tiempo y tiene como finalidad la optimización de uno o más objetivos. Los recursos y las tareas toman diversas formas, pudiendo ser máquinas en una planta, unidades de procesamiento computacional, máximos en cantidades de almacenamiento, mínimos de producción, etc.; además, cada tarea puede tener prioridades para su ejecución, determinando complejidades mayores al modelo (Salto, 2000), ver gráfico 2.1 y 2.2.

El scheduling puede ser un problema difícil desde el punto de vista técnico y de implementación. En la implementación de un problema de scheduling, hay que tener en cuenta que este debe estar dentro de un sistema que habilite la aplicación del scheduler, por lo que se tiene que

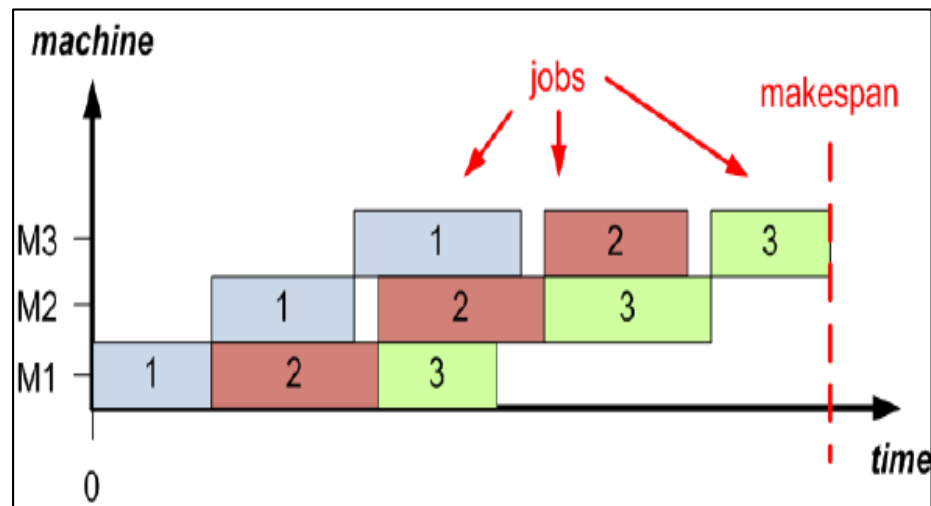
incorporar en el sistema de información de la empresa u organización (Salto, 2000).

Gráfico 2.1. Línea productiva de un modelo de scheduling



Fuente: <https://www.researchgate.net/figure/Flexible-Flow-Shop-Scheduling>

Gráfico 2.2. Respuesta de un modelo de scheduling



Fuente: <https://www.researchgate.net/figure/Flexible-Flow-Shop-Scheduling>

2.3. La herramienta GAMS

Afirma Castillo, Conejo, Pedregal, García, & Alguacil, (2002), GAMS (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje de programación para modelar, analizar y resolver diversos problemas de optimización, las características más importantes son:

- Capacidad de resolver problemas con docenas o miles de variables y restricciones
- Separa el proceso del modelado y de la resolución del problema, por lo que permite cambios para mejorar o completar.
- El código GAMS es de sencilla comprensión para personas familiarizadas con sistemas de optimización.
- Proporciona mecanismos para resolver problemas de optimización con estructuras similares.

2.4. Estructura básica del modelo

El diseño del modelo matemático se basa en las distintas etapas del proceso de producción semanal de una planta de nutrición animal.

Se ha construido considerando los flujos de producción semanal de acuerdo a la demanda, la capacidad de los bins (reservorios de producto en proceso o producto terminado con capacidades diferentes dependiendo de cada etapa), los componentes que pasan por ciertos equipos, la velocidad de los equipos, máquinas y los componentes por productos.

El modelo permitirá definir las cantidades ideales de producción de acuerdo a la demanda, maximizar la utilización del sistema productivo y cumplir con la entrega oportuna de los productos en el tiempo acordado.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Modalidad de la investigación

La metodología empleada en la presente investigación es cuantitativa y parte del análisis de una situación particular, se resuelve un problema, utilizando un modelo matemático, para mejorar la eficiencia de una planta de nutrición animal. El resultado obtenido del modelo matemático permitirá la toma de decisiones a mediano y largo plazo.

3.1.2. Tipos de investigación

La presente investigación fue de tipo exploratoria ya que se pudo identificar de manera precisa el problema y después de la recolección eficaz de la información necesaria se plantea solución a la problemática.

También se utilizó la investigación descriptiva, ya que se caracterizó la situación actual del área productiva detallando en horas el tiempo y maquinaria que necesita cada componente para obtener el producto final. Y por último también se utilizó la investigación correlacional la cual permite conocer el grado de vinculación entre dos o más variables.

3.1.3. Herramientas de la investigación

Se utilizó las siguientes herramientas de investigación:

- La investigación bibliográfica que contiene informes, datos históricos y reales de la operación de la planta, publicaciones de internet, libros.
- La observación del proceso productivo in situ con el fin de conocer en detalle la planificación de la producción de la planta, con el fin de conocer los recursos con los que cuenta planta, velocidad de

procesamiento de cada ítem producido, tiempo requerido en cambio de formato de cada uno de los recursos, relaciones productivas de cada uno de los recursos y pedido de producción semanal.

3.1.4. Técnica de recolección de datos

Las distintas fuentes de información, se las obtuvo de la base de datos obtenidos de la planta de nutrición animal, referente a los diferentes informes de la planificación de la producción de la planta de nutrición animal, del mes de mayo de 2019, los mismos que se han desarrollado de forma empírica y, la observación directa permitió recoger información real en el tiempo de evaluación.

3.2. Diseño del modelo matemático

3.2.1. Distribución de planta

Existen las siguientes áreas en la etapa de procesamiento:

- Mezclado
- Equipos para elaboración de croquetas
- Máquinas para elaboración de balanceado
- Empacado y
- Ensacado

Para la elaboración del alimento para mascotas hay cuatro bins para la mezcla de las croquetas, 14 Bins con una capacidad de 240 tm en el área de empaquetado, y tres empaquetadoras, para las presentaciones de 15 kg, 20 kg y 25 kg.

Para elaborar el balanceado la planta cuenta con seis bins para mezclar el balanceado, 25 bins para almacenar el balanceado en el área de ensacado con capacidad de 300 tm y dos ensacadoras para presentaciones del producto de 20 kg y 40 kg.

El Anexo A presenta en detalle la distribución de la planta y la capacidad de cada uno de los equipos y maquinarias.

3.2.2. Datos del modelo

Para el desarrollo del modelo matemático es necesaria la información de parámetros que permitan obtener un programa de producción, que maximice la cantidad total de toneladas métricas producidas y minimice los tiempos perdidos en cambios de productos o componentes.

En este apartado se describirán las fuentes de información para los parámetros más importantes necesarios para el funcionamiento del modelo.

3.2.2.1. Índices del modelo

Los índices introducidos en el modelo son los siguientes:

i: **Maquina Mezcladora**, $i = MP$

t: **Días de planificación**, $t = lun, mar, \dots, vie$

be: **Bines iniciales del proceso**, $be = be1, \dots, be4, bm1, \dots, bm6$

e: **Equipo o maquinas de producción**, $e = e1, e2, m1, m2$

beeq: **Bines de almacenamiento del proceso**,

$beeq = bee1, \dots, bee4, bee11, \dots, bee20, bma1, \dots, bma25$

pempa: **Empaquetadora o ensacadora de producción**,

$pempa = emp1, \dots, emp3, ens1, ens2$

cprod: Componentes de balanceado o mascotas,

$$cprod = sp, sa, \dots, se2, p1, p2, \dots, c4$$

pprod: Productos de balanceado o mascotas,

$$pprod = p1, p2, \dots, g2, po1, \dots, ce4$$

$$pprod \subset pprod2$$

$$pempa2 \subset pempa22$$

Cada una de las entidades consideradas, se describen a continuación:

Mezcladora (i): Primera máquina del sistema; es donde comienza el proceso, se llama mezcladora. Su principal función es homogenizar las materias primas y colocarlas en los bins antes de los equipos o máquinas.

Días de planificación (t): Corresponde al horizonte de tiempo determinado para el modelo.

Bins iniciales del proceso (be): Corresponde a los bins (depósitos) donde se deposita lo producido en mezcladora.

Equipos o máquinas de producción (e): Equipos o máquinas que toman el producto de los bins antes de equipos o máquinas y lo procesan a velocidades determinadas por el modelo.

Bins de almacenamiento del proceso (bee): Bins o reservorios de producto terminado con capacidades diferentes que almacenan lo producido por equipos o máquinas.

Máquinas empaquetado o ensacado (pempq): Empaquetadoras (área mascotas) o ensacadoras (área balanceado) que toman el producto de los bins después de equipos o máquinas y lo procesan a velocidades determinadas por el modelo.

Componentes de mascotas o balanceado (cprod): Corresponden a un componente semielaborado para el modelo. Corresponde a una de las componentes del producto final.

Productos de mascotas o balanceados (pprod): Indica el producto terminado del modelo. Es el ítem que consta en el programa de demanda otorgado a planta.

3.2.2.2. Variables

Las variables son factores controlables del modelo que contribuyen en la solución general del problema.

Mediante las variables que se detallan a continuación se obtienen los resultados del modelo.

$$benv_{t,cprod,beeq} = \begin{cases} 1 & \text{Si el bin beeq es llenado por el componente cprod} \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$$

$$bcambcomp_{cprod,t,e} = \begin{cases} 1 & \text{Si el componente cprod pasa por el equipo e en el tiempo t} \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$$

$envprod_{t,cprod,i,be,e,beeq}$ *Envios de lote del proceso*

$prodcprod_{cprod,t}$ *Producción del componente en el día t*

$prde_{cprod,e,t}$ *Producción del componente en el día t por el equipo e*

$prdm_{cprod,i,t}$ *Producción del componente en el día t por la mezcladora*

$w_{cprod,pempa,q,t}$ *Producción del componente en el día t por empaquetadora*

$totalbe_{be,t}$ *Unidades totales de componentes de los bins be en el día t*

$totalbin_{beeq,t}$ *Unidades totales del bin beeq en el día t*

$tiempoequipo_{e,t}$ *Tiempo en el equipo e en el día t*

$tiempomaquinaria_{i,t}$ *Tiempo de la mezcladora en el día t*

$cantcomp_{et}$ *Cantidad de componentes por equipo y por día*

3.2.2.3. Parámetros

El modelo se sustenta con la información determinada en los parámetros siguientes:

- a) Capacidad de los bins **beeq** por proceso

Tabla 3.1. Capacidad de los bins *beeq* donde guarda solo un componente

$$t_{capbeq_{beeq}}$$

Descripción	Capacidad Tm.
bee1	30
bee2	30
bee3	30
bee4	30
bee11	12
bee12	12
bee13	12
bee14	12
bee15	12
bee16	12
bee17	12
bee18	12
bee19	12
bee20	12
bma1	12
bma2	12
bma3	12
bma4	12
bma5	12
bma6	12
bma7	12
bma8	12
bma9	12
bma10	12
bma11	12
bma12	12
bma13	12
bma14	12
bma15	12
bma16	12
bma17	12
bma18	12
bma19	12
bma20	12
bma21	12
bma22	12
bma23	12
bma24	12
bma25	12

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

En la tabla 3.1, se muestra la capacidad de cada uno de los bins de almacenamiento del proceso. Después de equipos de producción existen 4 bins de 30 tm, y 10 bins de 12 tm.

Después de máquinas de producción (equipo 1 y equipo 2) hay 25 bins de capacidad de 12 tm.

b) Tabla binaria que indica que componentes pasan por equipo e.

Tabla 3.2. Componentes que pasan por ciertos equipos o máquina
 $tcompe_{cprod,e}$

Componentes	Equipo o Máquina
sp	e1
sp	e2
sa	e1
sa	e2
sc	e1
se1	e2
sl	e1
sl	e2
spe	e2
se2	e2
p_1	m1
p_2	m1
p_3	m1
p_4	m1
c_1	m1
c_2	m1
c_3	m1
c_4	m1
p_1	m2
p_2	m2
p_3	m2
p_4	m2
c_1	m2
c_2	m2
c_3	m2
c_4	m2

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La tabla 3.2, indica el tipo de equipo o máquina que necesita cada componente o producto para ser procesado. A continuación, se detalla un listado de los componentes que son utilizados para la elaboración de cada uno de los productos:

Componentes

sp	Sabor pollo Sabor
sa	arroz
sc	Sabor carne Sabor
se1	especial 1 Sabor
se2	especial 2
sl	Sabor leche Sabor
spe	pescado

Productos

p_1	Pollo1
p_2	Pollo2
p_3	Pollo3
p_4	Pollo4
c_1	Cerdo1
c_2	Cerdo2
c_3	Cerdo3
c_4	Cerdo4

El componente sabor pollo, sabor arroz y sabor leche son procesados solo por el equipo 1 y equipo 2. El sabor carne solo es procesado por el equipo 1. El sabor especial 1, el sabor pescado y sabor especial 2 pasan por el equipo 2.

La máquina 1 y máquina 2 procesan todos los productos, pollo y cerdo.

c) Tabla binaria que indica los bins iniciales pasan por el equipo e

Tabla 3.3. Conexión de los bins al equipo o maquina
tbee_{be,e}

Bines	Equipo o Máquina
be1	e1
be2	e1
be3	e2
be4.	e2
bm1	m1
bm2	m1
bm3	m2
bm4	m2

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La tabla 3.3, indica que existen 4 bins antes de equipos o máquinas y su conexión es la siguiente:

- Bin (be) 1 y 2 se conectan con el equipo 1. El bin (be) 3 y 4 con el equipo 2.
- Bin (bm) 1 y 2 se conectan con la máquina 1. El bin (bm) 3 y 4 con la máquina 2.

d) Tabla binaria que indica los envíos permitidos entre el equipo e a los bins finales del proceso.

Tabla 3.4. Conexion de los equipos con los bins

tebeq_{e,beeq}

Equipo o Máquina	Bines	Equipo o Máquina	Bines
e1	bee1	m1	bma12
e1	bee2	m1	bma13
e1	bee3	m1	bma14
e1	bee4	m1	bma15
e1	bee11	m1	bma16
e1	bee12	m1	bma17
e1	bee13	m1	bma18
e1	bee14	m1	bma19
e1	bee15	m1	bma20
e1	bee16	m1	bma2
e1	bee17	m1	bma22
e1	bee18	m1	bma23
e1	bee19	m1	bma24
e1	bee20	m1	bma25
e2	bee1	m2	bma1
e2	bee2	m2	bma2
e2	bee3	m2	bma3
e2	bee4	m2	bma4
e2	bee11	m2	bma5
e2	bee12	m2	bma6
e2	bee13	m2	bma7
e2	bee14	m2	bma8
e2	bee15	m2	bma9
e2	bee16	m2	bma10
e2	bee17	m2	bma11
e2	bee18	m2	bma12
e2	bee19	m2	bma13
e2	bee20	m2	bma14
m1	bma1	m2	bma15
m1	bma2	m2	bma16
m1	bma3	m2	bma17
m1	bma4	m2	bma18
m1	bma5	m2	bma19
m1	bma6	m2	bma20
m1	bma7	m2	bma21
m1	bma8	m2	bma22
m1	bma9	m2	bma23
m1	bma10	m2	bma24
m1	bma11	m2	bma25

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La conexión de los equipos y máquinas de producción con los bins de almacenamiento del proceso se detallan en la tabla 3.4.

El equipo 1 y equipo 2 tiene conexión con 14 bins, dentro del modelo son expresados con las siguientes nomenclaturas (*bee1* hasta *bee4*; *bee11* hasta *bee20*).

La máquina 1 y máquina 2 se conectan con 25 bins instalados después de la maquinaria, expresados como (*bma1* hasta *bma25*) en el modelo matemático.

e) Velocidad de la empaquetadora o ensacadora por *pprod*

Tabla 3.5. Velocidad de la empaquetadora- ensacadora por producto
 $velempaqprod_{pprod,pempa}$

Tipo de alimento	Producto	Empaquetadora - Ensacadora	Tiempo Tm/h
Croquetas para perros	p1	emp1	10
	p1	emp2	12
	p1	emp3	14
	p2	emp2	12
	p2	emp3	14
	p3	emp2	12
	p3	emp3	14
Croquetas para gatos	g1	emp1	10
	g1	emp2	12
	g2	emp2	12
Balanceado para pollos	po1	ens1	30
	po2	ens1	30
	po3	ens2	50
	po4	ens2	50
Balanceado para cerdos	ce1	ens1	30
	ce2	ens1	30
	ce3	ens2	50
	ce4	ens2	50

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La tabla 3.5 representa la velocidad de las máquinas empaquetadoras y ensacadoras por producto. La empaquetadora 1 para presentaciones de 15 kg procesa 10 tm métricas por hora, la empaquetadora 2 de presentaciones de 20 kg produce 12 tm/h y para presentaciones de 25 kg la empaquetadora 3 tiene capacidad de hasta 14 tm/h.

La ensacadora 1 permite procesar productos de presentación de 20 kg, con velocidad de 30 tm/h y la ensacadora 2 produce a ritmo de 50 tm/h, para presentaciones de 40 kg.

f) Velocidad del equipo o maquina e

Tabla 3.6. Velocidad del equipo o máquina
veleprod_e

Equipo o Máquina	Tiempo tm/h
e1	6
e2	6
m1	12
m2	12

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Hay dos equipos en la producción de alimentos para mascotas y dos máquinas para la preparación de balanceado. Las máquinas y equipos son las encargadas de tomar el producto que está en los bins luego de la mezcladora y procesarlos hasta darles la forma de figura mediante el uso de moldes.

La tabla 3.6 detalla la velocidad de los equipos y máquinas encargadas del procesamiento de cada componente y producto para la elaboración de los alimentos.

La velocidad del equipo 1 y el equipo 2 es de 6 tm/h en el procesamiento de cada componente utilizado en los alimentos para mascotas (perros y gatos).

La máquina 1 y máquina 2 tienen velocidades de 12 tm/h para el proceso de los productos para balanceado (pollos y cerdos).

g) Set up de equipos

setupe

Cada vez que hay un cambio de componente en los equipos y de producto en las máquinas hay una paralización, de acuerdo al siguiente detalle:

- Equipo 1 y equipo 2 de dos horas.
- Máquina 1 y máquina 2 de media hora.

h) Demanda del producto por empaque y por día

Tabla 3.7. Demanda de producto por empaque y por día

$$demprod_{pprod, pempa, t}$$

(TM)

Producto/ Equipo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
p1.emp1	30				
p1.emp2	60				120
p1.emp3	30				
p2.emp2		120		60	60
p2.emp3		120			
p3.emp2	30		30	24	
p3.emp3	30		30		
g1.emp1			60		
g1.emp2			60		
g2.emp3				60	30
po1.ens1		54	30	60	60
po2.ens1			60		
po3.ens2	60	60	90	60	120
po4.ens2	42	60	30	60	60
ce1.ens1			60		60
ce2.ens1		120		30	
ce3.ens2	54				
ce4.ens2	54				
TOTAL	390	534	450	354	510

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Fuente: Departamento comercial planta industrial

La demanda de cada de producto se considera fija y conocida por periodo de evaluación. Los valores representados en la tabla 3.7 indican el pedido demandado, en la semana objeto de estudio, de los diferentes productos procesados en planta, expresados en toneladas métricas.

La empresa produce 3 tipos de alimentos para perros, el producto Perro1 tiene una demanda en la semana analizada de 240 tm en las tres presentaciones de 15 kg, 20 kg y 25 kg, siendo la presentación de 20 kg la más requerida por los clientes con 180 tm. La demanda del producto Perro2 y Perro3 es de 360 tm y 144 tm respectivamente. Estos productos se ofrecen al público en dos presentaciones de 20 kg y 25 kg siendo la presentación de 20 kg la más solicitada.

En los alimentos para gato la empresa dispone de dos productos: Gato1 en dos presentaciones de 15 kg y de 20 kg y, el producto Gato2 en una

sola presentación de 25 kg. La demanda total del alimento para gatos es de 210 tm a la semana.

Los alimentos para pollos se producen en 4 tipos de productos, de acuerdo a la cantidad demandada en la semana de análisis, con un total de 960 tm, en las presentaciones Pollo1 y Pollo2 en sacos de 20 kg y, Pollo3 y Pollo4 en sacos de 40 kg.

La cantidad demandada del alimento para cerdos es de 378 tm en la semana, representado en 4 productos, Producto Cerdo1 y Cerdo2 en sacos de 20 kg y, Producto Cerdo3 y Cerdo4 en sacos de 40 kg.

i) Tabla de componentes que contiene el *pprod*

Tabla 3.8. Componentes que contiene por producto

$$tcomp_{cprod,pprod} , tcomp2_{cprod,pprod}$$

		PRODUCTOS												
		p1	p2	p3	g1	g2	po1	po2	po3	po4	ce1	ce2	ce3	ce4
C O M P O N E N T E S	sp	1	0,6											
	sa		0,4	0,3										
	sc			0,3										
	se1			0,4										
	sl				0,5	0,4								
	spe				0,5	0,4								
	se2					0,2								
	p_1						1							
	p_2							1						
	p_3								1					
	p_4									1				
	c_1										1			
	c_2											1		
	c_3												1	
	c_4													1

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La tabla 3.8 expone la composición de los productos principales. Se producen 13 diferentes productos de acuerdo al siguiente detalle:

Para la alimentación canina existen 3 productos, Producto Perro1 (*p1*), compuesto por 1 solo ingrediente, Sabor pollo con inclusión de 100%; Producto Perro2 (*p2*), contiene 2 ingredientes Sabor pollo con inclusión de 60% y Sabor arroz con inclusión de 40% y, Producto Perro3 (*p3*), compuesto por 3 ingredientes, Sabor arroz con inclusión de 30%, Sabor especial 1 con inclusión de 40% y Sabor carne con inclusión de 30%

Para la alimentación felina hay 2 productos, Producto Gato1 (*g1*), conformado de 2 ingredientes, Sabor leche con inclusión de 50% y Sabor pescado con inclusión de 50%; Producto Gato2 (*g2*), elaborado con 3 ingredientes Sabor leche con inclusión de 40%, Sabor pescado1 con inclusión de 40% y Sabor especial 2 con inclusión de 20%

Para la alimentación avícola producen 4 tipos de balanceados que contienen un solo ingrediente: Producto Pollo1 (*po1*), elaborado con Pollo1 con inclusión de 100%; Producto Pollo2 (*po2*) de Pollo2 con inclusión de 100%; Producto Pollo3 (*po3*) con Pollo3 con inclusión de 100% y, Producto Pollo4 (*po4*) elaborado con Pollo4 con inclusión de 100%

Para la alimentación porcina hay 4 tipos de balanceados elaborados con 1 solo ingrediente, Producto Cerdo1 (*ce1*) contiene Cerdo1 con inclusión de 100%; Producto Cerdo2 (*ce2*) fabricado con Cerdo2 con inclusión de 100%; Producto Cerdo3 (*ce3*) conformado por Cerdo3 con inclusión de 100% y, Producto Cerdo4 (*ce4*) con Cerdo4 con inclusión de 100%

j) Velocidad de la mezcladora

velmaq

Velocidad diaria de la mezcladora es de 30 Tm/h

k) Tamaño de batch de la mezcladora

batch

El procesamiento en la mezcladora se realiza en múltiplos de seis toneladas métricas.

3.2.2.4. Función objetivo

Optimizar el proceso productivo con la disminución de tiempos muertos en cambios de producto y garantizar el cumplimiento del pedido demandado.

Minimizar:

$$Z = \sum_{cprod,t,e} setupe_e * bcambcomp_{cprod,t,e} + \sum_{cprod} (prod_{cprod,t} - \sum_{cprod} demprod_{pprod,pempa,q,t} * tcomp_{cprod,pprod})$$

3.2.2.5. Restricciones

Las restricciones consideradas para el modelo matemático se representan en las ecuaciones siguientes:

(1) $\forall cprod, t$

$$\sum_{i,be,e,beeq} batch * tbee_{be,e} * tcompe_{cprod,e} * tebeq_{e,beeq} * envprod_{t,cprod,i,be,e,beeq} = prod_{cprod,t}$$

La cantidad del componente cprod por día es igual a la suma de los envíos generados de todos los procesos.

(2) $\forall c_{prod}, t$

$$prod_{c_{prod}, t} \geq \sum_{pprod, pempa} dem_{pprod, pempa, t} * tcomp_{c_{prod}, pprod}$$

La cantidad de componentes producidas por el proceso debe ser igual o mayor a la demanda transformada por componente.

(3) $\forall e, t$

$$\left(\sum_{i, be, beeq, c_{prod}} batch * tbee_{be, e} * tcompe_{c_{prod}, e} * tebeq_{e, beeq} * envprod_{t, c_{prod}, i, be, e, beeq} \right) / veleprod_e + setupe_e * \sum_{c_{prod}} bcamp_{c_{prod}, t, e} \geq tiempo_{e, t}$$

Tiempo total del procesamiento del equipo e en el día t

(4) $\forall e, t$

$$tiempo_{e, t} \leq 24$$

El tiempo total del equipo por día debe trabajar igual o menor a 24 horas

(5) $\forall i, t$

$$\left(\sum_{be, e, beeq, c_{prod}} batch * tbee_{be, e} * tcompe_{c_{prod}, e} * tebeq_{e, beeq} * envprod_{t, c_{prod}, i, be, e, beeq} \right) / velmaq = tiempo_{i, t}$$

Tiempo total de la maquinaria i en el día t

(6) $\forall i, t$

$$\text{tiempomaquinaria}_{i,t} \leq 24$$

El tiempo total de la maquinaria i en el día t debe ser menor o igual a 24

(7) $\forall \text{beeq}, t$

$$\sum_{\text{cprod}} \text{benv}_{t,\text{cprod},\text{beeq}} = 1$$

El bin beeq solo debe contener un componente por dia

(8) $\forall \text{beeq}, t, \text{cprod}$

$$\sum_{i, \text{be}, e} \text{batch} * \text{tbee}_{\text{be}, e} * \text{tcompe}_{\text{cprod}, e} * \text{tebeq}_{e, \text{beeq}} * \text{envprod}_{t, \text{cprod}, i, \text{be}, e, \text{beeq}} \leq \text{tcapbeq}_{\text{beeq}} * \text{benv}_{t, \text{cprod}, \text{beeq}}$$

Restricción de la capacidad de los bins beeq

(9) $\forall \text{cprod}, e, t$

M es un numero grande

$$\sum_{i, \text{be}, \text{beeq}} \text{batch} * \text{tbee}_{\text{be}, e} * \text{tcompe}_{\text{cprod}, e} * \text{tebeq}_{e, \text{beeq}} * \text{envprod}_{t, \text{cprod}, i, \text{be}, e, \text{beeq}} \leq M * \text{bcambcomp}_{\text{cprod}, t, e}$$

Determinar si el equipo e desarrolla el componente cprod en el día t

(10) $\forall c_{prod}, e, t$

$$bcambcomp_{c_{prod},t,e} \leq tcompe_{c_{prod},e}$$

Restricción de la variable binaria con el objetivo de que se tome la decisión validando que ese equipo produzca dichos componentes.

(11) $\forall beeq, t$

$$\begin{aligned} totalbin_{beeq,t} = & \sum_{i,be,e,c_{prod}} batch * tbee_{be,e} * tcompe_{c_{prod},e} * tebeq_{e,beeq} \\ & * envprod_{t,c_{prod},i,be,e,beeq} \end{aligned}$$

Cantidad total almacenado en el bin *beeq* en el día *t*

(12) $\forall be, t$

$$\begin{aligned} totalbe_{be,t} = & \sum_{i,e,beeq,c_{prod}} batch * tbee_{be,e} * tcompe_{c_{prod},e} * tebeq_{e,beeq} \\ & * envprod_{t,c_{prod},i,be,e,beeq} \end{aligned}$$

Cantidad total almacenado en el bin *be* en el día *t*

(13) $\forall c_{prod}, e, t$

$$\begin{aligned} prde_{c_{prod},e,t} = & \sum_{i,be,beeq,c_{prod}} batch * tbee_{be,e} * tcompe_{c_{prod},e} * tebeq_{e,beeq} \\ & * envprod_{t,c_{prod},i,be,e,beeq} \end{aligned}$$

Cantidad producida del componente *c_{prod}* del equipo *e* en el día *t*

(14) $\forall cprod, i, t$

$$prdm_{cprod,i,t} = \sum_{e,be,beeq,cprod} batch * tbee_{be,e} * tcompe_{cprod,e} * tebeq_{e,beeq} \\ * envprod_{t,cprod,i,be,e,beeq}$$

Cantidad producida del componente *cprod* en el día *t* por la mezcladora *i*

(15) $\forall pprod, pempa, t / demprod_{pprod,pempa,t} > 0 ,$

$tcomp_{cprod,pprod} > 0 , pempa2 \neq pempa$

$$w_{pprod,pempa,t} = \sum_{cprod} prod_{cprod,t} * tcomp2_{cprod,pprod} \\ - \sum_{cprod,pprod2,pempa2} demprod_{pprod2,pempa2,t} * tcomp_{cprod,pprod2}$$

Cantidad total de productos por empaquetadora y por día

(16) $\forall e, t$

$$cantcomp_{et} = \sum_{cprod} bcambcomp_{cprod,t,e}$$

Cantidad de componentes por equipo y por día

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Implementación del modelo

Luego de definir los parámetros se desarrolla el modelo matemático.

El modelo considera 16 restricciones y 12 variables; tiene como horizonte de tiempo cinco días. El desarrollo computacional se hizo con el software, “General Algebraic Modeling System” (GAMS) que permite, mediante lenguaje matemático, resolver problemas complejos de programación lineal.

4.2. Principales Resultados Obtenidos

Luego del ingreso de los datos en el modelo se detallan los siguientes resultados:

4.2.1. Producción de la mezcladora

Una vez que se han ingresado los datos de la semana en estudio en el modelo y, de acuerdo a la demanda del producto por empaque y por día, se obtienen los siguientes resultados (ver tabla 4.1):

- Los días martes con 534 tm y viernes con 510 tm son los días de mayor producción.
- El día lunes el mayor componente procesado es el sabor pollo con 120 tm, seguido del producto pollo3 con 60 tm. El total procesado en el día es 390 tm.
- El día martes la producción de la mezcladora se concentra en los componentes sabor pollo 144 tm, sabor arroz 96 tm, y del producto cerdo2 con 120 tm. Es el día de menor cambio de componentes con 6 en total.

- El día miércoles la mezcladora produce 450 tm utilizando 10 componentes; es el segundo día de mayor cambio de componentes en la semana.
- El día jueves se realizan 11 cambios de componentes para una producción total de 366 tm, como se puede verificar en la tabla 4.1. Es el día de mayor número de cambios.
- El día viernes se procesan 10 componentes. El sabor pollo y pollo3 son los componentes que más se procesan.
- El sabor pollo es el componente más utilizado en la semana procesándose un total de 456 tm, seguido del producto pollo3 con 390 tm y el menos requerido de los componentes es el sabor especial 2 con 18 tm.

Tabla 4.1. Producción de mezcladora

TM						
Componente	lun	ma	mie	jue	vie	Total
sp	120	144		36	156	456
sa	18	96	18	36	24	192
sc	18		18	12		48
se1	24		24	12		60
sl			60	24	12	96
spe			60	24	12	96
se2				12	6	18
p_1		54	30	60	60	204
p_2			60			60
p_3	60	60	90	60	120	390
p_4	42	60	30	60	60	252
c_1			60		60	120
c_2		120		30		150
c_3	54					54
c_4	54					54
TOTALES	390	534	450	366	510	2.250

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Implementado el modelo, la mezcladora utiliza los tiempos que se especifican en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Tiempo de producción mezcladora (horas)

Componente	lun	ma	mie	jue	vie
sp	4,0	4,8		1,2	5,2
sa	0,6	3,2	0,6	1,2	0,8
sc	0,6		0,6	0,4	
se1	0,8		0,8	0,4	
sl			2,0	0,8	0,4
spe			2,0	0,8	0,4
se2				0,4	0,2
p_1		1,8	1,0	2,0	2,0
p_2			2,0		
p_3	2,0	2,0	3,0	2,0	4,0
p_4	1,4	2,0	1,0	2,0	2,0
c_1			2,0		2,0
c_2		4,0		1,0	
c_3	1,8				
c_4	1,8				
Total	13,0	17,8	15,0	12,2	17,0

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La mezcladora, para el procesamiento de los componentes y productos demandados requiere la siguiente cantidad de horas por día:

- El día lunes 390 tm en 13 horas.
- El día martes para 534 tm se toma 17.80 horas.
- El día miércoles 450 tm en 15 horas.
- El día jueves 366 tm en 12.20 horas.
- Y el día viernes 510 tm en 17 horas.

La mezcladora dispone de 24 horas diarias. Utilizando la respuesta optimizada que ha generado el modelo, las horas que la mezcladora se quedará sin producir se detalla en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Tiempo sin producir mezcladora (horas)

Horas				
lun	ma	mie	jue	vie
11	6,2	9	11,8	7

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Estas horas se pueden utilizar para mejorar los indicadores de paralización no planificadas mediante limpieza o mantenimientos preventivos planificados.

4.2.2. Producción de equipos y máquinas

Para cubrir con las toneladas requeridas de acuerdo a la demanda diaria de la semana tipo es necesario se procesen los componentes de la siguiente manera (ver tabla 4.4):

Tabla 4.4. Producción por equipo

		(TM)					
Componente	Equipo	lun	ma	mie	jue	vie	Total
sp	e1	54	24		36	72	186
sp	e2	66	120			84	270
sa	e1		96	18	36	24	174
sa	e2	18					18
sc	e1	18		18	12		48
se1	e2	24		24	12		60
sl	e1			60		12	72
sl	e2				24		24
spe	e2			60	24	12	96
se2	e2				12	6	18
p_1	m1		54	18		60	132
p_1	m2			12	60		72
p_2	m1			60			60
p_3	m1		60	90		120	270
p_3	m2	60			60		120
p_4	m1					60	60
p_4	m2	42	60	30	60		192
c_1	m2			60		60	120
c_2	m1		120				120
c_2	m2				30		30
c_3	m1	54					54
c_4	m1	54					54
TOTALES		390	534	450	366	510	2.250

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

El día lunes en el equipo 1 se procesa 54 toneladas del componente sabor pollo y 18 toneladas del componente sabor carne. El equipo 2 procesa sabor pollo en mayor cantidad, 66 tm, sabor arroz 18 tm y 24 tm del sabor especial 1. La máquina 1 procesa el componente cerdo3 y cerdo4, 54 tm cada una y la máquina 2 los componentes pollo3 y pollo4 en 60 y 42 tm respectivamente. En total 9 cambios de componentes entre todos los equipos y máquinas.

El día martes con 7 cambios de componentes, el equipo 1 produce 24 tm del sabor pollo y 96 tm del sabor arroz, equipo 2 del componente sabor pollo 120 tm, es decir tanto el equipo 1 y equipo 2 procesa 120 tm cada uno. La máquina 1 es la encargada de procesar los componentes pollo1, pollo3 y cerdo2 por 54 tm, 60 tm y 120 tm respectivamente y la máquina 2 del componente pollo4, 60 tm.

El miércoles el equipo 1 procesa 18 tm de sabor arroz, 18 tm de sabor carne, y 60 tm de sabor a leche, el equipo 2 componentes sabor especial 1 con 24 tm y 60 tm de sabor pescado. La máquina 1 procesa los componentes pollo1 con 18 tm, pollo2 con 60 tm y pollo3 con 90 tm y la máquina 2 los componentes pollo1 con 12 tm, pollo4 con 30 tm y cerdo1 con 60 tm.

El día jueves, el equipo 1 fabrica 36 tm sabor pollo, 36 tm sabor arroz y 12 tm de sabor carne; el equipo 2, 12 tm del componente sabor especial 1, 24 tm de sabor leche, 24 tm de sabor pescado y 12 tm de sabor especial 2. La máquina 2 con los productos pollo1, pollo3, pollo4, cada una con 60 tm y cerdo2 con 30 tm.

El día viernes los componentes sabor pollo, sabor arroz y sabor leche son transformados por el equipo 1 en 72 tm, 24 tm y 12 tm respectivamente. El equipo 2 se encarga de los componentes sabor pollo con 84 tm, sabor pescado 12 tm y, 6 tm del componente sabor especial 2. La máquina 1, procesa los componentes pollo1 con 60 tm, pollo3 con 120 tm y 60 tm de pollo4. La máquina 2, procesa 60 tm del producto cerdo1.

La tabla 4.5 indica las horas utilizadas para el procesamiento de los componentes en los equipos y máquinas en cada día de la semana en estudio, considerando el tiempo de paralización por los cambios de componente.

El equipo 1 el día lunes procesa 72 tm en 16 horas, el equipo 2 en 24 horas 108 tm, la máquina 1 en 10 horas 108 tm y la máquina 2 en 9.5 horas 102 tm.

El día martes el equipo 1 procesa en 24 horas 120 tm, el equipo 2 en 22 horas 120 tm, la maquina 1 en 21 horas 234 tm y la máquina 2 procesa 60 tm en 5.5 horas.

El día miércoles el equipo 1 en 22 horas procesa 96 tm, el equipo 2 en 18 horas 84 tm, la máquina 1 en 15.5 horas 168 tm y la máquina 2 en 10 horas 90 tm.

El día jueves produce el equipo 1 en 20 horas 84 tm, el equipo 2 en 20 horas 72 tm, la máquina 2 en 19.5 horas 210 tm.

El día viernes, el equipo 1 produce en 24 horas 108 tm, el equipo 2 en 23 horas 102 tm, la maquina1 en 21.5 horas 240 tm y la máquina 2 en 5.5 horas 60 tm.

Tabla 4.5. Tiempo por equipo (horas)

Componente	Equipo	lun	ma	mie	jue	vie
sp	e1	9,0	4,0		6,0	12,0
sp	e2	11,0	20,0			14,0
sa	e1		16,0	3,0	6,0	4,0
sa	e2	3,0				
sc	e1	3,0		3,0	2,0	
se1	e2	4,0		4,0	2,0	
sl	e1			10,0		2,0
sl	e2				4,0	
spe	e2			10,0	4,0	2,0
se2	e2				2,0	1,0
p_1	m1		4,5	1,5		5,0
p_1	m2			1,0	5,0	
p_2	m1			5,0		
p_3	m1		5,0	7,5		10,0
p_3	m2	5,0			5,0	
p_4	m1					5,0
p_4	m2	3,5	5,0	2,5	5,0	
c_1	m2			5,0		5,0
c_2	m1		10,0			
c_2	m2				2,5	
c_3	m1	4,5				
c_4	m1	4,5				

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

4.2.3. Producción por empaquetadora

La tabla 4.6 detalla el número de toneladas empaquetadas en diferentes presentaciones de cada uno de los productos.

El día lunes, la empaquetadora 1 procesa la presentación de 15 kg del producto perro1, la empaquetadora 2 procesa la presentación de 20 kg con los productos perro1 y perro3. La ensacadora 2 procesa presentaciones de 40 kg para los productos pollo3, pollo4, cerdo3 y cerdo4.

El día martes se empaquetan 534 tm de producto, distribuidos de la siguiente manera, empaquetadora 2 en presentación de 20 kg un total de 120 tm del producto perro2 y en empaque de 25 kg del producto perro3, 120 tm. Se ensaca balanceado en presentación de 20 kg de los

productos cerdo2, 120 tm y pollo1 54 tm en presentación de 40 kg. La ensacadora 2 con presentación de 40 kg produce 60 tm del producto pollo3 y 60 tm del producto pollo4.

El día miércoles hay mayor variedad de producto empaquetado, en producto gato1 se procesa 60 tm en presentación de 15 kg. En presentación de 20 kg se procesa 30 tm del producto perro3 y 60 tm del producto gato1 y la empaquetadora 3 procesa en presentación de 25 kg, 30 tm de producto perro3. La ensacadora 1 y ensacadora 2 procesan 270 tm entre los productos pollo1, pollo2, pollo3, pollo4 y cerdo1.

El día jueves se empaquetan 2 productos en presentación de 20 kg. 96 tm entre producto perro2 y perro3. En empaque de 25 kg. 60 tm el producto gato2 y, se ensacan 4 productos, pollo1 y cerdo1 en sacos de 20 kg producto pollo3 y pollo4 en presentaciones de 40 kg.

El día viernes en la empaquetadora 2, en presentación de 20 kg se empacan 120 tm del producto perro1 y 60 tm del producto perro2. En la empaquetadora 3 se producen 30 tm del producto gato2 en presentación de 25 kg

La ensacadora 1, procesa en total 120 tm de los productos pollo1 y cerdo1 en presentaciones de 20 kg. La ensacadora 2, en presentaciones de 40 kg procesa 180 tm en total de los productos pollo3 y pollo4.

Tabla 4.6. Producción diaria por empaquetadora

		(TM)					
Producto		lun	ma	mie	jue	vie	Total
p1	emp1	30					30
p1	emp2	60				120	180
p1	emp3	30					30
p2	emp2		120		60	60	240
p2	emp3		120				120
p3	emp2	30		30	36		96
p3	emp3	30		30			60
g1	emp1			60			60
g1	emp2			60			60
g2	emp3				60	30	90
po1	ens1		54	30	60	60	204
po2	ens1			60			60
po3	ens2	60	60	90	60	120	390
po4	ens2	42	60	30	60	60	252
ce1	ens1			60		60	120
ce2	ens1		120		30		150
ce3	ens2	54					54
ce4	ens2	54					54
TOTALES		390	534	450	366	510	2.250

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

La tabla 4.7 demuestra los tiempos que tarda en empaquetar la producción diaria.

El día lunes, la empaquetadora 1 utiliza 3 horas en 30 tm, empaquetadora 2 utiliza 7.5 horas en 90 tm y la empaquetadora 3 en 4.3 horas procesa 60 tm. La ensacadora 2 procesa 210 tm en 4.2 horas.

El día martes, la empaquetadora 2, procesa en 10 horas 120 tm, la empaquetadora 3 en 8.6 horas procesa 120 tm. La ensacadora 1 en 5.8 horas procesa 174 tm de producto en sacos de 20 kg y la ensacadora 2 en 2.4 horas coloca en sacos de 40 kg un total de 120 tm.

El día miércoles, la empaquetadora 1 procesa 60 tm en 6 horas, empaquetadora 2 en 7.5 horas 90 tm, la empaquetadora 3 en 2.1 horas 30 tm. La ensacadora 1 procesa 150 tm en 5 horas y en 2.4 horas la ensacadora 2 procesa 120 tm.

El día jueves, la empaquetadora 2 procesa 96 tm en 8.3 horas, empaquetadora 3 en 4.3 horas produce 60 tm. La ensacadora 1 procesa 90 tm en 3 horas y la ensacadora 2 procesa 120 tm en 2.4 horas.

El viernes, la empaquetadora 2 para presentaciones de 20 kg, procesa en 15 horas 180 tm; la empaquetadora 3 en 2.1 horas, procesa en presentaciones de 25 kg 30 tm. La ensacadora 1, para presentaciones de 20 kg, procesa 120 tm en 4 horas y, la ensacadora 2 procesa 180 tm en 3.6 horas.

Tabla 4.7. Tiempo de empaquetadora (horas)

Componente	Emp.	lun	ma	mie	jue	vie
p1	emp1	3,0				
p1	emp2	5,0				10,0
p1	emp3	2,14				
p2	emp2		10,0		5,0	5,0
p2	emp3		8,6			
p3	emp2	2,5		2,5	3,0	
p3	emp3	2,14		2,1		
g1	emp1			6,0		
g1	emp2			5,0		
g2	emp3				4,3	2,1
po1	ens1		1,8	1,0	2,0	2,0
po2	ens1			2,0		
po3	ens2	1,2	1,2	1,8	1,2	2,4
po4	ens2	0,8	1,2	0,6	1,2	1,2
ce1	ens1			2,0		2,0
ce2	ens1		4,0		1,0	
ce3	ens2	1,1				
ce4	ens2	1,1				

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

4.2.4. Cambios de componentes

La tabla 4.8 detalla el número de cambios diarios de componentes y productos por equipo o máquina según corresponda.

El equipo 1 los días lunes, miércoles y jueves realizará tres cambios de componentes, un cambio el día martes y dos cambios el día viernes.

El equipo 2 los días lunes, martes y miércoles ejecutará dos cambios de componentes y los días jueves y viernes cuatro cambios.

La máquina 1 tiene tres cambios de producto los días lunes, martes y viernes y, cuatro cambios los días miércoles y jueves.

La máquina 2 realiza un cambio de producto los días lunes, martes, miércoles y viernes.

Tabla 4.8. Número de cambios de componentes

Equip/maq	Por día				
	lun	ma	mie	jue	vie
e1	2	2	3	3	3
e2	3	1	2	4	3
m1	2	3	3		3
m2	2	1	3	4	1

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

4.3. Comparación del sistema actual y propuesta de planificación del modelo.

A continuación se comparará el sistema productivo actual con los resultados obtenidos.

4.3.1. Producción de la mezcladora

Para producir la demanda de la semana en estudio, mediante la planificación empírica, que actualmente ocupa la planta, necesitó 115 horas de mezcladora disponible para producción.

El resultado del modelo propuesto indica la capacidad de producir el pedido tipo en 75 horas.

La fila diferencia, de la tabla 4.9, indica los tiempos disponibles de mezcladora para limpiezas y mantenimientos planificados.

Tabla 4.9. Comparación de tiempos mezcladora (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	19	115
Propuesta	13	17,8	15	12,2	17	75
Diferencia	11	6,2	9	11,8	2	40

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

4.3.2. Producción equipos y máquina

Equipos

La producción de la demanda de la semana tipo, mediante la planificación empírica, necesitó 120 horas de equipo 1 y equipo 2 disponibles para producción. El resultado del modelo propuesto indica la capacidad de producir el pedido tipo en 106 y 107 horas respectivamente de cada equipo.

La fila diferencia, de la tabla 4.10 y 4.11, indican los tiempos disponibles de equipos para limpiezas y mantenimientos planificados.

Tabla 4.10. Comparación de tiempos equipo1 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	19	22	22	20	23	106
Diferencia	5	2	2	4	1	14

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Tabla 4.11. Comparación de tiempos equipo 2 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	21	24	18	20	24	107
Diferencia	3	0	6	4	0	13

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Máquinas

Para producir la demanda de la semana en estudio, mediante la planificación empírica, necesitó 120 horas de máquina 1 y máquina 2 disponibles para producción. El resultado del modelo propuesto indica la capacidad de producir el pedido tipo en 97 y 20.5 horas respectivamente de cada máquina.

La fila diferencia, de la tabla 4.12 y 4.13, indican los tiempos disponibles de equipos para limpiezas y mantenimientos planificados.

Tabla 4.12. Comparación de tiempos máquina 1 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	15,5	21	19,5	19,5	21,5	97
Diferencia	8,5	3	4,5	4,5	2,5	23

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Tabla 4.13. Comparación de tiempos máquina 2 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	4	5,5	5,5		5,5	20,5
Diferencia	20	18,5	18,5	24	18,5	99,5

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Empaquetadoras

La producción del pedido de la semana en estudio mediante la planificación empírica, necesitó 120 horas de empaquetadora 1, empaquetadora 2 y empaquetadora 3 disponibles para producción. El resultado del modelo propuesto indica la capacidad de producir el pedido

tipo en 9 horas, 48.3 horas y 21.4 horas respectivamente de cada empaquetadora.

La fila diferencia, de la tabla 4.14, 4.15 y 4.16 indican los tiempos disponibles de equipos para limpiezas y mantenimientos planificados.

Tabla 4.14. Comparación de tiempos empaquetadora 1 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	3,0	0,0	6,0	0,0	0,0	9
Diferencia	21	24	18	24	24	111

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Tabla 4.15. Comparación de tiempos empaquetadora 2 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	7,5	10,0	7,5	8,3	15,0	48,3
Diferencia	16,5	14,0	16,5	15,7	9,0	71,7

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Tabla 4.16. Comparación de tiempos empaquetadora 3 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	4,3	8,6	2,1	4,3	2,1	21,4
Diferencia	19,7	15,4	21,9	19,7	21,9	98,6

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Ensacadoras

La producción del pedido de la semana objeto del modelo, actualmente con planificación empírica, ocupa 120 horas de ensacadoras 1 y ensacadora 2 disponibles para producción. El resultado del modelo propuesto indica la capacidad de producir el pedido tipo en 17,8 horas y 15 horas respectivamente de cada ensacadora.

La fila diferencia, de la tabla 4.17 y 4.18 indican los tiempos disponibles de equipos para mantenimientos planificados y limpiezas.

Tabla 4.17. Comparación de tiempos ensacadora 1 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	0,0	5,8	5,0	3,0	4,0	17,8
Diferencia	24,0	18,2	19,0	21,0	20,0	102,2

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Tabla 4.18. Comparación de tiempos ensacadora 2 (horas)

Descripción	lun	ma	mie	jue	vie	Total
Actual	24	24	24	24	24	120
Propuesta	4,2	2,4	2,4	2,4	3,6	15
Diferencia	19,8	21,6	21,6	21,6	20,4	105

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

4.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite verificar si la capacidad instalada admite cubrir variaciones de la demanda. Considerando los resultados del modelo para el desarrollo del análisis se realiza incrementos de la demanda semanal desde el 2% hasta el 10%.

Para medir la sensibilidad del modelo, solo se puede considerar variaciones en la demanda, no se puede suponer una reducción de los equipos y máquinas ya que tienen una función distinta y complementan el producto final.

Con una mejor administración del tiempo, gracias al modelo, la planta está en condiciones de satisfacer un crecimiento de la demanda semanal hasta un 4%. Incrementos superiores a este porcentaje no es posible cumplir debido a la complejidad de la planta y a los siguientes puntos:

- En la planta de nutrición animal existen 3 niveles de equipos, el nivel intermedio de cada nivel representa un semielaborado.
- Hay variación de velocidades de llenado y desalajo de productos en proceso hasta llegar al producto final.
- La capacidad de almacenamiento de producto en proceso es limitada.

La tabla 4.19 demuestra el número de horas de producción necesarias para cumplir con los incrementos de la demanda semanal, comparada con el número de horas que se requieren para producir la demanda actual una vez incorporado el modelo.

Tabla 4.19. Comparación de tiempos con crecimiento de la demanda

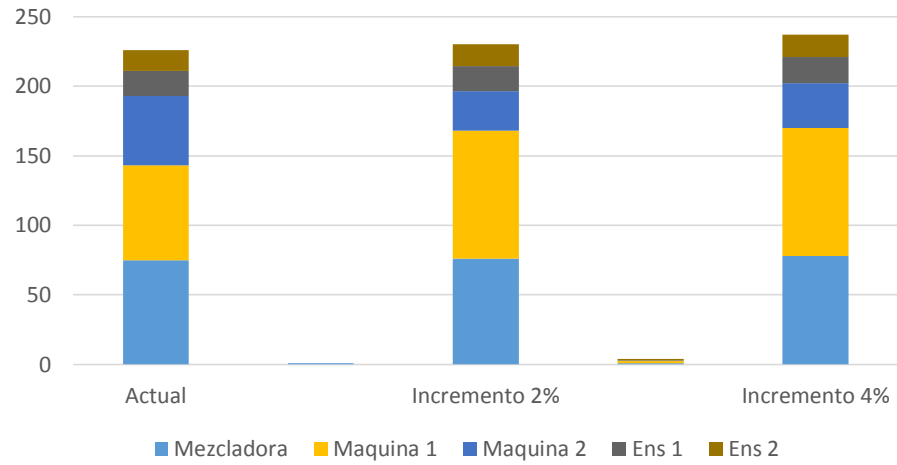
Equipo	Actual	Incrementos				
		1.02%	1.04%	1.06%	1.08%	1.10%
Mezcladora	75	76.2	77.8	No Fac	No Fac	No Fac
Equipo 1	106	106	106	No Fac	No Fac	No Fac
Equipo 2	107	107	107	No Fac	No Fac	No Fac
Maquina 1	68	91.8	92	No Fac	No Fac	No Fac
Maquina 2	50	28.5	32.5	No Fac	No Fac	No Fac
Empa. 1	9	9	9	No Fac	No Fac	No Fac
Empa. 2	48	48	48	No Fac	No Fac	No Fac
Empa. 3	21.4	21.4	21.4	No Fac	No Fac	No Fac
Ens 1	17.8	17.8	18.6	No Fac	No Fac	No Fac
Ens 2	15	15.72	16.2	No Fac	No Fac	No Fac

Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Los equipos y/o máquinas que tuvieron variaciones ante un cambio de la demanda se encuentran representados en el gráfico 4.1. La mezcladora, la máquina 1, ensacadora 1 y ensacadora 2 al incrementarse la demanda requieren un mayor número de horas para cumplir el pedido, sin embargo en la máquina 2 el comportamiento es inverso, a mayor demanda disminuye el número de horas necesarias para producir. Para cumplir con el incremento del 2% de la demanda, requiere de 28.5 horas que corresponde al 57% del tiempo inicial y, con un aumento de la demanda

del 4%, 32.5 horas es decir un 65% del tiempo actual con el modelo. Lo que demuestra que es necesaria la implementación del modelo.

Gráfico 4.1. Variaciones en tiempo de los equipos



Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Una vez finalizado el diseño del modelo matemático y la aplicación en el sistema productivo se concluye lo siguiente:

1. Para mejorar la planificación de la producción de componentes y productos procesados en la planta objeto de estudio, es necesario cambiar la estructura de planificación del sistema productivo actual. La aplicación del modelo matemático desarrollado permite planificar y esquematizar analíticamente la producción de la planta en escenarios óptimos.
2. La respuesta que nos brinda el modelo matemático desarrollado está dentro de los parámetros reales de la planta. Cumple con la demanda tipo solicitada en tiempos razonables, por lo tanto, es aplicable a la situación actual de la planta.
3. Para el cumplimiento de órdenes de producción planificadas con el método actual la planta objeto de estudio necesita el 100% del tiempo de operación de la máquina mezcladora. La respuesta obtenida con el modelo matemático indica la posibilidad de cumplir el total del pedido de producción en un 65.21% del tiempo total disponible para producir, permitiendo inversión de tiempo en limpieza de equipos y mantenimientos preventivos planificados.
4. El equipo 1 y la máquina 2 tuvieron una reducción significativa de los tiempos de producción, gracias al modelo, el equipo 1 ($e1$) procesa los componentes en 83.33% y la máquina 2 ($m2$) en 17.08% del tiempo total disponible para producción, en comparación con la

situación actual que ocupa el 100% del tiempo total disponible para producir.

5. En relación al índice *empaquetadora y ensacadora* la aplicación del modelo disminuye considerablemente el tiempo necesario para el cumplimiento de la producción, la empaquetadora 1 (*emp1*) utiliza el 17.5% y la ensacadora 2 (*ens2*) ocupa el 12.5% del tiempo total disponible para producir, en comparación con la situación actual que ocupa el 100%.
6. La planificación empírica usada en la planta se basa únicamente en que el producto por día sea igual a la capacidad de los bins de producto en proceso y que la suma de los tiempos de producción por equipos no supere las 24 horas. Con la implementación del modelo disminuye el número de horas de producción necesarias para cumplir la demanda semanal, dejando tiempo para mantenimiento y limpiezas programadas y, también se puede cumplir con la producción al incrementar la demanda hasta un 4% semanal.

5.2. Recomendaciones

Para optimizar el sistema productivo se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Es muy importante que se planifique todo el sistema productivo de la planta desde el mínimo componente. La toma de decisiones no se debe basar en elementos empíricos, sino en mecanismos técnicamente sustentados, mediante investigación y estudios profundos. El fin de desarrollar un modelo, es optimizar los recursos invertidos, cumplir los compromisos en el menor tiempo posible y analizar la factibilidad de incrementar la producción por un crecimiento de la demanda.

2. Es vital considerar que la magnitud de la presente investigación, precisa de una inversión relativamente alta, para lo que es necesario se destine valores significativos de dinero para levantar la información primaria. El presente proyecto de tesis fue financiado por el autor, por lo que el diseño del modelo matemático corresponde a un prototipo que define los lineamientos para aprovechar el total del recurso instalado en la planta.

6. Referencias

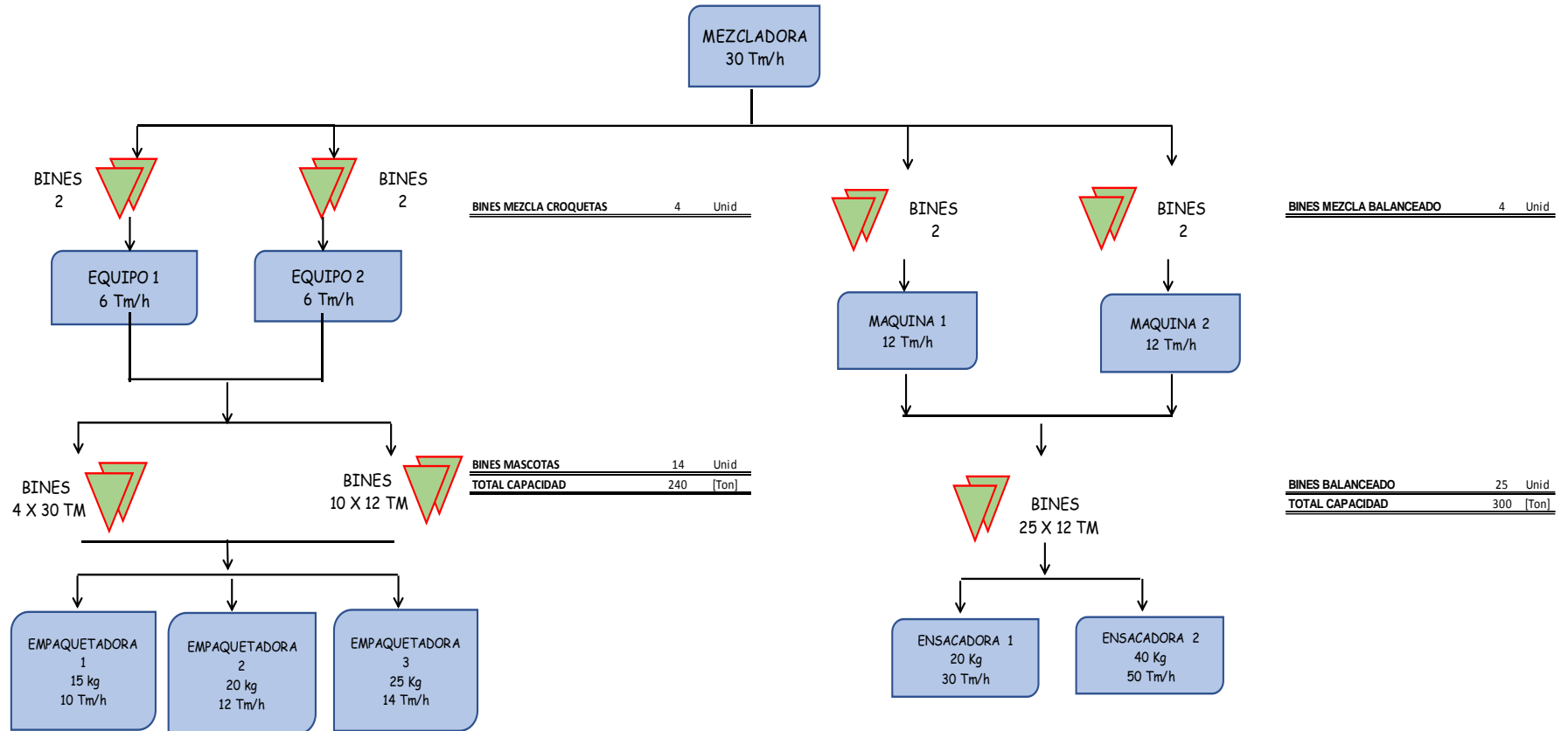
1. Alemán Romero, I., Brito Vallina, M., Fraga Guerra, E., Para García, J., & Arias de Tapia, R. (2011). *Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros*. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
2. Cabrera Rodríguez, S. (s.f.). Aplicación de la programación lineal a la agronomía.
3. Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., Garcia, R., & Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. New York: Wiley.
4. Castillo, E., Conejo, A. J., Pedregal, P., García, R., & Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*.
5. Gamboa Ocampo, J. J., & Tabares Pineda, J. R. (2012). *Diseño de un modelo matemático aplicado a la planeación de la producción y distribución de la Supply Chain de una empresa de consumo masivo*. Santiago de Cali: Universidad ICESI, Facultad de Ingeniería.
6. Goberna, M., Jornet, V., & Puente, R. (2004). *Optimización Lineal Teoría, Métodos y Modelos*. España: McGraw-Hill.
7. Hernandez Sampierio, R., Fernandez Collado, C., & Baptista, M. d. (2014). Metodología de la investigación. México: Mc graw - Hill/Interamericana Editores S.A.
8. Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México: McGraw-Hill.
9. Hossein, A. (sf). <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640a/partVIII.htm>.
10. Izar, J. (1996). Fundamentos de investigación de operaciones para administración. San Luis Potosí, Mexico: Universitaria Potosonia.
11. Luengerger, D., & Ye, Y. (2008). *Linear and Nolinear Programming*. New York: Springer.
12. Manuel, G. (sf). (Significado de modelo).
13. Martín, Q. (2003). *Investigación Operativa*. España: Pearson Educación.
14. Merchante, A. C. (2000). *Descartes*. Obtenido de http://recursostic.educacion.es/descartes/web/Descartes1/Bach_HCS_1/Programacion_lineal/PI_historia.htm

15. Merino, M. (2012). *Técnicas Clásicas de Optimización*. España: UPV/EHU.
16. Narro Ramírez, A. E. (1996). Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisiones. *Política y Cultura*, (6), 183-198. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=267/26700614>
17. Poincaré, J. E. (sf). *Academia*. Obtenido de https://www.academia.edu/29402307/ENSAYO_INVERTIGACION_DE_OPERACIONES
18. Puente, M., & Gavilánez, Ó. (2018). *Programación lineal para la toma de decisiones*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica Chimborazo.
19. RAE. (12 de 1 de 2017). *Real Academia Española*. Obtenido de <http://dle.rae.es/?id=PTk5Wk1>
20. Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Madrid: Universidad Pontificia ICAI.
21. Salazar, J. (Mayo de 2001). *Programación Matemática*. España: Diaz de Santos.
22. Salto, C. (Octubre de 2000). Algoritmos evolutivos avanzados como soporte del proceso productivo. (*Tesis de Maestría*). La Plata, Argentina: Universidad Nacional de la Plata.
23. Sonia, C. (s.f). Aplicación de la programación lineal a la Agronomía. España: Universidad de Castilla - La Mancha.
24. Vitoriano, B. (2010). *Programación Matemática: Modelos de Optimización*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
25. Williams, M., & Ornelas, C. (Febrero de 2007). *Optimización y la Programación Lineal*. n/a: n/a.

7. Apéndices y anexos

Anexo A

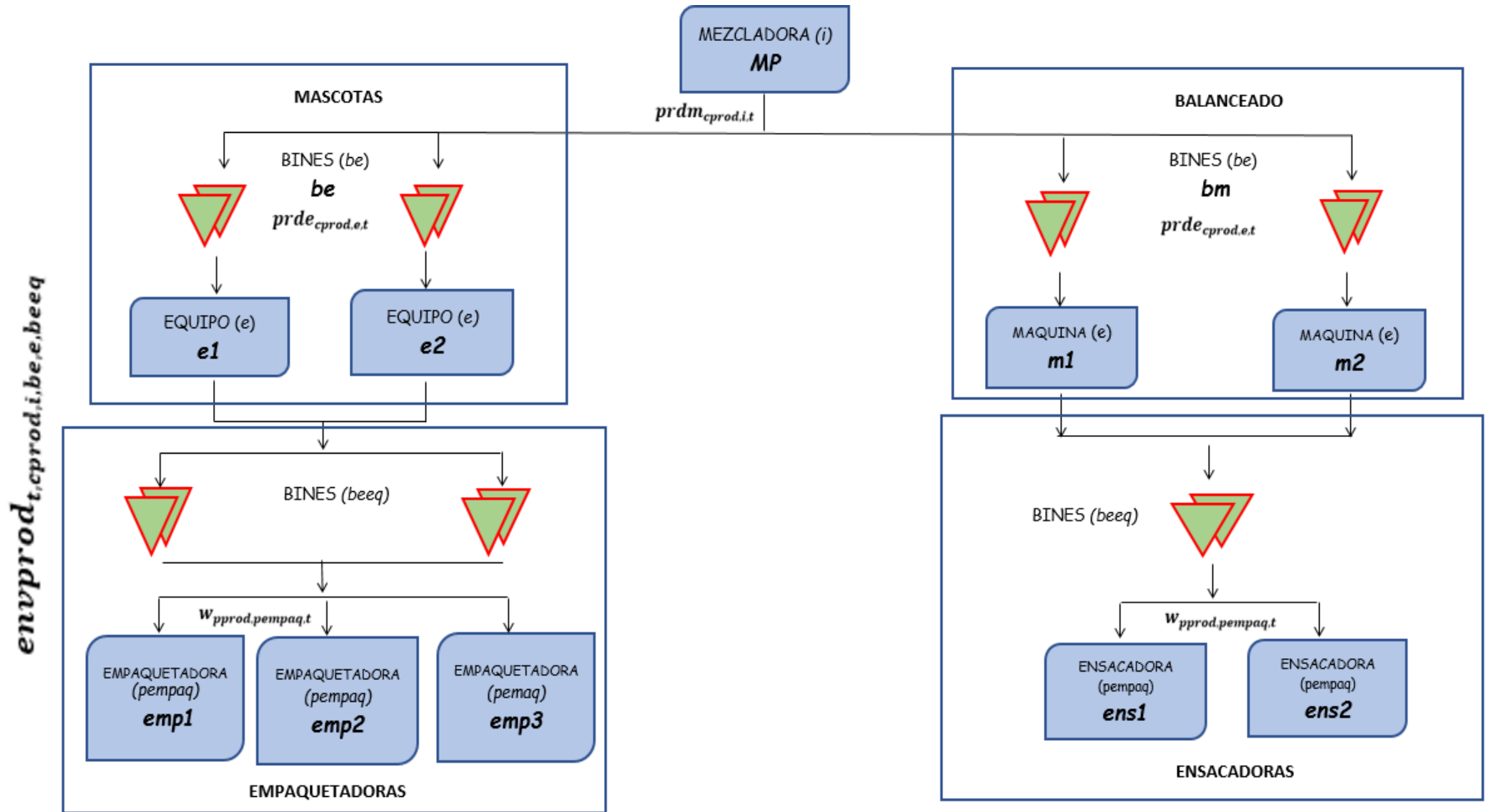
Distribución de la Planta de Procesamiento



Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Anexo B

Diagrama del modelo matemático



Elaborado por: Jorge Renán Zambrano Carrión

Anexo C

Modelo Matemático

*OPTION OPTCR=0.001

**MODELO MATEMATICO DE PRODUCCION
SETS

INDICES QUE NO INTERVIENEN EN LA CATEGORIA

i MEZCLADORA /MP/

t DIAS DE PLANIFICACION /lun,ma,mie,jue,vie/

b_e BINES ANTES DE QUE LLEGUE A LA EXTRUSORA O EQUIPO
/be1*be4,bm1*bm6/

e EQUIPO O MAQUINA /e1,e2,m1,m2/

b_eq BINES DESPUES DEL EQUIPO O MAQUINA
/bee1*bee4,bee11*bee20,bma1*bma25/

p_empaq EMPAQUETADORAS O ENSACADORAS /emp1*emp3,ens1,ens2/

c_prod COMPONENTES MASCOTAS O BALANCEADO
/sp,sa,sc,se1,sl,spe,se2,p_1,p_2,p_3,p_4,c_1,c_2,c_3,c_4/

p_prod PRODUCTOS MASCOTAS O BALANCEADO
/p1,p2,p3,g1,g2,po1,po2,po3,po4,ce1,ce2,ce3,ce4/

p_prod2=copy(p_prod)

ALIAS(p_prod,p_prod2)

ALIAS(p_empaq,p_empaq2)

PARAMETERS

t_cap_b_eq(b_eq) CAPACIDAD DEL LOS BINES B_EQ DONDE C-U GUARDA
SOLO UN COMPONENTE

/

bee1 30

bee2 30

bee3 30

bee4 30

bee11 12

bee12 12

bee13 12

bee14 12

bee15 12

bee16 12

bee17 12

bee18 12
bee19 12
bee20 12
bma1 12
bma2 12
bma3 12
bma4 12
bma5 12
bma6 12
bma7 12
bma8 12
bma9 12
bma10 12
bma11 12
bma12 12
bma13 12
bma14 12
bma15 12
bma16 12
bma17 12
bma18 12
bma19 12
bma20 12
bma21 12
bma22 12
bma23 12
bma24 12
bma25 12
/

t_comp_e(c_prod,e) TABLA DONDE SE INDICA QUE LOS COMPONENTES
PASAN POR CIERTOS EQUIPOS-EXTRUSORA

/
sp.e1 1
sp.e2 1
sa.e1 1
sa.e2 1
sc.e1 1
se1.e2 1
sl.e1 1
sl.e2 1
spe.e2 1
se2.e2 1
p_1.m1 1

p_2.m1 1
p_3.m1 1
p_4.m1 1
c_1.m1 1
c_2.m1 1
c_3.m1 1
c_4.m1 1
p_1.m2 1
p_2.m2 1
p_3.m2 1
p_4.m2 1
c_1.m2 1
c_2.m2 1
c_3.m2 1
c_4.m2 1
/

t_b_e_e(b_e,e) CONEXION DE LOS BINES A LA EQUIPO-MAQUINA
/

be1.e1 1
be2.e1 1
be3.e2 1
be4.e2 1
bm1.m1 1
bm2.m1 1
bm3.m2 1
bm4.m2 1
/

t_e_b_eq(e,b_eq) CONEXION DE LOS EQUIPOS CON LOS BINES B_EQ
/

e1.bee1 1
e1.bee2 1
e1.bee3 1
e1.bee4 1
e1.bee11 1
e1.bee12 1
e1.bee13 1
e1.bee14 1
e1.bee15 1
e1.bee16 1
e1.bee17 1
e1.bee18 1
e1.bee19 1
e1.bee20 1

e2.bee1 1
e2.bee2 1
e2.bee3 1
e2.bee4 1
e2.bee11 1
e2.bee12 1
e2.bee13 1
e2.bee14 1
e2.bee15 1
e2.bee16 1
e2.bee17 1
e2.bee18 1
e2.bee19 1
e2.bee20 1
m1.bma1 1
m1.bma2 1
m1.bma3 1
m1.bma4 1
m1.bma5 1
m1.bma6 1
m1.bma7 1
m1.bma8 1
m1.bma9 1
m1.bma10 1
m1.bma11 1
m1.bma12 1
m1.bma13 1
m1.bma14 1
m1.bma15 1
m1.bma16 1
m1.bma17 1
m1.bma18 1
m1.bma19 1
m1.bma20 1
m1.bma21 1
m1.bma22 1
m1.bma23 1
m1.bma24 1
m1.bma25 1
m2.bma1 1
m2.bma2 1
m2.bma3 1
m2.bma4 1
m2.bma5 1

m2.bma6 1
m2.bma7 1
m2.bma8 1
m2.bma9 1
m2.bma10 1
m2.bma11 1
m2.bma12 1
m2.bma13 1
m2.bma14 1
m2.bma15 1
m2.bma16 1
m2.bma17 1
m2.bma18 1
m2.bma19 1
m2.bma20 1
m2.bma21 1
m2.bma22 1
m2.bma23 1
m2.bma24 1
m2.bma25 1
/

vel_empaq_prod(p_prod,p_empaq) VELOCIDAD DE LA EMPAQUETADORA-
ENSACADORA POR PRODUCTO

/p1.emp1 10
p1.emp2 12
p1.emp3 14
p2.emp2 12
p2.emp3 14
p3.emp2 12
p3.emp3 14
g1.emp1 10
g1.emp2 12
g2.emp2 12
po1.ens1 30
po2.ens1 30
po3.ens2 50
po4.ens2 50
ce1.ens1 30
ce2.ens1 30
ce3.ens2 50
ce4.ens2 50/


```

spe      0.5 0.4
se2      0.2
p_1      1
p_2      1
p_3      1
p_4      1
c_1      1
c_2      1
c_3      1
c_4      1

```

;

TABLE t_comp2(c_prod,p_prod) TABLA BINARIA DE COMPONENTES QUE
CONTIENE POR PRODUCTOS

```

      p1 p2 g1 g2 p3 po1 po2 po3 po4 ce1 ce2 ce3 ce4
sp   1  1
sa      1      1
sc      1
se1     1
sl      1  1
spe     1  1
se2     1
p_1      1
p_2      1
p_3      1
p_4      1
c_1      1
c_2      1
c_3      1
c_4      1

```

;

SCALAR

vel_maq Velocidad diaria de la maquinaria /30/

batch tamaño de batch de la mezcladora /6/

BINARY VARIABLE

b_env(t,c_prod,b_eq) SI EL BIN B_EQ ES LLENADO POR EL COMPONENTE
C_PROD EN EL DIA T

$b_camb_comp(c_prod,t,e)$ DETERMINA SI EL COMPONENTE C PASA POR EL EQUIPO E EN EL TIEMPO T SE OCUPA PARA EL CALCULO DE SETUP

INTEGER VARIABLE

VARIABLES PARA LA CATEGORIA MASCOTAS

$env_prod(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)$ CONEXION DEL DIA t DEL COMPONENTE C_PROD DESDE i -> b_e -> e -> b_eq

VARIABLE

z FUNCION OBJETIVO

POSITIVE VARIABLE

VARIABLES PARA LA CATEGORIA MASCOTAS

$prod_c_prod(c_prod,t)$ PRODUCCION DEL COMPONENTE C_PROD EN EL DIA T

$tiempo_equipo(e,t)$ TIEMPO EN EL EQUIPOS e EN EL DIA T

$tiempo_maquinaria(i,t)$ TIEMPO DE MAQUINARIA i EN EL DIA T

$total_b_e(b_e,t)$ TOTAL DE UNIDADES DE LOS BINES b_e EN EL DIA T POR C_PROD

$total_bin(b_eq,t)$ TOTAL DE UNIDADES AL FINAL DEL DIA DEL BIN EQ

$produccion_equipo(c_prod,e,t)$

$produccion_maquinaria(c_prod,i,t)$

$produccion_empaquetadora(p_prod,p_empa,q,t)$

$cant_comp(e,t)$

EQUATIONS

r0 SE ESTABLECE LA PRODUCCION DIARIA DE CADA COMPONENTE

r1 LA PRODUCCION DE CADA COMPONENTE DEBE SER MAYOR A LA DEMANDA DEL COMPONENTE

r2 TIEMPO DE PROCESAMIENTO DEL EQUIPO E DIARIO

r3 TIEMPO DE EQUIPO E DEBE SER MENOR A 24 HORAS

r6 TIEMPO TOTAL DE MAQUINARIA I DIARIA

r7 TIEMPO DE LA MAQUINA I DEBE SER MENOR A 24 HORAS

r8 CADA BIN ANTES QUE LLEGA A LA EMPAQUETADORA SOLO DEBE CONTENER UN SOLO COMPONENTE

r9 CAPACIDAD DEL BIN ANTES QUE LLEGA A LA EMPAQUETADORA

r10 CONTAR LA CANTIDAD DE COMPONENTES QUE PASARON POR EL EQUIPO

r11 RESTRICCION SOBRE LOS COMPONENTES QUE PASEN POR ESE EQUIPO

r12 TOTAL DE BIN DESPUES DE LA EXTRUSORA
 r13 TOTAL DE LOS BINES ANTES DE LA EXTRUSORA
 r14 CANTIDAD DE C_PROD QUE PRODUCIRA EL EQUIPO E EN EL DIA T
 r15 PRODUCCION DE MAQUINARIA
 r16 PRODUCCION DE EMPAQUETADORA
 r17
 fo FUNCION OBJETIVO ;

r0(c_prod,t)..

$$\text{sum}((i,b_e,e,b_eq), \text{batch} * t_b_e_e(b_e,e) * t_comp_e(c_prod,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) = e = \text{prod_c_prod}(c_prod,t) ;$$
 r1(c_prod,t)..

$$\text{prod_c_prod}(c_prod,t) = g = \text{sum}((p_prod,p_empa), \text{dem_prod}(p_prod,p_empa,t) * t_comp(c_prod,p_prod));$$

r2(e,t)..

$$\text{sum}((i,b_e,b_eq,c_prod), \text{batch} * t_b_e_e(b_e,e) * t_comp_e(c_prod,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) / \text{vel_e_prod}(e) + (\text{setup_e}(e) * (\text{sum}(c_prod, b_camb_comp(c_prod,t,e)))) = e = \text{tiempo_equipo}(e,t);$$
 r3(e,t).. tiempo_equipo(e,t) != 24 ;

r6(i,t)..

$$\text{sum}((b_e,e,b_eq,c_prod), \text{batch} * t_b_e_e(b_e,e) * t_comp_e(c_prod,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) / \text{vel_maq} = e = \text{tiempo_maquinaria}(i,t) ;$$
 r7(i,t).. tiempo_maquinaria(i,t) != 24 ;

CADA BIN DESPUES DE LA EXTRUSORA O EQUIPO DEBE CONTENER UN SOLO COMPONENTE

r8(b_eq,t).. $\text{sum}((c_prod), b_env(t,c_prod,b_eq)) = e = 1;$
 r9(b_eq,t,c_prod).. $\text{sum}((i,b_e,e), \text{batch} * t_comp_e(c_prod,e) * t_b_e_e(b_e,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) = e = t_cap_b_eq(b_eq) * b_env(t,c_prod,b_eq) ;$
 r10(c_prod,e,t)..

$$\text{sum}((i,b_e,b_eq), \text{batch} * t_b_e_e(b_e,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) = e = 1000 * b_camb_comp(c_prod,t,e) ;$$
 r11(c_prod,t,e).. $b_camb_comp(c_prod,t,e) = e = t_comp_e(c_prod,e) ;$

TOTAL DE BINES

r12(b_eq,t).. $\text{total_bin}(b_eq,t) = e = \text{sum}((i,b_e,e,c_prod), \text{batch} * t_b_e_e(b_e,e) * t_comp_e(c_prod,e) * t_e_b_eq(e,b_eq) * \text{env_prod}(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) ;$

r13(b_e,t)..

sum((i,e,b_eq,c_prod),batch*t_b_e_e(b_e,e)*t_comp_e(c_prod,e)*t_e_b_eq(e,b_e
q)*env_prod(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq)) =e= total_b_e(b_e,t);

r14(c_prod,e,t)..

produccion_equipo(c_prod,e,t)=e=sum((i,b_e,b_eq),batch*t_b_e_e(b_e,e)*t_comp
_e(c_prod,e)*t_e_b_eq(e,b_eq)*env_prod(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq));

r15(c_prod,i,t)..

produccion_maquinaria(c_prod,i,t)=e=sum((b_e,e,b_eq),batch*t_b_e_e(b_e,e)*t_c
omp_e(c_prod,e)*t_e_b_eq(e,b_eq)*env_prod(t,c_prod,i,b_e,e,b_eq));

r16(p_prod,p_empaq,t)\$(dem_prod(p_prod,p_empaq,t)>0)..

produccion_empaquetadora(p_prod,p_empaq,t)=e=
sum(c_prod,prod_c_prod(c_prod,t)*t_comp2(c_prod,p_prod)) -
sum((c_prod,p_prod2,p_empaq2)\$(t_comp(c_prod,p_prod)>0 and (not sameas
(p_prod2,p_prod) or not sameas (p_empaq2,p_empaq))),
dem_prod(p_prod2,p_empaq2,t)*t_comp(c_prod,p_prod2)) ;

r17(e,t).. cant_comp(e,t)=e= sum(c_prod,b_camb_comp(c_prod,t,e)) ;

fo.. z =e= sum((c_prod,t,e),setup_e(e)*b_camb_comp(c_prod,t,e)) +
sum((c_prod,t), prod_c_prod(c_prod,t)) -
sum((p_prod,p_empaq),dem_prod(p_prod,p_empaq,t)*t_comp(c_prod,p_prod)));

model presentacion /all/

solve presentacion min z using mip

display tiempo_maquinaria.l,tiempo_equipo.l , prod_c_prod.l ,
produccion_equipo.l, produccion_maquinaria.l , produccion_empaquetadora.l ,
b_camb_comp.l , cant_comp.l

EXECUTE_UNLOAD "resultado_produccion.gdx"

produccion_maquinaria.l,tiempo_maquinaria.l,produccion_equipo.l,tiempo_equipo.
l , cant_comp.l , produccion_empaquetadora.l

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx var=produccion_maquinaria.l
rng=maquinaria!a2:h21'

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx var=tiempo_maquinaria.l
rng=maquinaria!j2:P4'

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx var=produccion_equipo.l
rng=equipo!a2:h24'

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx var=tiempo_equipo.l
rng=equipo!j2:ab24'

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx
var=produccion_empaquetadora.l rng=empaquetadora!a2:G90'

EXECUTE 'gdxxrw.exe resultado_produccion.gdx var=cant_comp.l
rng=Cantidades_componentes_equipo!a2:Z10'