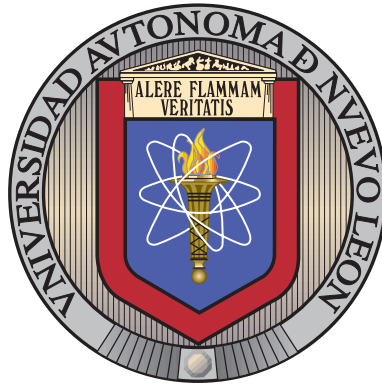


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
PRODUCTOS PERECEDEROS CONSIDERANDO UN
SISTEMA DE DESENSAMBLE.

POR

EDGAR JUVENTINO TREVIÑO RODRÍGUEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

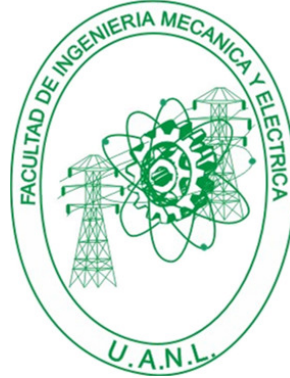
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
PRODUCTOS PERECEDEROS CONSIDERANDO UN
SISTEMA DE DESENSAMBLE.

POR

EDGAR JUVENTINO TREVIÑO RODRÍGUEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2016

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Modelo de optimización para la planificación de la producción de productos perecederos considerando un sistema de desensamble.», realizada por el alumno Edgar Juventino Treviño Rodríguez, con número de matrícula 1466121, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Sara Verónica Rodríguez Sánchez

Asesor

Dr. César Elimilio Villareal Rodríguez

Revisor

Dr. Víctor Manuel Albornoz Sanhueza

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2016

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ix
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. La industria cárnica	1
1.1.1. Comportamiento de la industria cárnica	4
1.1.2. Evolución y desafíos de la industria cárnica	6
1.2. Descripción del problema	7
1.3. Objetivo	8
1.4. Contribución	8
1.5. Importancia	9
1.6. Estructura de la tesis	9
2. Antecedentes	10
2.1. Sector olivícola	10
2.2. Sector Frutícola	11

2.3. Sector Vitivinícola y derivados de la uva	12
2.4. Sector Lácteos y derivados	12
2.5. Sector Acuicultura e Industria del Salmón	13
2.6. Sector de Alimentos procesados	13
2.7. Sector Cárnico	14
2.8. Estructura de la cadena de suministro	15
2.9. Revisión de literatura	16
2.10. Modelo base	18
2.10.1. Función objetivo	18
2.10.2. Restricciones	18
3. Formulación Matemática	21
3.1. Formulación Matemática	21
3.1.1. Conjunto e Índices	22
3.1.2. Variables de decisión	23
3.1.3. Función objetivo	23
3.1.4. Restricciones	24
4. Experimentacion computacional	28
4.1. Datos de entrada	28
4.2. Preprocesamiento	29
4.3. Resultados	30

4.4. Análisis de resultados	34
4.4.1. Primer caso	34
4.4.2. Segundo caso	35
4.4.3. Tercer caso	36
5. Conclusiones y trabajo futuro	37
5.1. Conclusiones	37

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Tabla de nivel de producción mundial. FAO	5
4.1. El rendimiento por producto y patrones de corte esta dando en kilogramos	31
4.2. El tiempo laboral requerido para llevar acabo un patron de corte, dado en segundos.	31
4.3. La demanda en el horizonte de tiempo para los productos frescos de la seccion 3.	32
4.4. Numero de veces que se aplica cada patron de corte sobre el horizonte de tiempo.	33
4.5. Porcentaje de utilizacion de los almacenes para productos congelados	33

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo brindado por el conacyt que gracias a su beca de tiempo completo me fue posible realizar la maestría.

Agradezco a mis padres por su apoyo.

De igual manera agradezco a mi asesora de tesis Dra. Sara Verónica por sus consejos y su apoyo para lograr terminar la tesis.

RESUMEN

Edgar Juventino Treviño Rodríguez.

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
PRODUCTOS PERECEDEROS CONSIDERANDO UN
SISTEMA DE DESENSAMBLE.

Número de páginas: 41.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo principal de esta tesis consiste en estudiar el problema de la planificación de la producción de una planta procesadora de carne integrada dentro de una cadena de abastecimiento. Se propone como modelo de optimización un modelo matemático formulado utilizando programación entera mixta.

La metodología empleada en esta tesis está basada en el método científico. Para abordar la problemática descrita se utiliza como metodología la Programación Lineal Entera Mixta y como algoritmo de resolución Branch and Bound.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La contribución de este trabajo se fundamenta en el desarrollo de un modelo de programación lineal entera mixta. Este modelo pretende apoyar a la toma de decisiones de una planta procesadora de carne.

El modelo ofrece una solución óptima a la planificación de producción para "n" periodos, maximizando la ganancia y minimizando las pérdidas. La solución del modelo es calculada en base a la cantidad de materia prima disponible (cadáveres) y la demanda de cada uno de los productos que pueden ser producidos, por mencionar algunos. La solución indica que patrones de corte pueden ser aplicados a cada carcasa (cadáver) con el fin de generar los productos que mas demanda tienen, y que también generan mas rentabilidad (Cada patrón de corte genera diferentes productos). El modelo considera diferentes restricciones que son muy importantes en la industria, por ejemplo: la capacidad de inventarios limitada, venta de productos frescos o congelados, límite en horas de producción, entre otras.

El modelo fue programado bajo el entorno de IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, de este modo puede realizarse la experimentación y el análisis de los resultados. La ejecución del modelo requiere bajo costo computacional. En cuanto a los resultados obtenidos se puede observar un ahorro considerable en los gastos.

Firma del asesor: _____

Dr. Sara Verónica Rodríguez Sánchez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 LA INDUSTRIA CÁRNICA

A nivel mundial, la carne de cerdo es la más producida en el mundo, alcanzando más de un millón de toneladas anuales, cifra que va en aumento. Según datos de la Food Agriculture Organization, FAO (2014), la unión europea es el principal productor mundial, seguido por China. En el año 2013, México exportó un total de 57.915 Millones de dólares, de los cuales el 9% corresponde al sector de agricultura, fruticultura, ganadería, silvicultura y pesca extractiva, 58% corresponde a minería y un 33% a Industria. El sector agropecuario es el que muestra un mayor crecimiento, de un total de 20,4% comparando el último trimestre de 2013 y 2012. Del total de carnes exportadas por el país, las de porcino representan el 61,5%, seguidas por ave (32,5%), ovina (3,8%) y bovina (2,2%). Para el año 2013, las exportaciones de carne de cerdo fresca, congelada y refrigerada registran un total de 301,8 millones de dólares según cifras del Banco Central (2014). Respecto a producción interna, la carne de cerdo representa un 38% de la producción total de carnes chilenas, llegando a 550.035 toneladas. De este total, el 49% producido fue destinado a exportaciones. Sobre el consumo de carne de la población Mexicana, durante el 2013 el de carne de cerdo fue de 19,4 kilos per cápita y de este total, el 18% de la carne que se consumió fue importada. La carne de cerdo ocupa el tercer lugar en el consumo de carnes, siendo el 25% del total de carnes consumidas. En el 2013 las importaciones de carne de cerdo se duplicaron al comparar con el 2012. Algunos destinos principales de exportación

son Japón, Corea del Sur y China. Particularmente Estados Unidos incrementó sus exportaciones en casi 65 % en relación al año anterior. Las importaciones de carne de cerdo corresponden principalmente a cortes congelados y carne deshuesada, que representan un 55 % y un 38 % respectivamente. Sobre las exportaciones, México sigue siendo un importante proveedor mundial de carne de cerdo, donde los envíos han crecido a un promedio anual de 12,4 % en los últimos 3 años en cantidad y un 11,1 % en valor, concordante con la estrategia exportadora de alimentos de México.

Cabe señalar que México desde hace ya 3 años que se mantiene exportando más del 40 % de lo producido, alcanzando el 2013 al 49 %. En este período los envíos totalizaron los 489.785 MUSD. Japón continúa siendo el principal destino en valor (36 %) seguido por Corea del Sur, Rusia y China. Cabe destacar que los envíos a la República Popular China se han duplicado en un año, representando el 11 % del total exportado, según datos de Asociación gremial de productores de cerdos de Chile (2014). Si estos datos se comparan con los de años previos como 2008 y 2009, podría decirse que este tipo de exportaciones a disminuido. Sin embargo, tomando en cuenta la última crisis financiera y el hecho de que fue un año difícil para los mercados mundiales, donde aumentó el precio de insumos como el petróleo, y se redujo la producción a nivel mundial, ya se vislumbra una mejora en las exportaciones de esta industria. Todos estos datos dejan en claro la importancia y relevancia de este tipo de productos para la economía nacional. A pesar de que la tendencia a consumir y producir más carne va en alza, la cantidad de granjas en el mundo ha disminuido, pero han incrementado su tamaño. Esto se justifica por los avances tecnológicos, el proceso de globalización, los avances científicos y las exigencias de los consumidores. La industria del cerdo en el mundo ha evolucionado de manera muy rápida, creando una necesidad de integración, optimización y planificación en sus procesos. El caso de México no es distinto, y sus principales productores han tenido que estar a la par de estas exigencias, adecuando su estrategia competitiva, teniendo que adaptar sus procesos productivos, pasando desde unidades de procesamiento aisladas a entidades integradas dentro de un marco global. Las empresas a nivel general, no solo en el sector pecuario, han tenido que integrar sus procesos formando redes,

llamadas cadenas de suministro. Esto ha transformando el control de la cadena de suministro en una importante actividad logística. Esta red integra no solo procesos internos, sino que a proveedores, distribuidores, procesadores y comerciantes, ya no compitiendo individualmente, sino actuando de manera colaborativa en la cadena de suministro, haciendo más complejo todo el proceso de planeación. A medida que avanza la integración de los mercados mundiales, los pequeños productores en los países en desarrollo necesitan fortalecer sus vínculos con los demás eslabones de la cadena de suministro, para sobrevivir en un mundo globalizado y en un ambiente cada vez más competitivo. El mayor reto actual para los pequeños productores es mejorar su capacidad de inserción y negociación en el mercado, para agregar valor a sus productos, transformando así su producción de subsistencia en una producción comercial. Los productores deben mejorar su capacidad de gestión para cumplir con los exigentes requisitos del mercado, exigiendo un producto de calidad desde la fase inicial y mejorando el suministro regular y oportuno de los productos que necesitan los distribuidores nacionales e internacionales y el consumidor final. La tendencia actual es que los agricultores, proveedores, procesadores, comerciantes, y distribuidores, compitan no individualmente, sino a través de la cadena de suministro. Es así que, frente al resultado de la globalización y sus consecuentes cambios acelerados, se está llegando a niveles de competencia que conducen a nuevas formas de producción y comercialización, lo cual obliga a modificar sustancialmente los conceptos tradicionales de empresas, contratos, productos o tecnologías nacionales. Más aún, en el contexto de la globalización de los mercados, la marcada competencia e internacionalización, todos los sectores exigen desarrollar planes y acciones que permitan mejorar la competitividad como requisito de la actividad económica, tanto con acciones privadas como por las auspiciadas desde el Estado. Ello conlleva al examen de aspectos antes no analizados, surgiendo así un mayor desarrollo de tecnología y herramientas que soporten la toma de decisiones. La globalización se ha impuesto como uno de los rasgos relevantes de la economía internacional, caracterizado por la convergencia hacia mercados más abiertos y competitivos. La necesidad de alcanzar una economía más competitiva se ha convertido en un requisito indispensable para el crecimiento

y la propia viabilidad de las unidades productivas. La competitividad de la industria pecuaria es un concepto comparativo, fundamentado en la capacidad dinámica de su cadena de suministro, para mantener, ampliar y mejorar de manera continua, su participación en el mercado. Los procesos productivos de la industria pecuaria comprenden desde la gestación de los animales, principalmente ganado vacuno y porcino, hasta la venta de sus productos y subproductos derivados al consumidor final. El proceso posterior a la cría es la engorda de ganado; éste proceso dura hasta que el animal obtenga el peso óptimo. Posteriormente, le sigue el matadero o rastro y es aquí donde el animal es sacrificado y preparado para su procesamiento. El cuerpo del animal sacrificado y sin vísceras se le llama canal. La canal es transportada a la planta empacadora de carnes, dónde se despieza hasta obtener los productos y subproductos que el mercado demanda. Los productos son distribuidos a los supermercados o minoristas dónde finalmente son puestos a disposición del consumidor final.

1.1.1 COMPORTAMIENTO DE LA INDUSTRIA CÁRNICA

En el 2014 la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (Food and Agriculture Organization por sus siglas en inglés) pronosticó un aumento en la producción de carne de 1.1% respecto a la producción del 2014 situándose en 318.8 millones de toneladas. La tendencia para el año 2016 si bien no se tiene una cifra se pronosticó que también tendrá un aumento considerable. Los mayores incrementos se estima que se registraran en los Estados Unidos, la UE, y la Federación Rusia.

La Fundación Heinrich Böll presentó en el año 2013 un estudio sobre el nivel de producción y consumo de la carne en México, titulado "Atlas de la carne".

Algunos de los resultados más importantes vertidos en este documento destacan que la producción más importante de carne a nivel nacional fue la de aves, seguido carne de bovino, porcino, y otros. En el panorama de importaciones e ex-

Tabla 1.1: Tabla de nivel de producción mundial. FAO

	2012	2013 Est.	2014 Est.	2014 a 2015 Est.
	millones de toneladas			%
Balanza mundial				
Producción	304.2	308.5	311.8	1.1
bovino	67	67.7	68	0.5
Carne de ave	105.4	107	108.7	1.6
Carne de cerdo	112.4	114.3	115.5	1.1
Carne de ovino	13.7	13.9	14	0.5
Comercio	29.7	30.9	31.3	1.4
Carne de bovino	8	9.1	9.4	3.5
Carne de ave	13	13.2	13.5	2.4
Carne de cerdo	7.5	7.4	7.2	-2.1
Carne de ovino	0.8	1	1	-3.7

portaciones se muestra que el 89 % de la carne de bovino que se consume en el país es de producción nacional, mientras que el 11 % restante proviene del extranjero. En cuanto a la carne de cerdo el 69 % se produce en México y el 38 % se compra en otro países. La carne de ave el 83 % de su consumo es nacional y el 28 % de importación. Y en el caso específico de los pavos y guajolotes que se consumen aquí, en la mayoría proviene de los Estados Unidos, esto es el 88 %, mientras que el consumo nacional es apenas del 12 %.

1.1.2 EVOLUCIÓN Y DESAFÍOS DE LA INDUSTRIA CÁRNICA

Hacer frente a la creciente competitividad y la constante necesidad de desarrollar herramientas inteligentes para la toma de decisión basado en métodos analíticos.

Los recientes avances tecnológicos han conducido a cambios dramáticos dentro de la industria en general, y los cambios producidos dentro de la industria cárnica son muestra de ello. Entre los cambios más importantes está una fuerte incorporación de la tecnología a los procesos productivos ahí desarrollados, por ejemplo: PDA para el manejo y control de los animales, sistemas de control y monitorización de la cantidad de agua y alimento consumidos diariamente por cada lote de animales, RFD, sistemas de trazabilidad, entre otros. Por otra parte existe una competencia feroz entre los mercados, siendo estos, desafiados por una creciente demanda de exigencias del consumidor en cuanto a seguridad alimentaria, calidad del producto, trazabilidad, entre otros.

Para hacer frente a todos estos cambios, los diferentes eslabones de la cadena, están estableciendo lazos no solo a nivel horizontal si no también verticalmente, integrando y coordinando sus operaciones a lo largo de una cadena de suministro.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La planeación de la producción en una planta procesadora de carne consiste en determinar el número de carcasas a ser procesadas, los niveles de producción de cada uno de los productos ofertados por la empresa provenientes de distintos patrones de corte, estableciendo un equilibrio entre la producción, la capacidad de mano de obra y los almacenes, en busca de lograr una alta competitividad. La planificación de la producción se define los recursos a ser adquiridos (en carcasas), los niveles de producción y el nivel correspondiente inventario por producto. Estas decisiones dependen de la forma de cortar los canales con el fin de satisfacer la demanda de los consumidores. Existen varios patrones de corte en el mercado; cada patrón de corte consiste en un conjunto correspondiente de productos específicos, recompensas y costos de operación. Es posible que diferentes patrones de corte compartan un producto en común, es decir, de un producto específico se pueden obtener a través de diferentes patrones de corte. No obstante, el rendimiento por producto obtenido puede ser diferente y en relación con el patrón de corte. Este problema de forma aislada, podría abordarse a través de datos de análisis, pero en la aplicación práctica, la interacción con la demanda lo hace mucho más difícil de resolver. A nivel operativo el gerente debe tener en cuenta no solo el rendimiento de los productos y la disponibilidad de las carcasas, sino también el comportamiento de la demanda. El comportamiento de la demanda no es constante a través del tiempo, y además, no es homogéneo entre todos los productos de carne de cerdo; cada producto tiene su propio nivel de demanda. Tales cuestiones son particularmente relevantes en problemas de desensamble como el implicado en la producción de carne de cerdo. Un análisis de los datos muestra que en la demanda existe un conjunto de productos (de toda la carcasa) con un gran demanda, mientras que en otra existen productos con muy poca, o incluso sin absolutamente nada de demanda en el mercado. Por lo tanto, la principal dificultad de equilibrar los beneficios entre la demanda y la producción, así como la gestión del inventario de productos perecederos. La principal preocupación en este caso es determinar el número de veces que cada patrón de corte se aplica a

las carcasas disponibles, y los niveles de la producción obtenida para toda la lista de productos. Gran variabilidad, la incertidumbre, el factor perecedero, la gran escala de las operaciones y largos plazos de entrega son algunas cuestiones que la mayoría de los gerentes de la cadena de suministro de carne de cerdo deben enfrentarse a nivel operativo.

1.3 OBJETIVO

El objetivo principal de esta tesis consiste en estudiar el problema de la planificación de la producción de una planta procesadora de carne integrada dentro de una cadena de abastecimiento. Se propone como modelo de optimización un modelo matemático formulado utilizando programación entera mixta.

La metodología empleada en esta tesis está basada en el método científico. Para abordar la problemática descrita se utiliza como metodología la Programación Lineal Entera Mixta y como algoritmo de resolución Branch and Bound.

1.4 CONTRIBUCIÓN

El presente trabajo de tesis aporta un modelo de programación matemática que representa al sistema de producción de una planta procesadora de carne roja a nivel genérico (es decir, de cerdo o res). El modelo que se desarrolla está basado en un enfoque de programación lineal entera mixta, y se diferencia de los principales modelos existentes por distintas consideraciones y características, tales como la consideración de demanda insatisfecha, la modelación del inventario fresco a través de una variable específica, consideración de un horizonte de planeación y al uso de patrones de corte para determinar los rendimientos que entrega cada canal. También se modelan aspectos que integran a este eslabón (planta procesadora) a un contexto de la cadena de suministro, considerando decisiones que son propias del proveedor y el productor, optimizando la producción desde un enfoque más global. Además

de ser un aporte a la literatura científica al considerar características no abordadas por otros autores, el presente modelo puede ser de gran ayuda en la toma de decisiones para los participantes de esta industria, mejorando capacidades de respuesta ante problemas en la producción dada la flexibilidad del modelo a analizar distintos escenarios y a su rápida resolución, dando la posibilidad a los productores hacia el progreso de un sistema de planificación avanzado, usando este modelo como una herramienta más.

1.5 IMPORTANCIA

El desarrollo de un modelo adecuado para satisfacer las necesidades que demanda la industria pecuaria ayudará a incrementar los aún estrechos márgenes de utilidad de este sector. Una mejor planeación de la producción incrementará la competitividad entre las empresas del área y a su vez impulsará un crecimiento económico en la industria alimentaria. Con la aplicación del modelo se espera una disminución de los tiempos para la planificación, un aumento sustancial de la flexibilidad de la programación de la producción, además de proporcionar una sugerencia de producción factible maximizando la utilidad de la producción y reduciendo el inventario.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En la estructura de la tesis tenemos como primer capítulo la introducción, la descripción del problema y la hipótesis. En el capítulo dos, se realiza una descripción detallada del problema. En el capítulo tres, se describe el modelo matemático usado, junto a su función objetivo y restricciones. En el capítulo cuatro se exponen los resultados obtenidos con el modelo y la experimentación computacional. En el capítulo cinco tenemos las conclusiones del problema.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Desde el 2003 la FAO principal organismo de las Naciones Unidas encargado de dirigir las actividades internacionales de lucha contra el hambre, señaló como prioridad principal el implementar estrategias para mejorar la productividad Agrícola. Por su parte, México enmarca a los Alimentos y su Producción como problema Nacional y exhorta a científicos a proponer estrategias que aborden dicha problemática.

La investigación de operaciones (IO) se presenta como una alternativa para abordar el problema. La IO, rama de las matemáticas que consiste en el uso de métodos analíticos para apoyar la toma de decisiones se aplica a una amplia gama de problemas que surgen en diferentes áreas, entre ellas la Industria cárnica.

2.1 SECTOR OLIVÍCOLA

La olivicultura es el cultivo y mejoramiento del olivo. Este sector cuenta con dos productos finales: las aceitunas en conserva y el aceite de oliva. Según el Consejo Olivícola Internacional (COI) se denomina aceituna de mesa al fruto de variedades determinadas de olivo cultivado, sano, adquirido en el estado de madurez adecuado y de calidad tal que, sometido a las preparaciones adecuadas, brinda un producto de consumo además de ser un producto de buena conservación como mercancía comercial. Las principales características de este sector en México son:

- Superficie plantada: 25.000 hectáreas

- Producción: 21.600 toneladas.
- Rendimiento: Alrededor de 12 toneladas por hectárea.
- Exportaciones en 2013: US\$ 46,9 millones.
- Principales destinos de exportación 2013: Estados unidos (36 %), Brasil (26 %) e Italia (9%).

2.2 SECTOR FRUTÍCULA

México es el exportador número uno de fruta fresca del Hemisferio Sur. La fruta es el tercer sector más importante de la economía nacional. También se considera vital para el crecimiento del país como un importante proveedor de empleo e inversión. La industria de la fruta fresca de México está constituida por alrededor de 7.800 productores que trabajan 30.000 hectáreas de tierra cultivada. Actualmente la industria de la fruta chilena exporta más de 60 diferentes especies a más de 100 países alrededor del mundo. Estas impresionantes cifras indican el compromiso de atender las necesidades que el mercado actual exige. México se enorgullece de estar clasificado tanto en el Hemisferio Sur y el mundo como el principal exportador de fruta fresca en una categoría de productos que incluyen la uva de mesa, los arándanos y las ciruelas. Según datos de <http://www.fruitsfromchile.com/esp/industry.php> CITAR. Las principales características de este sector en México son

- Superficie plantada: Superior a las 330 mil hectáreas. La mayor cantidad de frutas plantadas corresponden a uva de mesa, manzanas y aguacate.
- Principales variedades exportadas (en volumen, 2013): uva, manzana, kiwi, aguacate y ciruela.
- Exportaciones en 2013: US\$4.392 millones

- Principales destinos de exportación 2013: Estados Unidos (36,9%), China (11,4%) y Holanda (9,8%).

2.3 SECTOR VITIVINÍCOLA Y DERIVADOS DE LA UVA

Esta industria enmarca todos los productores de vino embotellado a partir de la fermentación de la vid, y otros productos derivados de la uva. La industria vitivinícola en México ha crecido en volúmen y calidad de tal manera que ha llegado a ser el quinto mayor exportador de vinos a nivel mundial. Este crecimiento viene de la mano de la modernización en procesos de producción, aplicación y estandarización de normas internacionales que se enmarcan en el contexto y exigencias de diferentes acuerdos internacionales con países como Estados Unidos, Canadá y Japón entre otros.

- Producción 2013: US\$1.878 millones, por lo que México se ubicó dentro de los cuatro productores de vino más importantes a nivel mundial.
- Exportaciones en 2013: US\$4.392 millones
- Principales destinos de exportación 2013: Estados Unidos (14,5%), Reino Unido (12%), Japón (7,9%) y China (7,6%).

2.4 SECTOR LÁCTEOS Y DERIVADOS

Este sector comprende todos los productores de lácteos y sus respectivos derivados. Las principales características son:

- Producción: 2.675 millones de litros.
- Exportaciones : US\$219,5 millones.

- Principales productos exportados: leche entera, leche condensada y queso.
- Principales destinos de exportación 2013: Chile (24,4%), Emiratos A?rabes (15,2%), China (11,6%) y Brasil (8,8%).

2.5 SECTOR ACUICULTURA E INDUSTRIA DEL SALMÓN

La acuicultura corresponde al conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales. Esta industria comprende todos las firmas relacionadas a la producción de estos bienes. Algunas de sus principales características son:

- La acuicultura chilena está basada en el cultivo de 18 especies, aunque sólo cuatro de ellas (salmónidos) explican sobre el 95% del total cosechado a nivel nacional.
- Exportaciones 2013: US\$4.730,7 millones.
- Principales destinos de exportación (2013): Estados Unidos (26,9%), Japón (21,3%) y Brasil (10,5%).

2.6 SECTOR DE ALIMENTOS PROCESADOS

El sector de alimentos procesados para consumo humano comprende las actividades relacionadas con la elaboración y comercialización de alimentos a partir de materias primas agrícolas, ganaderas y pesqueras.

- Alta tasa de crecimiento de las exportaciones de alimentos procesados en los últimos 10 años: un 234

- México es el primer exportador de manzana deshidratada y pulpa de durazno, el segundo de ciruelas secas y el tercero de pasas y berries congelados a nivel mundial.
- Exportaciones 2013: Frutas procesadas por US\$1.495 millones y carnes procesadas por US\$560 millones.
- Principales destinos de exportación: Chile (12,4%), Ecuador (9,6%) y Perú (7,9%).

2.7 SECTOR CÁRNICO

Esta industria comprende todas las empresas que se enfocan en la producción de carne. En México se faenan y comercializan diversos tipos de carne para consumo humano: pollo, cerdo, vacuno, equino, etc. Por ley, todas las carnes deben faenarse en lugares autorizados para ello (Ley de Carnes no 19.162). A continuación se presentan algunas características generales para esta industria, pero se abordará con más detalle en secciones posteriores dada la relevancia para el trabajo de tesis presentado.

- Producción: 675.000 toneladas de carne de ave, 584.000 toneladas de carne de cerdo y 198.000 toneladas de carne bovina. Concentrado en la zona Centro-Sur del país.
- Exportaciones en 2013: US\$904,9 millones, de los cuales 61,5% fueron carne de cerdo, 32,5% de ave y 2,2% bovina.
- Principales destinos de exportación 2013: Japón (20,8%), Corea del Sur (9,7%), China (8,7%) y Chile (8,5%).

2.8 ESTRUCTURA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

Antes de caracterizar las cadenas de suministro de la industria de la comida fresca, es necesario definir los términos de cadena de suministro (conocida por su nombre en inglés como Supply chain) y la administración de cadenas de suministro, que se denota SCM (Supply Chain Management en inglés). En la industria y en el mundo académico, no hay un consenso sobre la definición más formal de las cadenas de suministro, a pesar de la discusión y trabajo bibliográfico que existe en torno a esta. Existen diversas variaciones y aproximaciones en las definiciones de estos dos términos, realizadas por variados autores. Dentro de los más destacados que se enfocan en investigación en temas de SCM, se pueden mencionar a Kotzab (2000) y Arnold y Warzog (2012). Por otro lado, Ganeshan et al. (1999) se encuentra dentro de los autores que ofrecen una clasificación comprensiva en la investigación concierne a SCM, mostrando la evolución de esta a través del tiempo y clasificándola de acuerdo a las metodologías aplicadas. Cadenas de suministro, en general, pueden definirse como una secuencia de procesos y flujos que tienen lugar dentro y fuera de la empresa y entre diferentes etapas que se combinan para satisfacer las necesidades de los clientes, con el propósito final de mejorar el desempeño a largo plazo de las organizaciones individuales y de la cadena como un todo. Una de las definiciones más acertadas y simples que se encuentran corresponde a la de Ganeshan et al. (1999), definiéndola como un sistema de proveedores, productores, distribuidores, mayoristas y clientes donde el flujo de materiales corre desde los proveedores hasta los clientes y el flujo de información en las dos direcciones.

Según Jack (2002), SCM se define como la planificación integrada, coordinación y control de todo el material e información que fluye a través de la cadena de suministro, para entregar un valor superior al consumidor a un menor costo para la cadena, mientras se satisfacen los requerimientos de todos sus eslabones. Supply chain management podría ser descrito como la cadena que une cada elemento del proceso de fabricación y el suministro de materias primas, terminando con el usuario,

que abarca varios límites de la organización (Scott y Westbrook (1991) , New y Payne (1995)). De acuerdo con esta definición amplia, SCM abarca toda la cadena de valor y se dirige a materiales y gestión de la oferta de la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil. Esta visión de SCM se enfoca en como las compañías utilizan los procesos, tecnología y capacidad de sus proveedores para mejorar sus propias ventajas competitivas (Farley (1997); Lee y Billington (1992). Este manejo o administración de la cadena de suministro, además tiene que estar coordinada con procesos netamente internos de las empresas, como lo son el manejo de inventario, el manejo de los proveedores, administración de la producción, administración de la información, gestión de la tecnología y la gestión de la calidad. (Jacobs, 2003). Las compañías líderes han reconocido e identificado que deben eliminar cualquier tipo de in-eficiencia existente en sus cadenas de suministro, pero todavía existen barreras para la optimización de estas como incompatibilidades tecnológicas, conocimiento inapropiado, falta de liderazgo en la compañía, falta de comunicación, etc.

2.9 REVISIÓN DE LITERATURA

En particular, la decisión de la planificación de las operaciones de fabricación en una planta empacadora de carne ha sido estudiada por varios autores. Para el mejor conocimiento de los autores la mejor contribución fue hecha por [10], quien presentó una formulación de programación lineal para un problema de corte aplicado a la industria cárnica. La característica principal de su formulación es el particionamiento de patrones de corte por secciones en las carcasas, que reduce en gran número la cantidad de patrones de cortes en la formulación. Sin embargo, el modelo se dedicó a efectos de planificación de marketing y por lo tanto, carece de los elementos que apoyan al plan de producción, tales como inventarios, capacidades, demandas y el horizonte de tiempo entre otros.

Un año después [9] se presenta una contribución para el plan de producción de una planta empaquetadora de carne, usando la formulación de Programación Entera

Mixta Multi-Objetivo, sin embargo este modelo no toma en cuenta el hecho que se pueden tener diferentes tipos de carcasas y las variaciones de algunos parámetros. En el año 2006, se presenta un sistema integral de 45 modelos de programación lineal para las operaciones de planeación en un caso real dado por Swift y Company, una planta empaquetadora de carne de res. Varias disertaciones de tesis se han encontrado en la literatura. Por ejemplo, [11] desarrolla técnicas de optimización en línea para determinar qué patrón de corte a utilizar en cada carcasa de acuerdo con ambos atributos de la canal y demanda, pero en un horizonte de tiempo real. El artículo [6] presenta una formulación de programación lineal para maximizar el valor de los productos de cerdo. En el [7] nos encontramos un caso de estudio DEA con algunos parámetros y utiliza un modelo de planificación para estimar los niveles de producción de la carne de cerdo por producto. Mientras que [8] desarrollan un modelo de planificación de la producción para una planta empaquetadora de carne de res, pero sin incluir multi-periodos. Aunque existen diferentes enfoques en la literatura, hay algunas deficiencias que deben tenerse en cuenta, tales como tomar en cuenta los diferentes tipos de carcasa en el plan de producción. El objetivo de esta tesis es presentar un modelo de optimización matemática para apoyar las operaciones de planificación en una planta empacadora de carne. En particular, se formula un modelo de programación entera mixta (MILP) que toma las decisiones que indican con qué frecuencia se aplica un patrón de corte en cada tipo de carcasa, manteniendo el nivel de inventario de acuerdo a restricciones, cumplimiento de la demanda en base penalizaciones, horas hombre disponibles por periodo de tiempo y algunas condiciones impuestas por la demanda, como la frescura del producto.

El objetivo principal de esta tesis es estudiar el problema de una planta empaquetadora de carne. Se propone como método de optimización un modelo matemático, que pertenece a los modelos de programación entera mixta. Para cumplir con el objetivo anterior, se realizaron una serie de tareas como: Revisión bibliográfica para el estudio de problemas similares que ayudarán a comprender mejor el problema, Desarrollo y formulación del problema de programación lineal entera mixta, Experimentación computacional y resultados, Análisis y discusiones de los resultados

obtenidos.

2.10 MODELO BASE

El trabajo presentado en esta tesis parte de un modelo matemático para abordar el problema de planeación de la producción de un planta procesadora de carne.

2.10.1 FUNCIÓN OBJETIVO

$$\begin{aligned} \text{máx} \sum_{i \in P} \sum_{t=1}^T (p_i^f v_{it}^f + p_i^c v_{it}^c) - \sum_{i \in P} \sum_{t=1}^T b^c x_{it}^c - \sum_{i \in P} \sum_{t=1}^T h^c I_{it}^c - \\ \sum_{i \in P} \sum_{t=1}^T \sum_{l=0}^L (h^f l x_{it(t+l)}^f) - \sum_{i \in P} \sum_{t=1}^T (s_i^f u_{it}^f + s_i^c u_{it}^c) - \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (c_j z_{jrt} + c_j^e z_{jrt}^e) \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.10.2 RESTRICCIONES

$$\alpha_r H_t = \sum_{j \in J_k} (z_{jrt} + z_{jrt}^e) \quad t = 1, \dots, T, \forall k \in K, \forall r \in R \quad (2.2)$$

$$\delta H \leq \sum_{t=1}^T H_t \leq H. \quad (2.3)$$

$$x_{it} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J_k} \psi_{ijr} (z_{jrt} + z_{jrt}^e) \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.4)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J} t_j z_{jrt} \leq T_w \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (2.5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J} t_j z_{jrt}^e \leq T_w^e \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (2.6)$$

$$x_{it} = \sum_{l=0}^L x_{it(t+l)}^f + x_{it}^c \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.7)$$

$$v_{it}^f = \sum_{l=0}^L x_{i(t-l)t}^f \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.8)$$

$$v_{it}^c = I_{i(t-1)}^c + x_{i(t-\tau)}^C - I_{it}^c \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.9)$$

$$v_{it}^f + u_{it}^f = d_{it}^f \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.10)$$

$$v_{it}^c + u_{it}^c = d_{it}^c \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (2.11)$$

$$\sum_{i \in P} \left(\sum_{t'=t-\tau}^t x_{it'}^c \right) \leq F^c \quad t = 1, \dots, T. \quad (2.12)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{l=1}^L \sum_{t'=t}^{t-l+|L|-1} x_{i(t-l)(t')}^f \leq W^f \quad t = 1, \dots, T. \quad (2.13)$$

$$\sum_{i \in P} I_{it}^c \leq W^c \quad t = 1, \dots, T. \quad (2.14)$$

La ecuacion 2.1 es la funcion objetivo que maximiza el beneficio del productor.

Las ecuaciones desde 2.2 hasta 2.14 indican las restricciones a las cuales son sometidos el proceso productivo, abarcando desde restricciones de capacidad hasta balances de masa. En este sentido, las ecuaciones 2.2 y 2.3 estan relacionadas con el procesamiento de las carcasas y la flexibilidad que tiene el productor para decidir

la cantidad a ser procesadas. La ecuacion 2.4 hace referencia al proceso de corte de las carcasas. Cada patron de corte aplicado a cada carcasa genera un conjunto de productos con sus respectivos niveles de produccion. Las ecuaciones 2.5 y 2.6 estan relacionadas con las horas de produccion disponibles. La ecuacion 2.7 es para lograr el balance de produccion entre frescos y congelados. La ecuacion 2.8 esta relacionado con la ventas de los productos frescos. La ecuacion 2.9 equilibra el nivel de inventario para productos congelados. Las ecuaciones 2.10 y 2.11 contemplan una variable para demanda insatisfecha. La ecuacion 2.12 asegura que la capacidad del tunel de congelado no sea excedida. Las ecuaciones 2.13 y 2.14 aseguran que los niveles de inventario no sean excedidos para productos frescos y congelados. Las ecuaciones 2.15 y 2.16 hace referencia a la naturaleza de las variables de decisión. Los z_{jt} y z_{jt}^e son variables enteras no negativas para cada $j \in J$ y $t \in T$, mientras que el resto de las variables de decisión son todas continuas y no negativas.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

3.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Esta sección provee una descripción detallada de la formulación matemática desarrollada para apoyar la toma de decisión en relación a la planeación de operaciones de una planta procesadora de carne (PPC).

Primeramente se describirán los conjuntos e índices necesarios para la formulación del modelo. Posteriormente, se presentarán 11 variables de decisión, entre las decisiones más importantes se incluyen el determinar el patrón de corte que será aplicado a cada una de las carcasas, los niveles de producción por producto y sus correspondientes niveles de inventario durante cada periodo de tiempo.

El modelo asume que la empresa puede enfrentar desabastos. Sin embargo, para tener un nivel de servicio aceptable, el desabasto es penalizado en la función objetivo, de tal manera que se minimice lo más posible. Más aún el modelo considera tiempo extra como una flexibilidad para enfrentar la variación de la demanda. Finalmente cabe destacar que se van a manejar dos tipos de presentaciones por cada producto, fresco y congelado. El producto se considera fresco desde que es producido hasta un tiempo límite. El tiempo límite lo determina el productor en base a las características organolépticas del producto; mientras que el producto congelado es aquel que pasa por una etapa de congelación, lo que permite aguantar mucho mas tiempo.

3.1.1 CONJUNTO E ÍNDICES

- T : Horizonte de planeación.
 J : Conjunto de patrones de corte.
 L : Horizonte para considerar algún producto como fresco.
 H : Carcasas disponibles durante el periodo de planificación.
 $k \in K$: Conjunto de secciones.
 $j \in J_k$: Conjunto de patrones de corte por sección k .
 $r \in R$: Conjunto de categorías para la clasificación de carcasas determinado por la calidad.
 $i \in P$: Conjunto de productos.
 α_r : Proporción de carcasas del tipo r .
 ψ_{ijr} : Rendimiento del producto i usando el patrón de corte j sobre el tipo de carcasa r .
 p_i^f : Precio de venta por producto fresco i .
 p_i^c : Precio de venta por producto congelado i .
 c_j : Costo operacional del patrón j .
 c_j^e : Costo operacional del patrón j en tiempo extra.
 b^c : Costo de congelado por kilogramo.
 h^f : Costo de mantener un producto fresco.
 h^c : Costo de mantener un producto congelado.
 s_i^f : Costo de demanda insatisfecha de productos frescos i .
 s_i^c : Costo de demanda insatisfecha de productos congelados i .
 F^c : Capacidad de procesamiento de congelados.
 d_{itl}^f : Demanda de productos frescos i en cada periodo t con una frescura de l días.
 d_{it}^c : Demanda de productos congelados i en cada periodo t .
 τ : Duración del proceso de congelado.
 W^f : Capacidad del almacén externo (en kg.) para productos frescos.
 W^c : Capacidad del almacén externo (en kg) para productos congelados.
 t_j : Tiempo operativo para patrones de corte j .

- T_w : Horas disponibles en tiempo regular.
 T_w^e : Horas disponibles en tiempo extra.
 δ : Parámetro auxiliar para mejor control de las carcacasas.

3.1.2 VARIABLES DE DECISIÓN

- x_{it} : Cantidad total de producto i a ser procesado en el periodo t .
 x_{itl}^f : Cantidad de producto fresco i a ser procesado en el periodo t para ser vendido en el periodo l .
 $x_{it' tl}^f$: Cantidad de producto fresco i que fueron producidos en el periodo t' para vender en t con una frescura l .
 z_{jrt} : Numero de veces que se utilizo el patrón j con el tipo de carcaca r en el periodo t en tiempo regular.
 z_{jrt}^e : Numero de veces que se utilizo el patrón j con el tipo de carcaca r en el periodo t en tiempo extra.
 x_{it}^c : Cantidad de productos congelados i a ser procesados en el periodo t .
 v_{itl}^f : Cantidad de productos frescos i a ser vendidos en el periodo t con una frescura l .
 $v_{it' tl}^f$: Cantidad de productos frescos i que fueron producidos en t' para vender en t con una frescura l .
 v_{it}^c : Cantidad de productos congelados i a ser vendidos en el periodo t .
 I_{it}^c : Cantidad de productos congelados i para ser almacenado t .
 u_{itl}^f : Cantidad de demanda insatisfecha del producto fresco i en el periodo t con una frescura l .
 u_{it}^c : Cantidad de demanda insatisfecha del producto congelado i en el periodo t .
 H_t : Numero de carcacasas a ser procesadas en el periodo t .

3.1.3 FUNCIÓN OBJETIVO

$$\begin{aligned}
 \text{máx} \quad & \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} p_i^f v_{itl}^f + \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} p_i^c v_{it}^c - \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} b^c x_{it}^c - \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} h^c I_{it}^c \quad (3.1) \\
 & - \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} \sum_{t'=t-L}^t \sum_{l \in L} l h^c x_{it' tl}^f - \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} s_i^c u_{it}^c - \sum_{i \in P} \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} s_i^f u_{itl}^f \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (c_j z_{jrt} + c_j^e z_{jrt}^e)
 \end{aligned}$$

3.1.4 RESTRICCIONES

$$\alpha_r H_t = \sum_{j \in J_k} (z_{jrt} + z_{jrt}^e) \quad t = 1, \dots, T, \forall k \in K, \forall r \in R \quad (3.2)$$

$$\delta H \leq \sum_{t=1}^T H_t \leq H. \quad (3.3)$$

$$x_{it} = \sum_{r \in R} \sum_{j \in J_k} \psi_{ijr} (z_{jrt} + z_{jrt}^e) \quad \forall i \in P, t = 1, \dots, T. \quad (3.4)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J_k} t_j z_{jrt} \leq T_w \quad \forall k \in K, \forall t = 1 \dots T \quad (3.5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in J_k} t_j z_{jrt}^e \leq T_w^e \quad \forall k \in K, \forall t = 1, \dots, T \quad (3.6)$$

$$x_{it} = \sum_{l \in L} \sum_{v=1}^L (x_{it'vl}) + x_{it}^c \quad \forall i \in P, \forall t = 1, \dots, T \quad (3.7)$$

$$v_{itl}^f = \sum_{v=0}^l x_{i(t-v)vl} \quad \forall i \in P, \forall t = 1 \dots T, \forall l = 0 \dots L \quad (3.8)$$

$$v_{it}^c = I_{i(t-1)}^c + x_{i(t-\tau)}^c - I_{it} \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (3.9)$$

$$d_{itl}^f = v_{itl}^f + u_{itl}^c \quad \forall i \in P, \forall f \in T, \forall l = 0 \dots L \quad (3.10)$$

$$d_{it}^c = v_{it}^c + u_{it}^c \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (3.11)$$

$$d_{it}^c = v_{it}^c + u_{it}^c \quad \forall i \in P, \forall t \in T \quad (3.12)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{t'=t-\tau} \leq F^c \quad \forall t = 0 \dots T \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{t'=t-l}^t \sum_{l=0 \in L} x_{it'l} \leq W^f \quad \forall t \in T \quad (3.14)$$

$$\sum_{i \in P} I_{it}^c \leq W^c \quad \forall t = 0 \dots T \quad (3.15)$$

La función objetivo 3.1 consistirá en maximizar la ganancia neta del productor, la cual contempla los ingresos obtenidos por la venta de productos frescos y congelados, menos los costos involucrados del proceso operativo entre los cuales están; los costos de almacenamiento, mano de obra, congelado y costos de demanda insatisfecha.

La ecuación 3.2 está relacionada con el procesamiento de las carcasas. La parte izquierda determina la cantidad de carcasas procesadas por cada periodo de tiempo. La parte derecha indicara el conjunto de patrones de corte utilizados en las secciones. Esta ecuación permite balancear el número de carcasas procesadas con el conjunto de secciones obtenidas independientemente del patrón de corte aplicado.

La ecuación 3.3 está relacionada con la flexibilidad que tiene el productor para poder decidir el número de carcasas a procesar en cada periodo de tiempo. El número

de carcasas a ser procesadas en cada periodo es una variable de decision. Sin embargo, está ecuacion restringe su valor en un intervalo. El límite inferior corresponderá al mínimo de carcasas procesadas necesarias para amortizar los costos operativos, mientras que el limite superior corresponderá al total de carcasas disponibles durante todo el periodo.

La ecuación 3.4 hace referencia al proceso de corte de la planta procesadora de carne, en el cual, cada carcasa es particionada por secciones y a cada seccion se le aplica un patrón de corte para así obtener un conjunto de productos con sus respectivos niveles de produccion. Esto es posible porque cada patrón de corte esta definido por una combinacion de productos con sus respectivos rendimientos.

Las ecuaciones 3.5 y 3.6 hacen referencia a las horas laborales disponibles. La ecuación 3.5 asegura que el tiempo necesario para procesar las carcasas por periodo de tiempo no exeda el total disponible en tiempo normal, mientras que la ecuacion 3.6 lo verifica en tiempo extra.

La ecuación 3.7 es utilizada para garantizar el balance en produccion entre productos frescos y congelados. Esta restricción determina la cantidad de producto a ser congelado y la cantidad a ser mantenido en fresco para ser vendido en los siguientes periodos.

La industria de la carne trabaja con productos perecederos sujetos al deterioro. Cada producto obtenido se puede vender en su presentación de producto fresco o congelado. Un producto se concidera fresco si es vendido dentro de un determinado numero de dias apartir de su producción. En esta restricción este periodo es representado por L . Todo producto que no es posicionado para su venta en fresco se envía a congelado. Los productos congelados se pueden mantener en almacén por periodos mayores, por ejemplo hasta por dos años. Sin embargo, el beneficio de la venta de los productos congelados es conciderablemente menor que los productos frescos.

La ecuación 3.8 define la cantidad de producto a ser vendido en el periodo t , proveniente de la produccion desde $t - l$ hasta t .

La ecuación 3.9 equilibra el equilibra el nivel de inventario de productos congelados para cada periodo. Los productos frescos necesitan estar al menos 2 días en el tunel de congelación, para ser conciderados congelados.

La ecuación 3.10 asegura que la cantidad de producto fresco faltante para satisfacer la demanda se asigne a una variable de demanda insatisfecha, la cual es penalizada en la funcion objetivo. Lo mismo sucede en la ecuacion 3.11 pero para productos congelados.

Los productos frescos necesitan ser procesados durante τ periodos con el fin de congelarlos. La ecuación 3.12 asegura que la capacidad de este proceso no se exceda.

La ecuacion 3.13 asegura que la capacidad de almacenamiento de productos frescos no sea excedida. Lo mismo indica en la ecuación 3.14 pero para productos congelados.

Las ecuaciones 3.15 y 3.16 hace referencia a la naturaleza de las variables de decisión. Los z_{jt} y z_{jt}^e son variables enteras no negativas para cada $j \in J$ y $t \in T$, mientras que el resto de las variables de decisión son todas continuas y no negativas.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACION COMPUTACIONAL

4.1 DATOS DE ENTRADA

Se cuenta con informacion historica de una semana de operacion de una empresa carnica localizada en Nuevo León.

La información cuenta con diferentes secciones, en la primera se encuentra la matriz de rendimientos por producto en kilogramos y porcentaje. Las diferentes secciones que pueden ser obtenidas de un producto son: la pieza, hueso, recorte, sebo y desebrada.

La segunda seccion hace referencia a la catidad de cada producto en kilogramos a ser vendidos en ese periodo.

La tercera seccion son los pedidos. Los pedidos es la demanda conocida para la semana y es mostrada en una tabla. La informacion contenida es la clave del pedido, el producto, la cantidad de cajas, kilogramos y piezas; además del día en que deben ser entregados.

La cuarta seccion es la produccion de la semana. Es una tabla con la cantidad de productos a producir durante la semana, los datos manejados es el día, la clave, el producto y la cantidad.

La quinta seccion se cuenta con un árbol de despiece donde cada nivel de corte esta separado en diversas columnas de tal forma que, se puede saber cuales son los

productos padres y productos hijos (entendiendo como producto hijo, aquél que es generado por un producto padre).

La sexta sección es una tabla de tiempos de producción ocupados para producir cada uno de los productos.

La séptima y ultima sección se llama recepción, es una tabla que cuenta con las fechas y cantidad de materia prima (canales) que será recibida durante el periodo.

4.2 PREPROCESAMIENTO

La información proporcionada no es compatible con la entrada del modelo, fue necesario realizar un script para realizar un ajuste a los datos.

En la información dada por la empresa se muestra un árbol de despiece de la canal, cada producto que puede ser producido, puede generar otros productos (llamados hijos), y a su vez pueden generar otros hijos. La problemática consiste en encontrar todas las posibles combinaciones en que puedo cortar la canal, con sus posibles productos resultantes. La matriz resultante es llamada "Matriz de patrones de corte". La anterior matriz mencionada cuenta con mas de 2 mil diferentes patrones. Elaborarla a mano se vuelve muy tedioso y tardado.

Por la problemática mencionada anterior mente se desarrollo un script en Python que permite obtener la matriz de patrones de corte de manera instantánea. El algoritmo es muy eficiente ya que evita realizar combinaciones in factibles reduciendo considerablemente el tiempo de ejecución.

El parámetro del script es una matriz de adyacencia donde se especifican las conexiones en el árbol de despiece (Las conexiones es: que producto produce que producto). Ver ejemplo.

4.3 RESULTADOS

En esta sección un caso de estudio es presentado para ilustrar la factibilidad y ventajas del modelo de optimización propuesto. Los parámetros básicos tales como precios, costos, y capacidades de almacenamiento fueron tomados de la información existente de base de datos y de literatura obtenida a partir de diferentes productores. Mientras que la información de las operaciones como patrones de corte y demandas fueron obtenidas a partir de una empresa read. Diversos países usan diferentes patrones de corte acorde a su historia y cultura gastronómica. El presente caso de estudio, como ya se mencionó antes usa los patrones de corte empleados en una empresa procesadora de carne de res en México.

El estudio de caso representa un lote de cerdos de engorde que llegan todos los días a la planta de envasado de carne para el matadero y posteriormente procesado como cadáveres. Se asume que la cantidad disponible de las canales durante todo el horizonte es fija y conocida. La cantidad total de canales disponibles en el horizonte de tiempo se estableció en 2825. La matriz de rendimiento de un cadáver por producto, la sección y el patrón de corte se obtuvo de las líneas de producción (en kg). La Tabla 1 presenta la matriz de rendimiento utilizado para la sección 3. Dado que la matriz de rendimiento dependerá de las condiciones de cultivo, líneas de cría, alimentación, programas de gestión, peso de la canal, podrá existe variaciones grandes y naturales entre el rendimiento obtenido por cada cadáver procesado. Sin embargo, para el estudio propone que se supone que la finca mantiene un programa de mejoramiento general que permita suministrar un lote de cerdos homogéneos, los cuales canales se ponderación alrededor de 63 kg (cabeza, la lengua, manitas, y no se consideran en el peso de la canal). La matriz de rendimiento a partir de la Tabla 1 muestra claramente que algunos productos se obtienen de diferentes patrones de corte, por ejemplo el producto 19 se puede obtener del patrón de 9, 11, o 12 de corte, pero el rendimiento por producto obtenido de cada patrón de corte es diferente (7,65, 7,80 y 5,40 respectivamente). Por otra parte, existen otros productos que son

exclusivos para un patrón de corte específica, por ejemplo ven patrón de 10, 24 y 25 productos) cortar.

Tabla 4.1: El rendimiento por producto y patrones de corte esta dando en kilogramos

SECTION 3		PRODUCTS									
PATTERNS	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
8	11.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	7.65	1.44	0.29	0.43	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.23	3.90	0.00	0.00	0.00
11	0.00	7.80	1.91	0.29	0.00	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.57	1.97	1.19

La capacidad de trabajo es considerado como 8 horas al día en tiempo normal, y 3 horas por día en horas extras. Para llevar a cabo cada patrón de corte se requiere una cantidad específica de tiempo de trabajo. La Tabla 2 presenta el conjunto de patrones de corte aplicadas a la sección 3 y el tiempo de trabajo correspondiente requiere para realizarlas. Se observa algunos patrones de corte requieren la misma cantidad de tiempo de trabajo (véase el patrón de corte 11 y 12), mientras que otros requieren la mitad del tiempo (véase el patrón de corte 8).

Tabla 4.2: El tiempo laboral requerido para llevar acabo un patron de corte, dado en segundos.

PATTERNS	8	9	10	11	12
TIME	12	28	16	24	24

Los productos del cerdo pueden ser vendidos frescos o congelados. Una vez que un canal se procesa todos los productos obtenidos se consideran fresco, y dependiendo de la demanda de algunos productos se envían directamente al proceso de congelación, y otros para el inventario para la venta posterior. La vida útil de los productos frescos se establece en $L=3$ días, mientras que el proceso de congelación tarda $\tau = 2$ días. La demanda de productos frescos y congelados se supone que se conoce sobre el horizonte de tiempo. Por ejemplo, la tabla 3 se presenta la demanda

a lo largo horizonte temporal para los productos frescos de la sección 3. Se observa la demanda no es homogénea a lo largo del tiempo y entre los productos.

Tabla 4.3: La demanda en el horizonte de tiempo para los productos frescos de la seccion 3.

PRODUCT	HORIZON PERIOD									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	799	467	677	3453	345	765	452	658	1324	234
19	346	5743	7657	3452	6256	3562	253	3567	355	243
20	36	63	678	442	564	341	556	34	155	254
21	43	11	23	53	85	24	78	90	34	63
22	735	89	45	244	534	256	789	323	24	4234
23	645	0	95	345	657	35	645	3646	67	465
24	256	4641	5731	0	7869	66	2346	446	44	674
25	345	673	434	4545	246	234	665	785	764	345
26	566	5536	567	345	123	546	0	0	546	123
27	234	212	0	435	24	131	256	123	233	231
28	245	345	234	5356	345	2345	3452	445	245	525

La instancia resuelto considerado 10 períodos de planificación, esto resulta en un modelo con 6601 variables a partir de los cuales 1.750 son enteros, y 3155 restricciones.

Los resultados del estudio de caso muestra un beneficio neto de \$321.802,85 dólares, las ventas por \$402288.81 dólares y costo operativo por \$80485.96 dólares. Con el fin de ver las ventajas del modelo, los resultados se comparan con la toma de decisiones de la empresa véase la Tabla 4.

El modelo obtiene 8 % más ganancias que la obtenida por la empresa. También, puede ser en cuenta que el modelo de tomar un mejor aprovechamiento de los recursos que la empresa. Esto se ve en la Tabla 5. La cantidad de inventario de los productos congelados es más grande para la compañía, ya que los productos frescos obtenidos no satisfacer la demanda, y la necesidad de ser congelados. Además, el porcentaje

Tabla 4.4: Numero de veces que se aplica cada patron de corte sobre el horizonte de tiempo.

	MODEL					COMPANY				
SECCION 1	P1	P2	P3	P4		P1	P2	P3	P4	
	269	878	509	1169		269	979	642	935	
SECCION 2	P5	P6	P7			P5	P6	P7		
	1085	1740	0			839	1556	430		
SECCION 3	P8	P9	P10	P11	P12	P8	P9	P10	P11	P12
	788	0	1909	128	0	788	215	1194	278	350
SECCION 4	P13	P14	P15			P13	P14	P15		
	2000	825	0			1650	915	260		
SECCION 5	P16	P17				P16	P17			
	1920	905				1990	835			

de utilización de la capacidad de trabajo en tiempo normal es mayor para el modelo (80 %) que para la empresa (77 %), mientras que el porcentaje de uso de en el tiempo es mayor para la empresa (31 %) , que el modelo (23 %). Los resultados obtenidos están directamente relacionados con la forma y el tiempo el gestor de decidir cómo cortar hasta las canales.

Tabla 4.5: Porcentaje de utilizacion de los almacenes para productos congelados

	PERIOD									
OUTPUT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MODEL	0	11	18	23	36	45	48	50	41	41
COMPANY	0	23	37	45	71	90	95	98	81	80

Todos los casos descritos en los resultados de cálculo se aplican y se resuelven usando un PC con Windows 7, i5-3210M CPU @ 2,5 GHz y 8 GB de RAM, y el paquete de software de optimización de IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6. El tiempo de cálculo necesario para resolver el problema en todos los casos en los que menos de 2 min.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de haber presentado los distintos resultados obtenidos en cada caso de estudio, en esta sección se procede a analizarlos y comentarlos.

4.4.1 PRIMER CASO

Los resultados para el primer caso muestran cómo varía la función objetivo con respecto a la instancia C, que se consideró como base al ser una carcasa de calidad media, la más común en esta industria. Se visualiza en la tabla 5.3 que el valor óptimo para la función objetivo del modelo descrita, tiene variaciones al cambiar la calidad de estas. El caso más favorable para la planta de despiece corresponde a la instancia A, al ser provistos con sólo carcasas de alta calidad. En este caso, la utilidad del productor puede aumentar hasta en un 2,5%. El caso menos favorable corresponde a la instancia E, donde la calidad de las carcasas es la más desfavorable posible, teniendo un alto contenido de grasa, produciendo una disminución poco favorable al productor, correspondiente a un -7,0%. Estos cambios en la función objetivo se deben principalmente a que al poseer sólo un tipo de carcasa en cada caso, la demanda insatisfecha de productos penaliza en gran parte al productor. Las carcasas con mejor calidad, al tener un menor contenido de grasa, pueden dar origen a productos de mejor calidad que por lo general son los que generan gran parte del ingreso, y poseen una penalización mayor al no cumplir con los pedidos, explicando el cambio de un 2,5% positivo en la función. Además, las carcasas de peor calidad, tienen como derivado un subproducto llamado trimming (corresponde a trozos de carne provenientes de los cortes del cerdo, con mayor porcentaje de carne que grasa, sin hematomas, cartílagos, cuero, ni pelos) que a pesar de que existe una demanda, es un subproducto que no se desea tener dado el bajo ingreso que representa. Es por eso que en los peores casos, se vende más trimming y se deja más demanda insatisfecha de productos de mayor calidad, como el entrecot y el filete, presentes en los patrones de corte en todas sus formas, pero en una menor proporción debido a la

mayor existencia de grasa en los peores casos. Por otro lado, además de la demanda insatisfecha, los cambios en la función objetivo se explican por una leve baja en el uso de las instalaciones y mano de obra. Esto se justifica debido a que, al existir carcacas con mayor cantidad de grasa, por lo general, los tiempos de operación de corte de esta materia prima son mayores. En estas instancias se realizan en promedio tantos cortes como carcacas multiplicados por el número de secciones, es decir, si se está trabajando con 300 carcacas y cada una tiene 5 secciones, en promedio, en cada día de trabajo se producirán unos 1500 patrones de corte, siendo el tiempo que se demora

4.4.2 SEGUNDO CASO

El segundo caso, como se describió anteriormente, corresponde a la mezcla en la calidad de las carcacas, existiendo una distribución para cada instancia. En este experimento se comprueban los resultados obtenidos en el primero, pero el impacto no es tan drástico y esta suavizado al existir distintos tipos de carcaca. Como se mencionó en los comentarios del 1er caso, el trimming es un producto indeseado, pero de todas maneras existe una demanda que debe ser cumplida, dándole un uso específico a las carcacas de baja calidad, y pudiendo así de igual forma cumplir con la demanda de productos de alta utilidad al contar con carcacas con menos grasa. Los resultados en el uso de bodegas y nivel de servicio son parecidos al 1er caso, existiendo una alta utilización de planta para la instancia I, al ser la que cuenta con una distribución equitativa de carcacas de tipo A,B,C, D y E.

4.4.3 TERCER CASO

Esta instancia corresponde al modelo modificado con la variable H_{rt} y distintas combinaciones en la calidad de materia prima. Todas las distribuciones presentadas en 5.7 representan un caso real. Igual que en los casos anteriores, desea conocerse que impacto tiene el recibimiento de carcasas heterogéneas en la utilidad final del productor. En la tabla 5.8 se muestran los resultados obtenidos y el impacto que esto genera en la función objetivo. Al ver los valores óptimos alcanzados, es fácil darse cuenta que estos son más elevados que en los casos anteriores. Esto se debe principalmente a dos cosas. Primero, a la distribución de las carcasas usadas, y segundo a la flexibilidad que se tiene al poder pedirse la materia prima. En los casos anteriores el modelo estaba forzado a procesar todas las carcasas que le llegaban, procesando todos los productos posibles y alcanzando un nivel sub-óptimo de producción, al ser la demanda total levemente menor a la capacidad de producción de la planta, obligando a ocupar horas extras y a satisfacer demandas de productos que generan una menor utilidad. En el cuadro 5.8 se aprecia que el peak de la función objetivo se alcanza en la instancia 1, correspondiente a sólo existencia de carcasas de la mejor calidad, como es esperado y como resultó ser en los casos anteriores. Al ser las distribuciones parejas, el nivel de servicio se mantiene casi constante a través de todas las corridas, pero también teniendo su peak en la ya mencionada instancia 1. Con respecto a los valores de H , se muestra la suma total de carcasas utilizadas durante el periodo, siendo en todos los casos menor al caso en que éstas se mantuvieron de manera fija, mostrando como una política de flexibilidad en los pedidos podría ser aprovechada por este tipo de plantas procesadoras, asegurando a su vez un mínimo a pedir a las granjas de engorda.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

En esta tesis se propuso un modelo de programación entera mixta para la planeación de la producción en la industria cárnica. Este modelo considera aspectos como los patrones de corte por sección, multi-productos, un horizonte de planeación finito, productos perecederos, productos frescos y congelados, costos operacionales en horas normales y tiempos extras para los patrones de corte que son aplicados a las carcasas. La cantidad de carcasas a procesar también es una variable de decisión teniendo un límite inferior y superior. El límite inferior de carcasas a ser procesadas es para cubrir el costo operativo.

El resultado explicado en secciones anteriores muestra que la formulación del modelo es altamente aplicable con una resolución de tiempos muy baja (todas las instancias son resueltas en menos de un minuto con un gap de 0.05) y dada la gran cantidad de información para la toma de decisiones. Sin embargo, para grandes instancias, por ejemplo una donde genere un horizonte de tiempo tan grande como el de un mes, y considerando más productos y patrones de corte, el modelo crecerá sustancialmente y no podría ser resuelto de manera exacta. Tendrían que usarse métodos como Branch and bound.

La investigación futura en esta área podría ser desarrollar instancias más grandes y complejas que representan una mejor las planeacion de una empresa procesa-

dora de carne.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AHUMADA, O. y J. VILLALOBOS, «Application of planning models in the agri-food supply chain: A review.», *Eur J Oper Res*, **1(2)**, págs. 1–20, 2009.
- [2] BAZARAA, M. S., J. J. JARVIS y H. D. SHERALI, *Programación lineal y flujo en redes*, segunda edición, Limusa, México, DF, 2004.
- [3] BIXBY, D. B., A. y M. SELF, «A Scheduling and Capable-to-Promise Application for Swift & Company.», *Interfaces*, **1(2)**, págs. 69–86, 2006.
- [4] BJORNDAL, H. I. N. A. R. C., T. y A. WEINTRAUB, «Operations research in the natural resource industry.», *Int T Oper Res*, **1(2)**, págs. 39–62, 2012.
- [5] DANTZIG, G. B., «Reminiscences about the origins of linear programming», *Operations Research Letters*, **1(2)**, págs. 43–48, 1982.
- [6] HIGGINS, M. C. A. A. T. T. F. C., A. y R. MCALLISTER, «Challenges of operation research practice in agricultural value chains.», *J Oper Res S*, **1(2)**, págs. 964–973, 2010.
- [7] MATA, M., «Bibliografía en L^AT_EX: Una guía concisa de B_IB_TE_X», recurso libre, disponible en <http://it.ciidit.uanl.mx/~miguel/BibTeX.pdf>, 2007.
- [8] PLA, S. D., L. y A. HIGGINS, «A perspective on operational research prospects for agriculture.», *J Oper Res S*, **1(2)**, págs. 1078–1089, 2005.
- [9] REYNISDOTTIR, K., «Linear Optimization Model that Maximizes the Value of Pork Products.», *Master's thesis*, **1(2)**, pág. Reykjavik University, 2012.

-
- [10] SANABRIA, L., «Un Modelo de Planeación de la Producción para una Planta Empacadora de Cárnicos.», *Master's thesis*, **1(2)**, págs. Universidad Autónoma de Nueva León, Mexico, 2012.
- [11] SÁNCHEZ, R. A., «Modelo para Optimizar la planificación de la Producción de Productos y Subproductos en la Industria Porcina.», *Master's thesis*, **1(2)**, págs. Universidad de Talca, Chile, 2011.
- [12] STOKES, S. A. W. R. M. E., J. R. y B. A. MCCARL, «Meat Packing Plant Production Planning: Application of Mixed Integer Goal Programming.», *Agribusiness*, **1(2)**, págs. 171–181, 1998.
- [13] WHITAKER, D. y S. CAMEL, «A Partitioned Cutting–Stock Problem Applied In The Meat Industry.», *J Oper Res S*, **1(2)**, págs. 801–807, 1990.
- [14] WIKBORG, U., «Online Meat Cutting Optimisation.», *Master's thesis*, **1(2)**, págs. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2008.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Edgar Juventino Treviño Rodríguez

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
PRODUCTOS PERECEDEROS CONSIDERANDO UN
SISTEMA DE DESENSAMBLE.

Nací el día 17 de diciembre de 1991 en la ciudad de Monterrey, N.L. Estudié en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas la carrera de Licenciado en Ciencias Computacionales. Trabajé durante dos años en una empresa de metalurgia como desarrollador de software. Actualmente estoy finalizando la Maestría en Ciencias de la Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.