

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Plan de optimización de la producción en una empresa avícola

Autor: José Javier Pulido Guisado

Tutor: Alicia Robles Velasco

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Plan de optimización de la producción de la planificación

Autor:

José Javier Pulido Guisado

Tutor:

Alicia Robles Velasco

Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Organización y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Plan de optimización de la producción de la planificación

Autor: José Javier Pulido Guisado

Tutor: Alicia Robles Velasco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal:

En Sevilla, a 2022

AGRADECIMIENTOS

Quería aprovechar estas líneas, en primer lugar, para dar las gracias a mi familia, a mi padre, a mi madre y a mi hermano, por el apoyo diario que me han mostrado a lo largo de estos más de cinco años en los cuales he estado cursando esta apasionante, pero a la vez dura carrera como es la Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Sin el sustento económico que me han proporcionado y la propia fortaleza emocional, nada de esto hubiera sido posible.

Acordarme también de mis amigos y de las personas allegadas a mi persona que han estado cerca de mí durante este bonito período, aquellos que empezaron esta etapa a mi lado y se fueron, aquellas amistades que han llegado estos años para quedarse y aquellas que siempre están ahí, apostando por ti y aportando su granito de arena a que crezcas como persona en todas las facetas.

Como no mencionar a mis compañeros y amigos de clase, por la amistad forjada tras muchas horas de estudio en grupos, horas de prácticas, dudas telefónicas o llamadas virtuales; pilar fundamental a la hora de ir superando cursos y avanzando en el aprendizaje de las diferentes materias.

Y para finalizar, agradecer la labor docente de todos y cada uno de los profesores por la labor que desempeñan en cuanto a la formación académica del alumnado, en especial, a Alicia, por haber aceptado ayudarme en la realización de este trabajo, mostrando desde primera hora un especial interés y dedicación, facilitándome en todo momento el trabajo a realizar.

José Javier Pulido Guisado

Sevilla, 2022

RESUMEN

La finalidad de este trabajo fin de grado es poder hacer, mediante un modelo de programación de la producción, una comparativa que resulte útil a Procavi S.L. , de tal manera que en un período a medio plazo se puedan tomar decisiones fundamentas y coherentes, teniendo como base al modelo en cuestión.

Esta comparativa resulta de analizar unos costes soportados por la propia empresa cuando no dispone de espacio disponible dentro de la misma para almacenar ciertas producciones, teniendo que destinarlas a unos almacenes externos. Surge también el equilibrio de la plantilla encargada de generar dichas producciones en función a unos parámetros y constantes que serán definidas durante el trabajo.

Para poder resolver el problema se emplearán conocimientos adquiridos referentes a la modelización de problemas y al planteamiento matemáticos de hipótesis.

Para resolver el modelo propuesto, se hará uso del lenguaje de programación Python, una herramienta que permite procesar los datos y resolver modelos lineales.

Además, se realizará un análisis de sensibilidad que nos permitirán tener mayor campo de exploración, de manera que podamos simular varias hipótesis en función de la variabilidad de los datos, ofreciéndonos esto un amplio abanico de posibilidades a la hora de escoger la mejor solución.

A nivel práctico, en la empresa se tendrá en cuenta tanto los pedidos que debe satisfacer la empresa actualmente, los rendimientos teóricos de las máquinas y de los operarios, la variación de los precios en el mercado, el coste de almacenamiento y más datos o variables que habrá que recopilar para acercar este caso práctico lo máximo posible a la realidad.

ABSTRACT

The purpose of this final degree project is to be able to make, through a production programming model, a comparison useful to Procavi S.L., in such a way that, in a medium-term period, fundamental and coherent decisions can be made, based on the model in question.

This comparison results from analyzing some costs borne by the company itself when it does not have available space within it to store certain productions, having to allocate them in external warehouses. The balance of the staff in charge of generating these productions based on some parameters and constants that will be defined during the work also arises.

To solve the problem, knowledge acquired regarding the modeling of problems and the mathematical approach to hypotheses will be used.

To solve the proposed model, Python programming language will be used, a tool that allows processing data and solving linear models.

In addition, a sensitivity analysis will be carried out, that will allow us to have a greater field of exploration, so that we can simulate various hypotheses based on the variability of the data, offering us a wide range of possibilities when choosing the best solution.

On a practical level, the company will consider the orders that the company must currently satisfy, the theoretical yields of the machines and the operators, the variation in market prices, the cost of storage and more data or variables that will have to be compiled to bring this practical case as close as possible to reality.

ÍNDICE

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract.....	xi
Índice.....	xiii
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tablas.....	xix
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Estructura del trabajo.....	5
2. Procavi: Una Empresa Avícola	6
2.1. Estructura de la empresa	6
2.2. Proceso de producción.....	9
2.3. Carne Separada Mecánicamente	16
2.4. Problemática de capacidad	18
3. Modelo de Programación Lineal	21
3.1. Nomenclatura	21
3.1.1. Conjuntos e índices.....	22
3.1.2. Variables	22
3.1.3. Constantes y parámetros	22

3.2.	Restricciones.....	23
3.3.	Función Objetivo.....	25
3.4.	Modelo Completo.....	26
3.5.	Modelo adaptado	27
3.6.	Ejemplo numérico.....	28
4.	Implementación y Resultados	31
4.1.	Lenguaje de programación Python	31
4.2.	Software Gurobi.....	32
4.3.	Funcionamiento del algoritmo.....	34
4.4.	Casos de estudio	36
4.4.1.	Datos empleados.....	36
4.4.2.	Escenarios productivos	41
4.5.	Resultados	43
4.5.1.	Primer Escenario	44
4.5.2.	Segundo Escenario	45
4.5.3.	Tercer Escenario	46
4.5.4.	Cuarto Escenario	47
4.5.5.	Quinto Escenario	48
4.5.6.	Sexto Escenario.....	49
4.5.7.	Séptimo Escenario.....	50
4.5.8.	Octavo Escenario	52
4.5.9.	Noveno Escenario	53

4.6. Discusión y comparación de los resultados obtenido	54
4.7. Propuesta de mejora del modelo.....	57
5. Conclusiones	61
6. Bibliografía	63
Anexo.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la producción de carne de pavo en el mundo (Montoya, Caicedo, & Montoya, 2015).	2
Figura 2. Evolución de la producción de la carne de pavo en España . (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cínicas, 2020).	3
Figura 3. Consumo aparente per cápita de carne de pavo en España (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cínicas, 2020).	4
Figura 4. Representación gráfica de la estructura jerárquica de PROCAVI.....	8
Figura 5. Etapas de la cadena productiva dentro de la planta de procesado.	9
Figura 6. Partes principales del pavo (Iborra, 2020).	11
Figura 7. Sistema de monotarea en una de las salas de despiece.	12
Figura 8. Línea de filetes de libre servicio en la zona del envasado.....	14
Figura 9. Zona de recepción de camiones en la planta de procesado (Procavi, 2022).....	15
Figura 10. Robot biarticulado encargado de paletizar el producto (Procavi, 2022).....	16
Figura 11. Estructura del proceso productivo del problema.	18
Figura 12. Representación gráfica del funcionamiento de un túnel de congelación (aliter, 2020).20	
Figura 13. Logo de Python	32
Figura 14. Logo de Gurobi.....	33
Figura 15. Declaración de los datos de entrada del modelo.....	34
Figura 16. Variables declaradas en el programa de resolución.	35

Figura 17.	Identificación de las restricciones en el lenguaje de programación.....	35
Figura 18.	Declaración de la función objetivo en el programa.....	35
Figura 19.	Exposición de las soluciones del programa.	36
Figura 20.	Gráfica de la demanda total estimada para el presente año 2022.	39
Figura 21.	Variación del beneficio económico de la empresa en cada escenario.	54
Figura 22.	Tendencia del beneficio económico en función de la productividad	55
Figura 23.	Tendencia del beneficio económico en función de la demanda.	56
Figura 24.	Variación del número de operarios mensuales necesarios en cada uno de los escenarios.	56
Figura 25.	Evolución del coste unitario de la carne en función de los kilos almacenados en el primer almacén externo.....	58
Figura 26.	Evolución del coste unitario de la carne en función de los kilos almacenados en el segundo almacén externo.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación mensual de la demanda de carne de pavo en el 2022.....	40
Tabla 2. Estimación demanda mensual optimista para el 2022.	40
Tabla 3. Estimación demanda mensual pesimista para el 2022.	41
Tabla 4. Escenarios de estudio planteados para su correspondiente análisis.	42
Tabla 5. Valores de la productividad y de la demanda en los escenarios productivos....	43
Tabla 6. Solución estimada del primer escenario.	44
Tabla 7. Solución final del primer escenario.....	45
Tabla 8. Solución final del segundo escenario.	46
Tabla 9. Solución final del tercer escenario.	47
Tabla 10. Solución final del cuarto escenario.	48
Tabla 11. Solución final del quinto escenario.	49
Tabla 12. Solución final del sexto escenario.....	50
Tabla 13. Solución final del séptimo escenario.	51
Tabla 14. Solución final del octavo escenario.....	52
Tabla 15. Solución final del noveno escenario	53

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la alimentación es uno de los pilares básicos en la vida del ser humano ya que nuestra supervivencia depende, en parte, de cubrir una de las necesidades básicas existentes en la sociedad, el hambre.

Toda persona necesita alimentarse diariamente y de forma variada para gozar de un buen estado físico o para disfrutar de un bienestar indispensable en el desarrollo de nuestro día a día. Si no satisfacemos este menester, podemos ver alterada nuestra forma de vivir ya que pueden aparecer con el paso del tiempo graves problemas de salud.

Estos alimentos podemos obtenerlos en superficies conocidas por cualquier persona como son los supermercados, los grandes almacenes o las tiendas de barrio; agentes comerciales que proveen a la sociedad de una amplia gama de productos elaborados y destinados al consumo, que se van transformando constantemente en busca de satisfacer las necesidades demandas.

Para llegar hasta este punto de la cadena de suministro antes, como es lógico, han tenido que ser procesados estos productos en las diferentes industrias, tomando aquí gran relevancia PROCAMI.SL, una de las empresas líderes de Europa en la producción integral de carne de pavo, ocupando el primer puesto en el mercado nacional.

Dicha empresa forma parte del núcleo agroalimentario del Grupo Fuertes junto con otras ocho sociedades, entre las que destacan El Pozo, Fripoz, Bodegas Luzón o Aquadeus, entre otras. De manera individual, despliegan sus actividades en diferentes grupos económicos desde la ganadería hasta el agua mineral.

Esta política empresarial conjunta les permite mejorar la imagen de cara al mercado o a la captación de nuevos inversores, así como las posibles compensaciones económicas que se pueden realizar entre las mismas en el caso de obtener pérdidas en los diferentes ejercicios fiscales.

Procami abarca una cuota de mercado en el interior de nuestro territorio en torno al 50 por ciento, compitiendo directamente con PADESA. S.A. la cuál ostenta casi el 35 por ciento, congregando ambas empresas casi la totalidad de la producción de la carne integral de pavo en nuestro país.

Este sector siempre ha estado bastante estancado en nuestro territorio hasta la entrada del nuevo siglo, mientras que en el sur de América, Estados Unidos o Canadá ocupaban los primeros puestos como países productores.

La tendencia en la cuota de mercado se fue equilibrando, tal y como indican (Montoya, Caicedo, & Montoya, 2015), con el paso de las décadas:

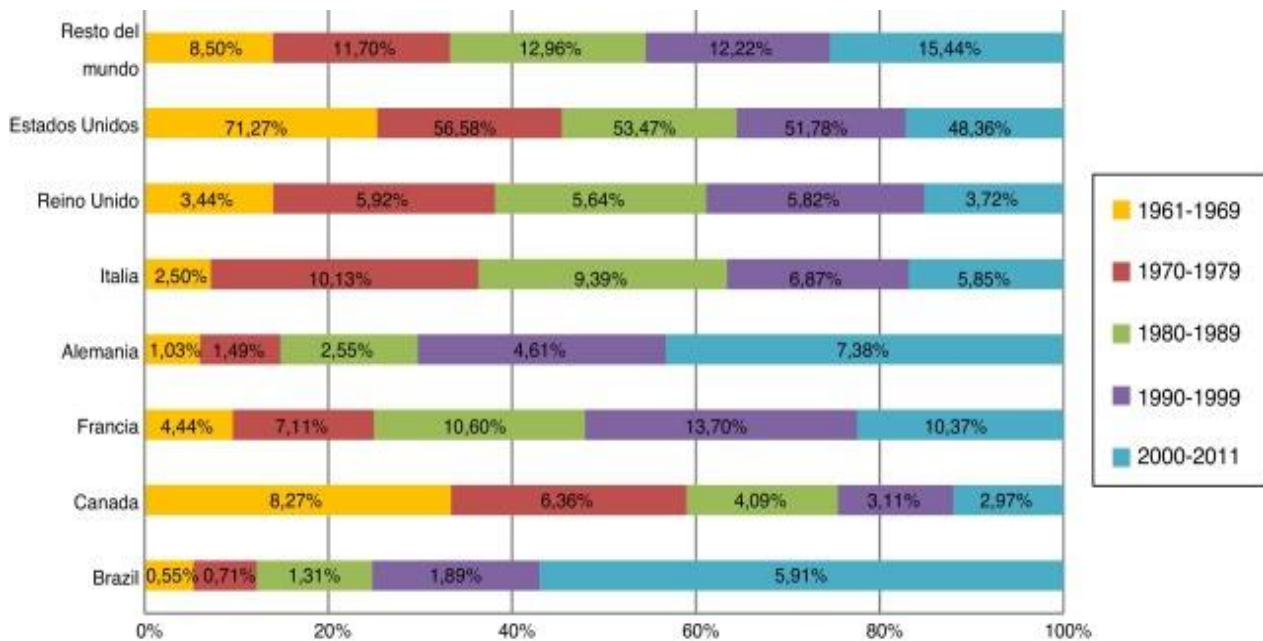


Figura 1. Distribución de la producción de carne de pavo en el mundo (Montoya, Caicedo, & Montoya, 2015).

Como se observa en la figura, en la década de los años 60, el 80% de la producción de carne de pavo se realizaba en Estados Unidos y Canadá. En la actualidad, el mercado se ha equiparado de manera notable y países como Francia, Brasil o Alemania, tienen un papel mayor en este reparto productivo.

Este sector se ha globalizado en las últimas décadas gracias a las recomendaciones de los expertos sobre los beneficios que aporta la carne blanca (pavo o pollo) respecto a la carne roja (ternera o cerdo).

Según (García, 2021), la carne de pavo tiene como componente mayoritario, en un 75% aproximadamente, el agua; siguiéndole en este rango de importancia las proteínas, con un alto valor biológico, dado su contenido en aminoácidos esenciales.

Además, el pavo es una carne magra que tiene menor concentración de grasa y de colesterol incluso que el pollo, en especial, cuando el consumo de la misma se realiza retirando la piel, ya que es aquí donde se acumulan gran parte de los lípidos. Estas ventajas nutricionales provocan que, como se ha mencionado, el sector del pavo esté en continuo crecimiento.

Según refleja la (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, 2020) en la gráfica que se observa a continuación, existe un crecimiento notable de la producción de carne de pavo en nuestro país durante los últimos años.

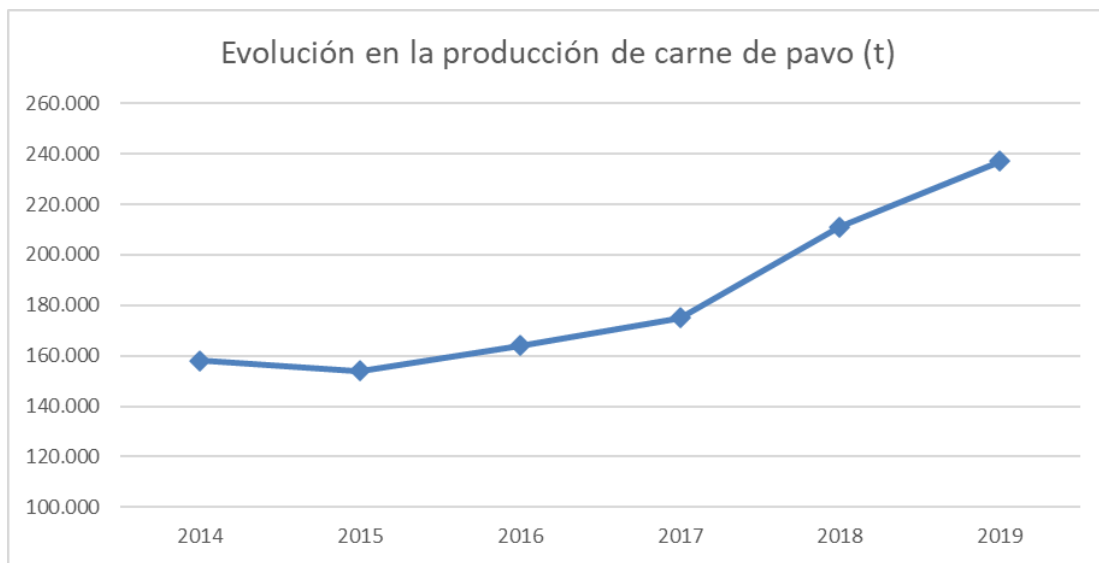


Figura 2. Evolución de la producción de la carne de pavo en España . (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, 2020).

Para reflejar ahora el consumo de esta carne se empleará un indicador específico, denominado consumo aparente per cápita, el cuál muestra el consumo teórico de carne de pavo por habitante en un territorio específico, debiendo ser considerado, además de la propia producción, el número tanto de exportaciones como de importaciones.

Si a la producción le añadimos el número de importaciones y le restamos el de exportaciones, el resultado sería el total de carne de pavo que es apto en un estado para el consumo. Dividiendo ese valor entre la población total del país, tenemos este parámetro que acabamos de definir.

En la Figura 3 se muestra el consumo aparente per cápita en España para seis años consecutivos, observándose que éste ha aumentado ligeramente en los últimos (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, 2020) :

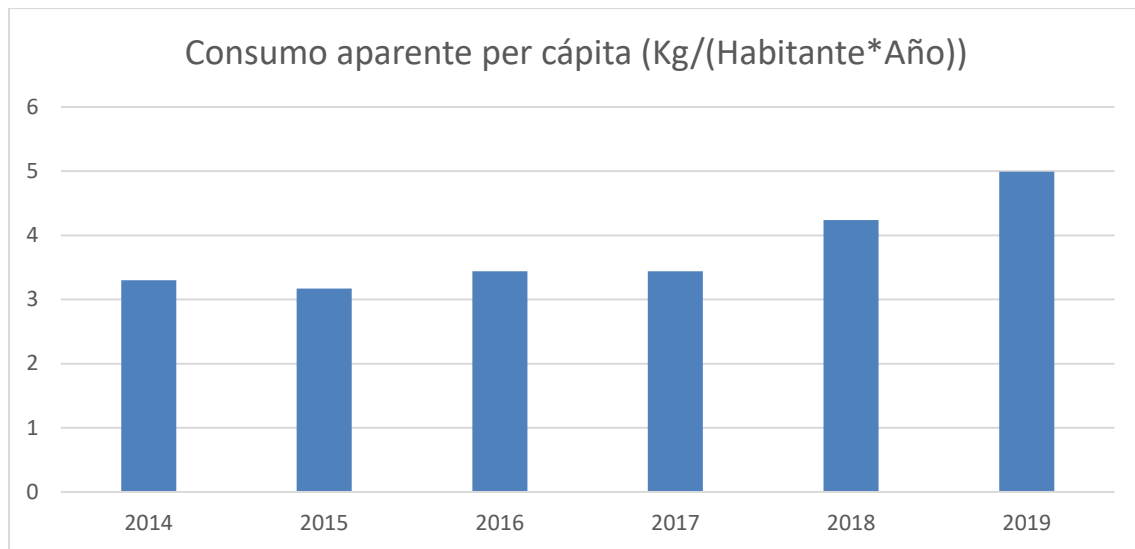


Figura 3. Consumo aparente per cápita de carne de pavo en España (Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, 2020).

1.1. Objetivos

Con este Trabajo Fin de Grado se busca desarrollar un modelo de planificación de la producción en la planta de procesado en base a las características propias de la empresa y a los métodos de trabajo existentes.

Por precisar un poco más, concretamente se buscará el número de operarios óptimos que son necesarios para llevar a cabo la producción demandada en los sucesivos meses de estudio del modelo, con el objetivo de aprovechar de manera eficiente los rendimientos que éstos proporcionan.

Con esto se evitaría tener contratados más trabajadores de los que son realmente necesarios y que se produjese un sobrecoste en el producto por el exceso de mano de obra.

De la misma manera, y como se verá más adelante, puesto que el producto tiene unas características determinadas y debido a la necesidad de su almacenamiento, se buscará minimizar el coste total que imputa a la empresa esta sección, incluyendo las prestaciones de las instalaciones externas.

Podría dividir en dos los motivos o razones principales que han decantado la elección de este tema como materia concreta para el desarrollo de un trabajo final de grado:

- 1) En Procavi me han dado la oportunidad de empezar a curtirme en el mercado laboral, sin disponer de experiencia previa y con todo aún por aprender, empezando con las prácticas curriculares y siguiendo, posteriormente, con la firma de varios contratos.

Además, me abrieron las puertas a conocer una industria de grandes dimensiones, cuáles son las responsabilidades que les ocupan a diario y la importancia que tiene dentro de la sociedad una empresa dedicada a la alimentación.

2) A la vez, como próximo titulado en la materia, es apasionante ver las labores que desempeñan diariamente, la búsqueda constante de mejoras en las diferentes secciones de la planta, la necesidad de optimizar los recursos, la eficiencia en los procesos; entre otras.

Por ello, después de haber cursado la intensificación de Organización y Producción, donde he adquirido conocimientos bastante concretos en las diferentes asignaturas, y ver como guarda una estrecha relación con el sector y con las nociones básicas necesarias para ocupar un puesto de trabajo, confiaba en que se cumplían los requisitos esenciales para poder desarrollar un Trabajo de Fin de Grado.

1.2. Estructura del trabajo

El trabajo seguirá la siguiente distribución organizativa:

- En el apartado 2 se explicará el contexto que engloba a la empresa, así como su estructura interna. Además, se presentará el proceso de fabricación de los artículos desde el origen, abarcando además cuál ha sido la problemática que me ha llevado a enfocar este trabajo.
- En el apartado 3 se desarrollará el modelo de programación lineal diseñado para resolver este problema, incluyendo la definición de los datos o parámetros, las variables, las restricciones y la función objetivo, además de un ejemplo a modo de aclaración.
- En el apartado 4 se comentará como ha sido el método de resolución del problema y las herramientas empleadas, incluyendo varias hipótesis o posibles escenarios productivos en función de los parámetros empleados, analizando los resultados obtenidos de manera analítica y gráfica.
- En el último apartado están las conclusiones a las que se ha llegado con la resolución de este problema.
- Se añade, además, una bibliografía con las referencias y enlaces -, así como una sección para los anexos con los códigos de programación desarrollados.

2. PROCABI: UNA EMPRESA AVÍCOLA

2.1. Estructura de la empresa

Procavi nació en el año 2002 con la compra de unas propiedades pertenecientes a una empresa anterior existente en la localidad, dedicada también a la cría y engorde animal, mezclando en este caso las especies porcina y avícola.

Desde sus inicios, Procavi ha estado en continua evolución buscando mejoras productivas dentro de la propia industria e indagando en el comportamiento animal, llevando esto a una mejora de la alimentación, una mejor aclimatación para su desarrollo y crecimiento o una reproducción óptima y de garantías; manteniendo siempre a esta ave como pilar único de trabajo, el cuál se ha seguido potenciando hasta nuestros días.

Actualmente la planta de procesados se encuentra ubicada en el kilómetro 23 de la carretera comarcal 369, dentro del término municipal de Marchena, Sevilla. Es aquí donde se realiza todo el proceso de producción de los artículos, desde que llegan los animales vivos hasta que se expiden los artículos finales a los clientes.

Cierto es que la cadena de producción comienza en los centros de multiplicación, propiedades de Procavi, que se encuentran en Cañete del Real (Málaga). Desde aquí se provee a la empresa de los huevos que posteriormente se incubarán. La finalidad de producir los propios huevos es que, ante un mercado tan competente, los pavos se obtengan libre de enfermedades y sin empleo alguno de fármacos.

Desde aquí, pasan a la también localidad malagueña de Campillos, donde en el Centro Integral de Incubación, se reproducen a la perfección las condiciones naturales del proceso, regulando las temperaturas, el volumen de oxígeno o la humedad, provocando un nacimiento más sano y ecológico.

Una vez nacen, durante las primeras cuatro semanas, las crías reciben un cuidado más intenso hasta alcanzar medio kilo de peso, momento en el que son trasladadas a las granjas de cebo para el engorde hasta que sean sacrificadas.

En estas instalaciones reciben toda la atención necesaria por parte de equipos especializados y veterinarios para que el animal se desarrolle en plenitud de facultades y aporte grandes rendimientos cárnicos en la planta de procesado.

La fase de engorde suele llevar al pavo macho hasta los 120 días de vida, incluyendo las primeras cuatro semanas de recreía, llegando hasta los 16 kg de peso. Las hembras, por el contrario, suelen adelantar su salida al matadero a los 105 días de vida, alcanzando, como máximo, los 9 kg de peso.

Para que esto pueda cumplirse, estas aves necesitan alimentarse de piensos suministrados por fábricas de la propia empresa ubicadas en Campillos (Málaga), Carmona (Sevilla) o Villanueva de los Castillejos (Huelva), piensos que son elaborados dependiendo del sexaje animal y de la edad del mismo.

Una empresa que procesa más de 11,5 millones de pavos al año, factura más de 100.000 toneladas y dispone de más de 2000 puestos de trabajos directos y casi 6000 indirectos, no es más que el reflejo de una industria bastante consolidada en el sector.

La apuesta, en sus inicios, por embarcarse en un ámbito más desconocido y difícil de trabajar, debido a la menor existencia de información sobre el comportamiento del animal o el tratamiento de éste en comparación con el vacuno, porcino u otras aves como los pollos, han provocado también a largo plazo que la ventaja comercial sea mayor respecto a otros competidores y que las técnicas empleadas actualmente estén más desarrolladas.

Se debe esto principalmente a que la producción global de pavo recaé prácticamente en algo más de 50 empresas, no existiendo uniformidad en los procesos como si que ocurre en otros sectores ganaderos. El pavo es un animal menos domesticado y se encuentra sometido a centenares de controles debido a sus características rústicas.

La dirección de la empresa está regida por el gerente de la misma, quien delega las funciones operativas en el responsable de operaciones, el jefe del departamento de costes y compras, el jefe del departamento comercial, el jefe de calidad y el responsable de recursos humanos.

Aparte de lo anteriormente ya comentado, existen una serie de departamentos que complementan el trabajo en la empresa como son el de métodos y tiempos, el de compras, el de ganadería, el de técnicas de optimización o el de ingeniería. Cobran especial importancia también los representantes de prevención y riesgos laborales, el laboratorio donde se realizan análisis y ensayos o una pequeña clínica para primeros auxilios.

Además, para el trabajo en la planta, existen una serie de jefes de producciones, responsables de las diferentes secciones operativas de la empresa, los cuales deben estar coordinados entre sí para asegurar el traspase correcto de la materia prima, garantizando la realización de los pedidos en tiempos y formas.

Estos jefes de producción se encargan de dirigir la parte de matanza, la del despiece, la parte del envasado y la zona de expediciones. El papel de estos individuos está supervisado en todo momento por el responsable de operaciones, en cuya persona recae la responsabilidad de que todo funcione según lo previsto.

Para facilitar la labor de los mismos, existen figuras secundarias en la propia planta (catalogadas por rangos) como son los encargados y monitores con funciones de supervisión del trabajo realizado por los operarios, así como de notificar incidencias a los jefes de producción.

La Figura 4 muestra el organigrama de la empresa con los puestos y departamentos previamente mencionados.

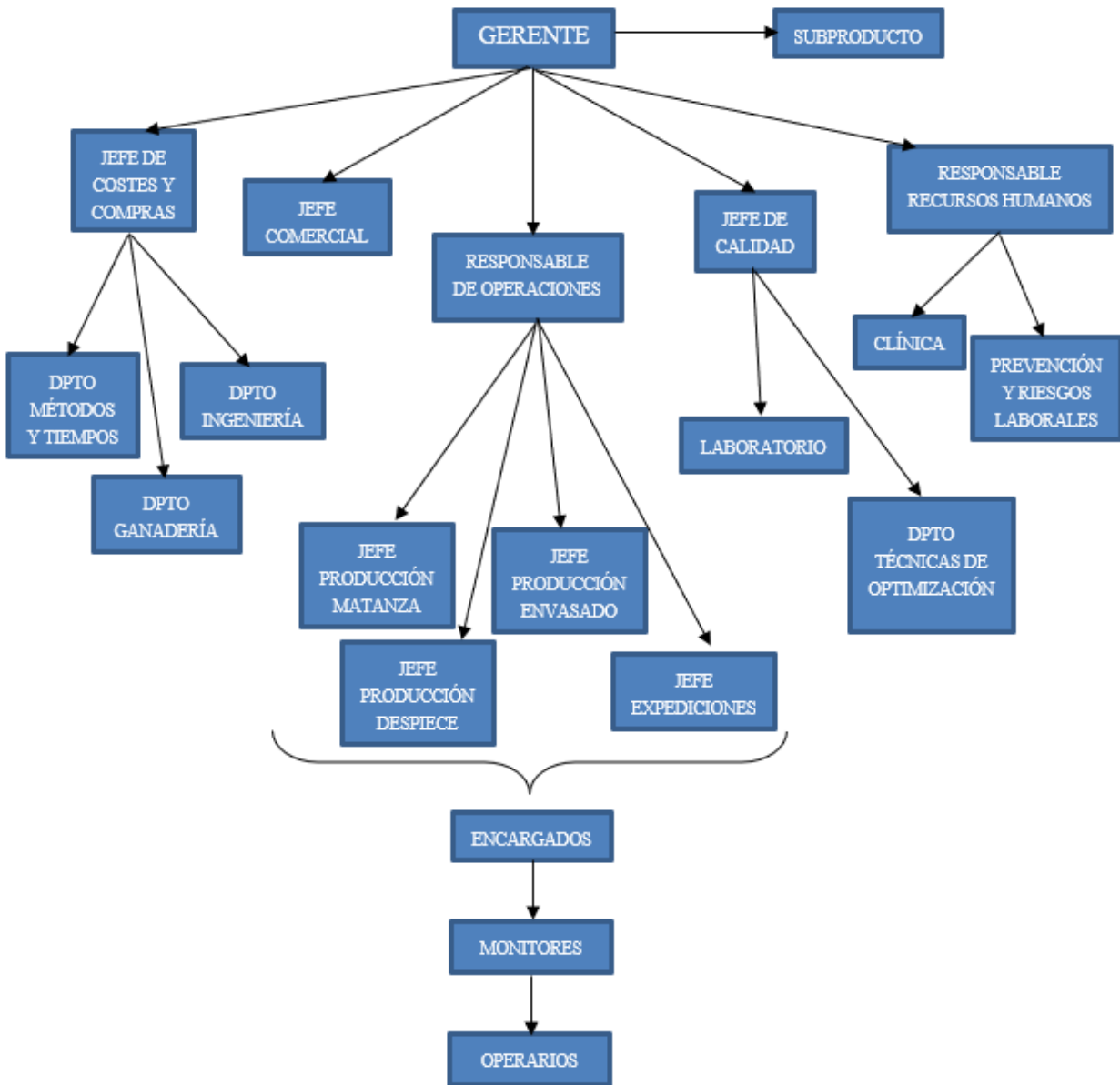


Figura 4. Representación gráfica de la estructura jerárquica de PROCAMI

2.2. Proceso de producción

Si bien el funcionamiento interno diario es arduo y complejo, entender, a gran escala, como se organiza la empresa desde un punto de vista ajeno a la misma es fácil. El procedimiento que sigue la cadena productiva dentro de la planta es el siguiente:

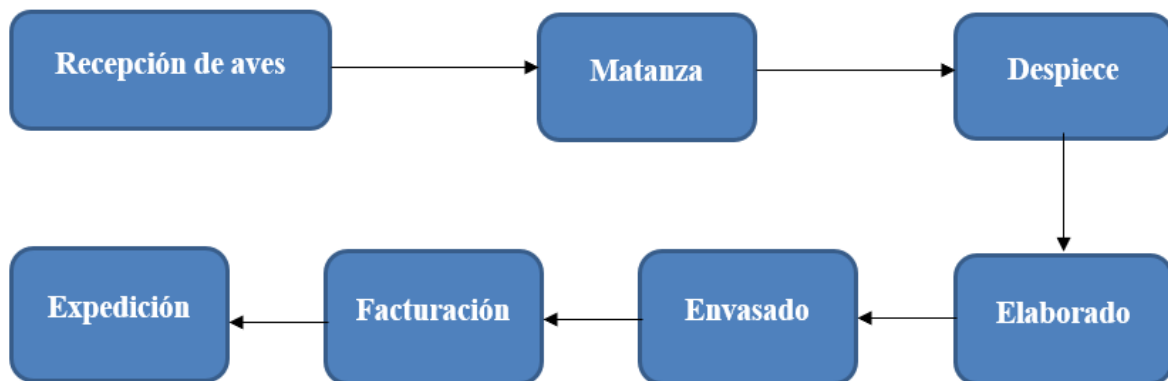


Figura 5. Etapas de la cadena productiva dentro de la planta de procesado.

Se definirán, a continuación, cada uno de los elementos ilustrados, mencionando que tareas se desarrollan en cada una de las etapas o en qué consisten, por lo general, las mismas:

- 1) **Recepción de aves:** Los pavos llegan en jaulas que son transportadas por camiones y, con un orden previamente establecido según los contratos ganaderos, entran en la planta a través del “muelle de vivos”, acceso ubicado en la parte trasera de la planta, en un paso paralelo a la carretera principal, de manera que no coincidan con los camiones que recogen los productos ya terminados o con los propios trabajadores de la planta.

Al llegar, se realiza un recuento de las jaulas que portan estos camiones y se pesan en la báscula, esperando a su correspondiente turno, previamente fijado, para entrar en la matanza.

- 2) **Matanza:** estas jaulas o carros son transportadas desde los camiones hasta la cinta de entrada del aturdidor de dióxido de carbono mediante una carretilla elavadora. Este sistema es bastante efectivo y novedoso, siendo Procavi la primera empresa avícola española en instaurar este sistema, a través del cual el pavo se queda dormido, eliminando el dolor animal por completo durante este proceso.

Tras salir del aturdidor, los carros se inclinan ligeramente con un volcador automático y los pavos, por gravedad, van cayendo en una amplia cinta transportadora. De esta manera, avanzan hasta el lugar donde se encuentran unos operarios, dispuestos en cadena, que se encargan de colgarlos en unos ganchos.

Este cuelgue se realiza a través de las patas del animal, es decir, del revés, para que el proceso del desangrado del animal sea correcto y se eviten coágulos o hematomas que provoquen la pérdida de calidad del producto en posteriores etapas.

A partir de aquí, los pavos se sumergen en unos grandes depósitos horizontales de agua caliente para que los poros de la piel se abran con mayor facilidad. Tras esto, la cadena continúa hasta llegar a tres desplumadoras dispuestas en serie, unas máquinas con rodillos en sus interiores los cuáles giran continuamente en el sentido de las agujas del reloj, de tal manera que, al chocar los pavos contra éstos, las plumas se desprenden sin dañar la propia piel animal.

Al salir de este proceso, la cadena pasa delante de un grupo de operarias que están encargadas de extraer los órganos internos. Posteriormente, y de manera automática, se cortan el cuello, el pico y las patas, antes de pasar por unas lavadoras que limpian completamente la canal del pavo, es decir, el cuerpo entero ya sacrificado tras las acciones de desangrado, eviscerado y desollado.

Después de esto, los pavos se desprenden de los ganchos que les mantiene unidos a la cadena y caen en una cinta la cual avanza hasta los puestos de unos operarios, quienes están encargados de colocarlos en perchas de 40 o 56 unidades, en función del peso de los mismos.

Las partes no aprovechables ya mencionadas como son las patas, las plumas, el pico o la sangre son llevadas mediante tuberías y canalizaciones a la planta de subproductos, transformándose aquí en harinas y piensos aptos para el consumo animal.

Las perchas cuelgan de unos raíles colocados en el techo y avanzan por un circuito hasta llegar a las cámaras de oreo o túneles de enfriamiento rápido. La velocidad de movimiento aquí disminuye ya que la estancia del pavo en estos almacenes dinámicos depende del peso animal o de la raza.

En consecuencia, según las necesidades de la empresa, se puede configurar la temperatura o la humedad relativa pudiendo analizar la merma del producto final, es decir, estudiar la disminución del volumen o del peso animal respecto al de la entrada al proceso.

- 3) Despiece:** Procavi cuenta actualmente con tres salas destinadas al despiece animal. En ellas, los operarios/as se distribuyen en diferentes puestos de trabajo a lo largo de largas cintas y, mediante el

sistema de la monotarea, cada uno es encargado de cuartear al animal en la parte noble que le corresponda, ya sea la pechuga, el contramuslo, las alas o los muslos, entre otras.

Estos productos pueden ser vendidos a granel una vez salen de estas salas o bien, pueden pasar a la zona del elaborado en gavetas, realizándose este transporte a través de cintas en altura de manera que se optimiza el espacio y se evita el movimiento en suelo, con el peligro que esto conlleva.

Para referenciar las partes mencionadas anteriormente con una ilustración del animal, como indica en su artículo (Iborra, 2020), el pavo se compone principalmente de:

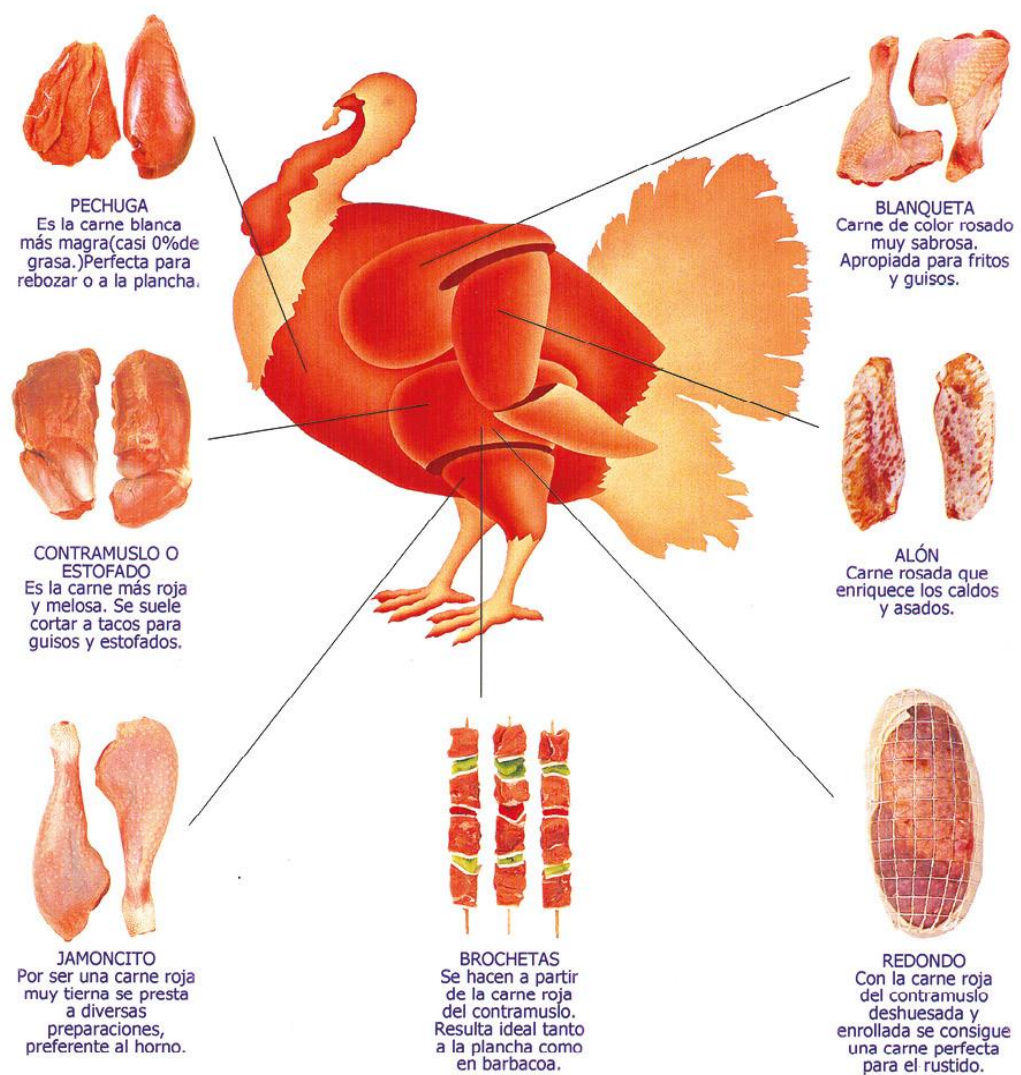


Figura 6. Partes principales del pavo (Iborra, 2020).

Esta considerada dentro de esta sección la sala de CSM (carne separada mecánicamente), lugar donde se ubican cinco máquinas que son alimentadas por operarios o por ramificaciones de cintas que salen del despiece y desembocan en este lugar.

Por medio de la presión y de la fricción que ejercen estos mecanismos se elabora la carne picada, carne que es filtrada para la extracción de posibles impurezas y que es muy común en la formación de productos como las hamburguesas, albóndigas o longanizas.

La empresa comercializa esta carne, casi en su totalidad, congelada (- para la mejor conservación del producto y por la fecha de consumo óptimo, ya que hablamos de una carne fresca) y en bloque (buscando en todo momento la uniformidad del producto).

Son productos bastante demandados y con una cuota alta de mercado, por lo que se generan una gran cantidad de kilos diariamente. Como se aprecia en (Grupo Fuertes, 2022), una ilustración del despiece sería:



Figura 7. Sistema de monotarea en una de las salas de despiece.

- 4) **Elaborado:** para llegar a esta sala, la carne que sale del despiece queda almacenada en un almacén intermedido denominado FIFO (first in first out), el cual va suministrando (en función de la fecha del lote de la carne) a la sala de elaborado las cantidades que vayan demandando por la entrada de servicios, dejando el resto de las cajas acumuladas en este almacén automatizado para próximas necesidades y, evitando así problemas con la caducidad del producto.

Esta sala de elaborado engloba tanto la producción de artículos para venta directa (hamburguesas, chistorras o brochetas) como una zona destinada a la producción de las salmueras o complementos alimenticios que suelen llevar una selección de productos. Esto se realiza mediante grandes depósitos donde se introducen los componentes necesarios para generar unas mezclas sobre las que posteriormente se vierte la carne.

- 5) **Envasado:** zona de la planta donde se encuentran las líneas de producción encargadas de envasar, etiquetar y paletizar los diferentes productos comercializables. Este envasado lo podemos dividir en dos categorías: el libre servicio o el envasado al vacío.

El primero de ellos sigue el siguiente patrón:

- Existe un túnel de congelación del producto al inicio de las líneas donde el producto se congela para que las máquinas posteriormente corten con facilidad las piezas.
- Máquinas o robots que cortan los productos previamente congelados, formando lotes o enviando estos de manera individual a la siguiente parte de la línea de producción.
- Unos operarios disponen el producto en bandejas o repasan las bandejas ya formadas previamente de manera automática gracias al sistema de bandejas vacías, retirando aquellas que por calidad o por el convenio establecido con el propio cliente no son aptas para poder comercializarlas.
- Las bandejas ya repasadas o formadas llegan mediante una cinta a las envasadoras, encargadas de sellar las mismas en grupos mediante ciclos programados.
- Las etiquetadoras se encuentran justo a la salida de las envasadoras y marcan las bandejas con stickers o rótulos comerciales.
- Un operario se encuentra al final de la línea y es el encargado de formar los pallets con cajas apiladas, dentro de las cuales están las bandejas que llegan tras superar todo el procedimiento descrito.

Se observa, a continuación, una ilustración recogida por (Poveda, 2017) respecto a una línea de envasado:



Figura 8. Línea de filetes de libre servicio en la zona del envasado.

En el caso del envasado al vacío:

- Son líneas mucho más cortas que las del libre servicio debido a que el volumen de producción es menor. Constan por lo general de 3 o 4 operarios.
 - La carne llega en cubas y los trabajadores distribuyen las piezas en moldes preparados, rodeado por film o láminas multicapas. Este material se emplea debido a su gran capacidad de sellado que garantiza la hermeticidad del producto.
 - Una vez el molde está completamente lleno, la cinta avanza y se produce el precintado automático del producto, pasando el producto ya terminado al operario encargado de colocarle las etiquetas correspondientes y ubicarlo en las cajas del pallet.
- 6) Facturación:** para poder cargar las mercancías en los camiones, estos deben pasar por la entrada principal de la planta donde los camioneros entregan la documentación necesaria para poder realizar este traspase de artículos, quedando registradas tanto la hora de entrada, la de salida o la de pesada en la báscula.

Este registro se realiza por si surgen incidencias con los comerciales debido al retraso de la entrega, de tal manera que se disponga de una ficha técnica a la que acogerse y refleje en quien cae la responsabilidad. (Procavi, 2022) ilustra como es esta zona en la actualidad:



Figura 9. Zona de recepción de camiones en la planta de procesado (Procavi, 2022).

- 7) **Expedición:** una vez que los camiones han llegado a los muelles de carga, las existencias se introducen en los tráilers si el cliente así lo requiere o, por el contrario, dependiendo del contrato firmado, la mercancía se queda preparada a expensas de que sea el propio camionero quien la introduzca en su camión.

Esta sección también es la encargada de llevar el control de los pallets ya formados y de la mercancía, en general, que se va a vender. Los operarios con las transpaletas llevan las cargas a los almacenes de expediciones, los cuales comunican directamente con los muelles de carga.

Cabe recordar que la expedición se realiza de todos los artículos de la planta, independientemente de la sección de la que provengan.

Adjunto ahora una imagen del paletizado de unas gavetas de (Procavi, 2022) tras salir de la zona del despiece para servir un pedido. Este apilamiento lo realiza un robot biarticulado que tiene capacidad para funcionar de manera sistemática, aunque se trabaje con distintos productos al mismo tiempo.



Figura 10. Robot biarticulado encargado de paletizar el producto (Procavi, 2022).

2.3. Carne Separada Mecánicamente

En este punto va a ser explicado cómo es el proceso de obtención de esta carne que estamos comercializando con mayor detalle y que, a su vez, manifiesta la problemática por la que se abarca este estudio.

Para su realización, la sala del CSM (abreviatura que emplearemos para referirnos a esta sala) dispone de una serie de máquinas y operarios encargados de realizar las producciones. Esta sala funciona de la siguiente manera:

- 1) Dependiendo de la composición de la mezcla final que queramos obtener, la carne puede llegar a la sala de dos maneras diferentes. La primera opción es que los operarios del despiece depositen las partes nobles del animal que van despiezando en unas cintas transportadoras que comunican ambas salas.

La segunda opción es a través de gavetas o cajas que han sido completadas también por operarios del despiece, pero que son llevadas a la sala de trabajo por un operario específico una vez que se han terminado de completar los pallets con dichas cajas.

- 2) Esta dualidad en cuanto a la llegada del producto depende de la frecuencia de producción, a modo de aclaración, por las cintas se disponen aquellos artículos de mayor peso y con mayor rotación mientras que, con el resto, es necesaria una mayor manipulación en el despiece por lo que su frecuencia de salida es menor, siendo necesario completar los pallets totalmente para poder moverlo a la zona del CSM como ya se ha comentado.
- 3) Si la materia prima viene a través de las cintas, ésta cae directamente en las tolvas que tienen las trituradoras o picadoras, las cuales tienen un funcionamiento simple ya que el producto de la tolva pasa a un sinfín que empuja el producto inicial hacia unas cuchillas y por presión, va triturando la mezcla, obteniendo una especie de pasta a la salida de la máquina.
- 4) Si los componentes, por el contrario, son facilitados en cajas, estas se vuelcan a su vez en un carro que está adjunto a la propia máquina y cuando tengamos la mezcla preparada, éste automáticamente realiza los ciclos de subida y bajada. El funcionamiento que sigue el proceso posteriormente es similar al ya comentado en el punto 3.
- 5) También cabe mencionar que, si el producto llega a través de las cintas se emplea en el proceso productivo únicamente un operario, cuya ubicación se sitúa a la salida de la boca de la picadora y su función es la de ir disponiendo el producto final en cajas de rejillas. A su vez, tal como se rellenan estas cajas, el operario las va disponiendo en el pallet como producto ya terminado.
- 6) Por el contrario, si el producto llega en gavetas, un operario estará constantemente llenando el carro de carne, a la vez que maneja la botonera de la máquina, mientras que el otro operario cumple la función que se ha comentado en el punto 5.
- 7) Por último, con los pallets de productos terminados ya completos, el operario encargado de manejar la transpaleta, tras registrar la producción en el sistema, es el encargado de colocar el pallet en el túnel de congelación. Aquí estará almacenado durante el tiempo que sea necesario, dependiendo de su composición, antes de ser expedido.

Adjunto ahora un breve esquema ilustrativo de la estructura de este proceso:

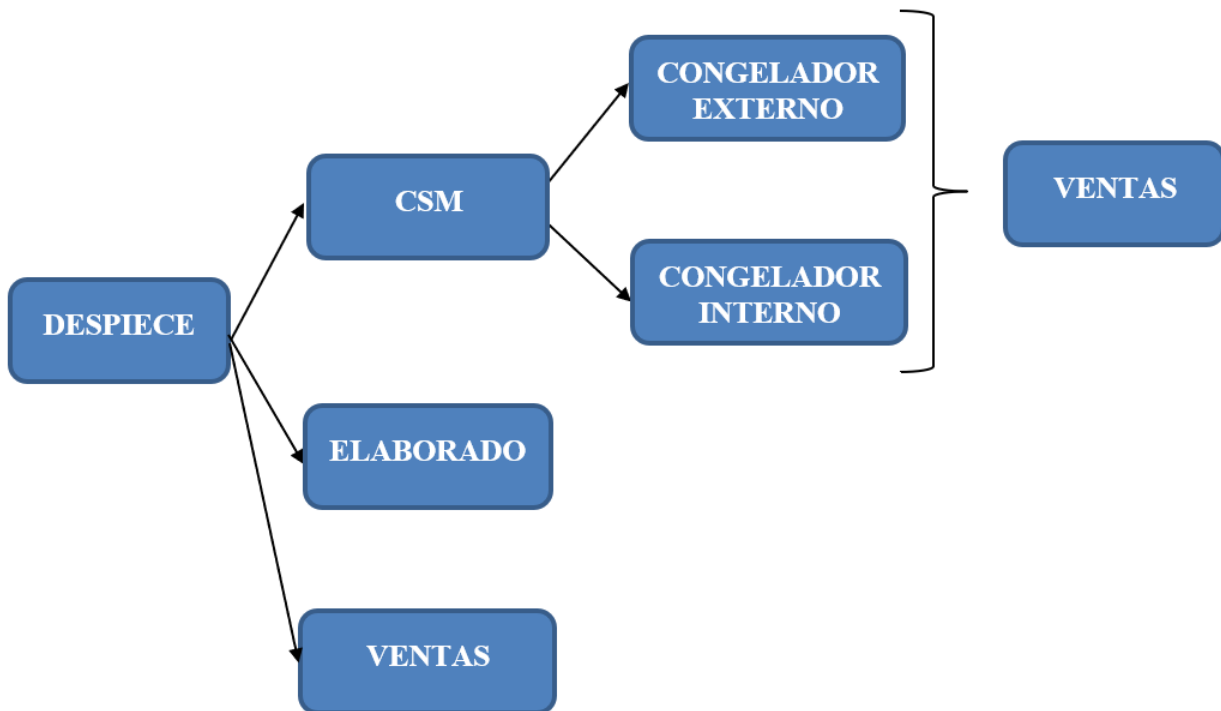


Figura 11. Estructura del proceso productivo del problema.

2.4. Problemática de capacidad

Una realidad existente en muchas empresas es que cuando éstas crecen de tamaño, motivado esto principalmente por un aumento de las ventas o el descubrir un mercado anteriormente no explotado, suelen aparecer problemas dentro de las mismas en cuanto al equilibrio de los recursos y de las capacidades de manera proporcional entre todas las secciones, de manera que ninguno de los eslabones limite al siguiente en este cambio de escala.

Como he comentado anteriormente, Procavi lleva creciendo como empresa desde sus orígenes y, tras las últimas inversiones realizadas en la ampliación de terrenos durante 2018 y 2019, actualmente se encuentra a la espera de comenzar una nueva extensión de la planta de procesado.

Puesto que el mercado es muy variable en cuanto al consumo de los productos y de los propios precios, la empresa se ha encontrado durante los últimos meses en dificultad para poder optimizar los beneficios que proporcionan una serie de artículos, los cuales, tras su elaboración, necesitan mantenerse durante un período de tiempo dentro de unas cámaras frigoríficas, puesto que este producto se expide congelado.

Por ello, ante la alta fluctuación del mercado en ciertos meses del año, las capacidades de estas cámaras se han visto limitadas, dejando a la empresa sin poder de maniobra en las propias instalaciones que permita realizar una planificación acorde a las solicitudes recibidas.

Además, la opción de dejar sin servir los pedidos en la empresa solo se contempla cuando falta la propia materia prima, cuando se producen averías generales que afectan a secciones completas e impliquen amplios períodos de parada o cuando la falta de personal es notoria (algo usual durante las fases de escalada de casos de COVID-19 estos dos últimos años).

Lo anteriormente comentado no es más que una aclaración de la filosofía empresarial ya que el objetivo es siempre satisfacer las necesidades de los clientes y dar salida a la totalidad de artículos producidos.

La última opción es destinar la carne a la planta de subproducto ya que, con esta decisión, el producto pierde prácticamente todo su valor, más aún si cabe, cuando éste viene soportando costes por las sucesivas etapas productivas (sin mencionar las inversiones realizadas desde la formación de los propios huevos en las incubadoras). Esta opción no aporta rentabilidad alguna a la empresa.

Considerando de igual forma que mensualmente se deben de quedar vacías las cámaras frigoríficas para asegurar una rotación adecuada de los productos y que hay que evitar los problemas de contaminación alimentaria en los diferentes controles internos, así como con los propios clientes; la empresa tiene a su disposición una serie de congeladores externos donde puede acumular las provisiones no acopiadas de la propia planta.

Una de las mayores desventajas, y que no trataremos esto en nuestro modelo, es la gran variabilidad existente en los tiempos que deben permanecer los distintos productos en estos congeladores. Es bastante arduo planificar las producciones y optimizar los espacios con estos inconvenientes productivos.

Físicamente, tanto las cámaras internas de Procavi como los almacenes subcontratados, tienen la misma composición y funcionan de la misma manera. Un buen ejemplo del funcionamiento de estas cámaras lo ilustra (aliter, 2020):

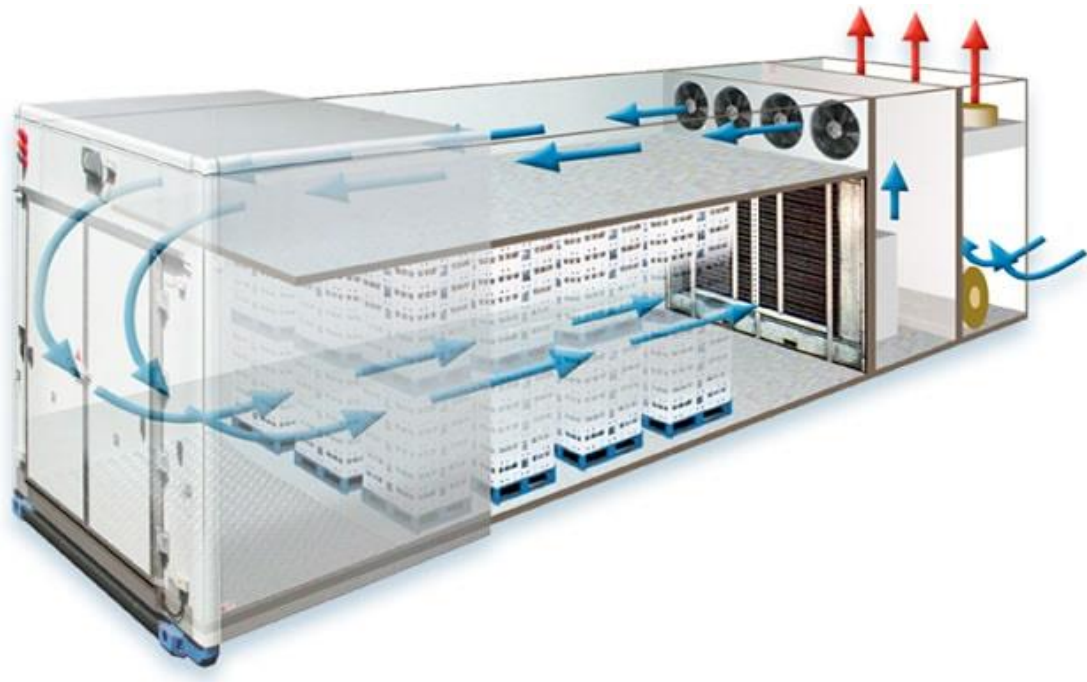


Figura 12. Representación gráfica del funcionamiento de un túnel de congelación (aliter, 2020).

El hecho de contratar este servicio no es más que una pérdida en la rentabilidad del producto, aunque esta rentabilidad siempre va a ser mayor (conlleva menor pérdida de dinero) que la opción comentada anteriormente de destinar las producciones a la planta de subproductos.

Aún con esto, es una práctica que se realiza con los excedentes generados en situaciones extremas, una vez analizadas todas las posibilidades internas sin encontrar una solución más eficiente.

3. MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL

A lo largo de este apartado se explicarán con detalle el conjunto de datos y variables del problema, así como las restricciones y la función objetivo diseñadas para modelar el problema en cuestión.

También se incluye la representación final del propio modelo y un ejemplo numérico para facilitar la comprensión de las propias restricciones y de la función objetivo.

Este problema, como cualquier otro de programación lineal, debe cumplir los siguientes supuestos:

- Las variables del modelo serán **números** reales **mayores o iguales a cero** ya que no es lógico tratar con cantidades negativas en objetos físicos.
- La **proporcionalidad**: se debe cumplir tanto en las restricciones como en la función objetivo y se resumiría de esta manera: si para elaborar 100 kg de carne necesito dos operarios, para producir 200 kg necesitaré cuatro. El nivel de producción es proporcional al número de trabajadores.
- Supuesto de **divisibilidad**: puesto que las variables tienen un carácter continuo se pueden obtener fracciones de éstas. En el caso de que sólo tenga sentido obtener soluciones enteras, el modelo se adaptará a la Programación Lineal Entera.
- La **certidumbre** del modelo, ya que todos los parámetros del modelo, al ser éste determinístico, son conocidos y no varían durante el período de tiempo en el que se está analizando el mismo.
- El supuesto de **aditividad** quiere decir que la aportación que realizan cada una de las variables, ya sea en las restricciones o en la función objetivo, es independiente del resto quedando de tal manera que, la contribución total de las variables es la suma de cada una de ellas.

3.1. Nomenclatura

En los siguientes apartados se encuentran definidos los conjuntos e índices, así como las variables y las constantes y parámetros, que han sido usados posteriormente en la resolución del modelo.

3.1.1. Conjuntos e índices

i	Índice numérico que se empleará en el recorrido de bucles y vectores y que abarcará el rango de valores comprendido entre 1 y 3 ya que tiene como base al conjunto tipos.
j	Índice numérico que se empleará en el recorrido de bucles y vectores y que tendrá por el rango al comprendido entre los valores 1 y 12, teniendo como base al conjunto meses.
Meses	Conjunto que representa el período de tiempo sobre el que se va a realizar el caso de estudio.
Tipos	Conjunto que recoge el número de almacenes o congeladores en los que se puede almacenar la producción, teniendo en cuenta tanto el almacén interno como los externos.
Demanda	Conjunto que agrupa las producciones mínimas necesarias que debe realizar la empresa para poder satisfacer a los clientes.

3.1.2. Variables

x_{ij}	Producción generada (Kg) por la empresa que se almacena en el congelador i durante el mes j .
y_j	Número de operarios necesarios en la sección de la empresa en cuestión para producir la cantidad demandada durante el mes j .

3.1.3. Constantes y parámetros

P_{vp}	Parámetro que señala el precio de venta unitario de la carne producida en esta sección en el año que estamos analizando. Se mide en euros por kilogramo de producto.
----------	--

- C_{int} Constante que recoge el valor del coste estimado de almacenamiento interno de la empresa lo largo de los meses. Se mide en euros mensuales por cada kilogramo de producto.
- C_{ext1} Parámetro que muestra el coste unitario resultante de almacenar las producciones de la empresa en el primero de los almacenes externos. Se mide en euros mensuales por cada kilogramo de producto.
- C_{ext2} Parámetro que indica el valor del coste unitario del segundo almacén externo. Se mide en euros mensuales por cada kilogramo de producto .
- Prh Parámetro que expone la productividad teórica mínima mensual que deben cumplir los operarios con estos artículos. Se mide en kilogramos producidos por cada mes de trabajo.
- Cper Constante que indica el salario mensual que percibe cada uno de los operarios que trabajan en esta sección. Constante medida en euros mensuales por persona.
- a Parámetro que indica la capacidad máxima de almacenamiento existente en el almacén propio. Se mide en kilogramos al mes.
- b Parámetro que indica la capacidad máxima de almacenamiento del congelador externo 1. Se mide en kilogramos al mes.
- c Parámetro que recoge el coste anual fijo estimado asociado al coste de mantenimiento de la sección, al coste de la materia prima y al coste de expedición; así como a los gastos comunes de luz y de agua. Se mide en euros al año.

3.2. Restricciones

Se procederá en este apartado a definir y comentar cada una de las restricciones que empleadas en el modelo de programación diseñado.

Limitación almacén interno

Con esta restricción se impone que, para el conjunto de todos los períodos en el que se va a desarrollar el problema, la capacidad máxima de almacenamiento viene dada por el parámetro a , pasando el excedente a los otros dos almacenes:

$$R1: x_{1,j} \leq a \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

Limitación almacén externo 1

Con las condiciones comentadas apartados anteriores, el primer almacén subcontratado tiene como capacidad máxima al parámetro b , que se mantendrá estable durante todas las etapas de estudio:

$$R2: x_{2,j} \leq b \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

Satisfacción de la demanda

Como en cualquier modelo de planificación de producción, la restricción que exige que la producción mínima mensual sea aquella que cumple con los pedidos de los clientes de manera satisfactoria, y viene dada por la siguiente expresión:

$$R3: \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \geq D_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

El segundo almacén, como se comentará posteriormente, no tiene limitación alguna de capacidad por lo que, si la empresa lo cree conveniente, podrá acopiar aquí todas las producciones que necesite.

Capacidad productiva

Puesto que las producciones deben ser siempre mayores que la demanda (restricción anterior), con esta limitación de la capacidad imponemos que el volumen generado mensualmente debe estar condicionado por el producto entre el número de operarios que trabajan en la sección por el coeficiente de productividad teórica:

$$R4: \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \leq Prh * y_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

Positividad de las variables

Restricción que obliga a que, tanto el número de operarios como las producciones, sean siempre positivas o, en el peor de los casos, nulas, sea cual sea el período de trabajo:

$$R5: \quad x_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, 3; \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R6: \quad y_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

3.3. Función Objetivo

En las siguientes líneas, se definirán los términos que componen la función objetivo del problema. En su conjunto, con esta función buscamos la minimización de los costes generados por esta sección a la empresa. Para ello, partimos de lo siguiente:

$$F.O. : \quad c + \text{Minimizar} \quad \sum_{j=1}^{12} C_{int} \cdot x_{1,j} + \sum_{j=1}^{12} C_{ext1} \cdot x_{2,j} + \sum_{j=1}^{12} C_{ext2} \cdot x_{3,j} + \sum_{j=1}^{12} C_{perj} \cdot y_j \\ - \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^3 Pvp \cdot x_{i,j}$$

- El parámetro c, como se ha indicado anteriormente, recogerá el coste fijo anual de la empresa y que ha sido estimado en base a unos requisitos que se explicarán posteriormente en un apartado específico para ello.
- El primer sumatorio agrupa el coste generado por mantener los kilos almacenados dentro de las propias instalaciones.
- El segundo sumando recoge el sumatorio del coste imputado a la empresa por enviar las producciones sobrantes al primer almacén externo.
- El tercer término es similar a los dos anteriores, pero en este caso, indica el coste que genera el segundo almacén externo.

- El cuarto sumatorio agrupa el coste que recae en la plantilla encargada de generar las producciones.
- El último término resta en la función objetivo porque aporta un beneficio. Esta ganancia resulta del producto entre el precio de venta al público y el total de los kilogramos generados.

3.4. Modelo Completo

Se adjunta, a continuación, el modelo de programación completo, el cuál dará valor a nuestras variables, es decir, obtendremos el equilibrio óptimo de operarios necesarios para llevar a cabo las producciones, así como las cantidades a fabricar, o lo que es lo mismo, las cantidades que se almacenarán mensualmente en las distintas instalaciones.

Matemáticamente quedaría de la siguiente manera:

$$c + \text{Min} \quad C_{int} * \sum_{j=1}^{12} x_{1,j} + C_{ext1} * \sum_{j=1}^{12} x_{2,j} + C_{ext2} * \sum_{j=1}^{12} x_{3,j} + C_{per} * \sum_{j=1}^{12} y_j - C_{per} * \sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^3 x_{i,j}$$

S.a:

$$R1: \quad x_{1,j} \leq a \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R2: \quad x_{2,j} \leq b \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R3: \quad \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \geq D_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R4: \quad \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \leq Prh * y_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R5: \quad x_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, 3; \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R6: \quad y_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

3.5. Modelo adaptado

Una vez compilado el programa y pudiendo analizar los primeros resultados y, tras iterar varias veces para comprobar que no existía error alguno, los valores que arrojaba el modelo respecto a la variable que indica el número de trabajadores mensuales no parecían coherentes ya que se encontraban muy lejos de la realidad existente en el trabajo diario.

Por ello, decidí entonces eliminar de la función objetivo el último término, es decir, el beneficio existente por la venta de los artículos, centrando la optimización de la función objetivo únicamente en el ámbito de los costes.

De igual manera, introduje la siguiente restricción:

Limitación de gasto

El coste por mano de obra que recae en la sección de la empresa que estamos estudiando debe ser menor o igual que la décima parte de los beneficios percibidos por la venta de la producción generada. Este conjunto de restricciones actuará como cota superior de las variables y_j , o número de operarios contratados.

El considerar dicha proporción en la restricción viene fundamentada por estimaciones de la propia empresa en base a la experiencia ya que sobre el producto recae, además, un coste por la maquinaria necesaria para producir el artículo, un coste de mantenimiento, el coste propio de la materia prima o el coste fijo por luz, electricidad o agua; por lo que el coste del personal debe ser inferior o igual a la décima parte del beneficio obtenido:

Queda la restricción como se observa a continuación:

$$C_{per} * y_j \leq \frac{Pvp}{10} * \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

Reordenando las restricciones mostradas en el apartado anterior, incluyendo la restricción de la limitación de gasto y enumerando las variables que indican la positividad de las mismas en último lugar, el modelo queda entonces de la siguiente manera:

$$c + \text{Min} \quad C_{int} * \sum_{j=1}^{12} x_{1,j} + \sum_{j=1}^{12} x_{2,j} + C_{ext2} * \sum_{j=1}^{12} x_{3,j} + C_{per} * \sum_{j=1}^{12} y_j$$

S.a:

$$R1: \quad x_{1,j} \leq a \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R2: \quad x_{2,j} \leq b \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R3: \quad \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \geq D_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R4: \quad \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \geq Prh * y_j \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R5: \quad C_{per} * y_j \leq \frac{Pvp}{10} * \sum_{i=1}^3 x_{i,j} \quad \forall j = 1, \dots, 12$$

$$R6: \quad x_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, 3 ; \forall j = 1, \dots, 12$$

3.6. Ejemplo numérico

En este apartado se presenta matemáticamente un ejemplo del modelo, abarcando un período inferior al aplicado en código del programa, concretamente de tres meses, para ilustrar de manera clara y concisa cómo sería el funcionamiento del mismo.

Tomarán cada uno de los costes de almacenamiento, el interno, el externo 1 y el externo 2, respectivamente, los siguientes valores 0.1 €/kg, 0.2 €/kg y 0.3 €/kg. A su vez, el almacén interno tiene una capacidad máxima de 150.000 kg/mes, mientras que la del almacén externo 1 es de 75.000 kg/mes.

El coste mensual de los trabajadores se ha estipulado en 1200€ y el precio de venta del artículo en 1.5 €/kg.

Para una demanda de 300.000 kg en el mes primero, de 350.000 kg en el segundo mes y de 400.000 kg en el tercer mes, el modelo queda de la siguiente manera:

$$c + \text{Min } 0.1 * (x_{11} + x_{12} + x_{13}) + 0.2 * (x_{21} + x_{22} + x_{23}) + 0.3 * (x_{31} + x_{32} + x_{33}) + 1500 * (y_1 + y_2 + y_3)$$

S.a:

$$x_{11} \leq 150.000$$

R1

$$x_{12} \leq 150.000$$

$$x_{13} \leq 150.000$$

$$x_{21} \leq 75.000$$

R2

$$x_{22} \leq 75.000$$

$$x_{23} \leq 75.000$$

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} \geq 300.000$$

R3

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} \geq 350.000$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 400.000$$

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} \geq 281.600 * y_1$$

R4

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} \geq 281.600 * y_2$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 281.600 * y_3$$

$$1200 * y_1 \leq \frac{1,5}{10} * x_{11} + x_{21} + x_{31}$$
$$1200 * y_2 \leq \frac{1,5}{10} * x_{12} + x_{22} + x_{32}$$
$$1200 * y_3 \leq \frac{1,5}{10} * x_{13} + x_{23} + x_{33}$$

$$x_{11}, x_{21}, x_{31}, y_1 \geq 0$$
$$x_{12}, x_{22}, x_{32}, y_2 \geq 0$$
$$x_{13}, x_{23}, x_{33}, y_3 \geq 0$$

El patrón seguido a modo de ejemplo a lo largo de estos tres meses se repetiría de igual manera en cualquier período, sea cual sea el estudio propuesto.

Como se puede comprobar, cada conjunto de restricciones tiene tres restricciones, correspondiendo éstas a cada uno de los meses que, a modo de ejemplo, estamos analizando.

El único cambio llamativo existente es la variación de la demanda ya que el resto de ecuaciones mantienen el mismo comportamiento, tanto en los parámetros o constantes como en las variables definidas.

4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1. Lenguaje de programación Python

Para resolver el modelo anterior planteado, se ha empleado uno de los lenguajes de programación más conocidos en el mundo: Python. Tal como reseña (Wikipedia , 2021), hace más de 30 años del desarrollo de los primeros simuladores, concretamente en 1989, cuando un holandés, Guido Van Rossum, comenzó un proyecto como forma de ocio tras haber participado previamente en el desarrollo del lenguaje de programación ABC.

Cierto es que ha seguido ligado a los continuos desarrollos del lenguaje, tomando este nombre tan característico por la afición de su creador al grupo Monty Python.

Según indica (González Duque, 2011), un ingeniero informático aficionado a la programación, Python reúne una serie de requisitos que lo convierte en un lenguaje muy útil y adaptable a cualquier entorno de desarrollo. Sin embargo, no es recomendado para la programación de bajo nivel o en caso de rendimientos críticos.

Es uno de los lenguajes por excelencia para el comienzo de la programación, de ahí también su uso para realizar este trabajo. Cierto es que he ido aumentando los conocimientos del propio lenguaje conforme iba desarrollando el modelo y descubriendo nuevos comandos y sentencias.

Destaca principalmente las siguientes características:

- ***Es un lenguaje interpretado o de script:*** en vez de compilar el código en el lenguaje que pueda comprender y ejecutar una computadora, se ejecuta usando un intérprete, es decir, un programa intermedio.

La ejecución de estos lenguajes compilados es más rápida, pero a su vez, son lenguajes más flexibles y portables.

- ***Tipado dinámico:*** la declaración del tipo de dato que contendrá una determinada variable no será necesaria puesto que, según el valor que se asigne, directamente el lenguaje relaciona esa variable al tipo de dato en cuestión. Esto conlleva que, al cambiar el valor de una variable a otro tipo distinto, el tipo de variable cambia.

- **Multiplataforma:** esto es una gran ventaja ya que, a excepción del uso de librerías específicas, el programa podrá compilar en todos los sistemas sin cambios aparentes.
- **Orientado a objetos:** el algoritmo es el único encargado de relacionar los objetos entre sí; pasando a ser clases y objetos en este lenguaje los distintos casos de estudio del mundo real que se vayan a tratar.
- **Fuertemente tipado:** cada una de las variables deben tratarse en función del tipo que sean, es decir, si tenemos una variable número, no podremos tratarla como variable texto.

Las ventajas que ofrece Python respecto a otros lenguajes son la compatibilidad con todos los sistemas operativos, la accesibilidad a todas las personas, la sencillez y facilidad en su uso o la cantidad de módulos y bibliotecas integrados, entre otras.



Figura 13. Logo de Python

4.2. Software Gurobi

Una vez puesto en contexto el lenguaje de programación que se va a emplear entra en escena Gurobi, (Wikipedia, 2020) un software dedicado a la optimización y resolución de modelos de programación lineal, programación cuadrática o entera mixta. Su nombre viene de los apellidos de sus tres fundadores: Zonghao Gu, Edward Rothberg y Robert Bixby.

Según (Estrategias de inversión, 2021), Gurobi está considerado como el solver más potente y rápido del mundo, empleado por las grandes compañías mundiales, de diferentes ámbitos y sectores empresariales, encargado de dar solución a los problemas de manera rápida y eficiente.

Además de brindar los mejores servicios en cuanto al solucionador matemático, Gurobi presenta también el mejor soporte para poder disfrutar al máximo de su poder de optimización. Desde su fundación en el año 2008, la empresa ha ido creciendo en cuanto a las operaciones a nivel global, llegando a superar los 2500 clientes.

Mi tutora del trabajo, Alicia, me aconsejó desde el primer momento que lo empleara debido a su gran capacidad resolutoria y a la simpleza en el manejo del mismo, así como el hecho de disponer de la licencia para su uso; haciendo que me decantara por esta opción sin dudar.



Figura 14. Logo de Gurobi

Partiendo de esta introducción realizada sobre el software que emplearemos para resolver el modelo, indicaré cuales serán las sentencias principales para transcribir, al lenguaje de programación, el problema matemático a tratar:

- **Creación del modelo:** se requiere la existencia de una variable que recoja la llamada a la librería de gurobi y la asignación al objeto Model; comando obligatorio en el programa.
- **Variables:** necesitaremos en este caso la función *addVar*, que estará correspondida con la variable que hemos creado anteriormente para el modelo, y que consta de una serie de campos a completar, en función de la necesidad del programador en cuestión.

Esta función puede recoger desde los valores máximos y mínimos de la variable hasta el coeficiente empleado en la función objetivo; el tipo de variable que se esté usando, es decir si es continua o binaria o la definición de la propia variable.

- **Restricciones:** para definir las necesitaremos la función *addConstr* y estarán relacionadas con el modelo de la misma manera que se ha explicado con las variables. Dentro de esta función se puede introducir otras funciones como son los sumatorios, cabiendo también la posibilidad de definir las si fuera preciso, para mayor claridad o comprensión.
- **Función objetivo:** para poder escribir la función objetivo, a la variable creada en el primer punto hay que relacionarle la función *setObjective*, la cuál consta de dos términos, encontrándose en el primero de ellos todos los componentes que abarque la propia función y, en el segundo, indicando la operación que debe realizar el programa, es decir, la minimización o maximización del modelo.

Para que se pueda compilar el documento, ha de asignarse la variable que recoge el modelo al término optimize(), ya que será en este momento cuando se resolverá el propio programa.

4.3. Funcionamiento del algoritmo

En este apartado se explicará que procedimiento se ha seguido Python para la resolución del modelo:

1. Declaración de los distintos datos, parámetros y constantes que han sido necesarios para la resolución del programa.

```
'Datos de entrada'
meses = ["Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo", "Junio", "Julio", "Agosto", "Septiembre", "Octubre", "Noviembre", "Diciembre"]
almacenes = ["Interno", "Externo1", "Externo2"]
nmeses = len(meses)
nalmacenes = len(almacenes)

'Demanda anual estimada de la empresa'
demanda=[380000,400000,420000,410000,440000,470000,500000,520000,490000,430000,390000,350000]
'Capacidad máxima almacenamiento interno'
a=200000
'Capacidad máxima almacenamiento primer almacén externo'
b=100000
'El coste fijo anual: 5200000 kg por 1,15 por 0,72 que representa la suma de los porcentajes de todos los costes'
c=4305600
'Costes de almacenamiento'
Cint=0.1
Cext1=0.2
Cext2=0.3
'Precio de venta'
Pvp=1.15
'Salario mensual operario'
Cper=1300
'Productividad humana teórica'
Prh=281600
```

Figura 15. Declaración de los datos de entrada del modelo.

2. Inicialización del modelo tal y como se ha comentado en el punto primero del anterior apartado.

```
m1 = gp.Model("Produccion")
```

3. Inicialización y posterior declaración de las variables de nuestro problema con ayuda de bucles for que han servido para recorrer el vector de los meses del año en el caso de los operarios y, además de este, recorrer también el vector los almacenes en el caso de las producciones.

```
'Variables'
x = {} #x_ij: Producción del tipo i en el mes j (36 variables)
y = {} #y_j: número de operarios en el mes j (12 variables)

for j in range (nmeses):
    y[j] = m1.addVar(vtype = gp.GRB.CONTINUOUS, name='Número de operarios en el mes %d' %j)
    for i in range (nalmacenes):
        x[i,j] = m1.addVar(vtype = gp.GRB.CONTINUOUS, name = 'Capacidad[%d,%d]' %(i,j))
```

Figura 16. Variables declaradas en el programa de resolución.

4. Con las variables ya definidas, se han determinado, con ayuda de bucles y sumatorios, cada una de las restricciones ya comentadas en el apartado de las restricciones de la sección anterior.

```
#Restricciones

for j in range (nmeses):
    m1.addConstr(x[0,j] <= a)
    m1.addConstr(x[1,j] <= b)
    m1.addConstr(sum(x[i,j] for i in range (nalmacenes)) >= 0)
    m1.addConstr(gp.quicksum(x[i,j] for i in range(nalmacenes)) <= Prh*y[j])
    m1.addConstr(Cper*y[j] <= (gp.quicksum(x[i,j] for i in range(nalmacenes))*Pvp/10))
    m1.addConstr(gp.quicksum(x[i,j] for i in range (nalmacenes)) >= demanda[j])
    m1.addConstr(sum(y[j] for i in range (nalmacenes)) >= 0)
```

Figura 17. Identificación de las restricciones en el lenguaje de programación.

5. Declaración de la función objetivo siguiendo los pasos comentados anteriormente, incluyendo, en el caso que nos ocupa, los sumatorios que han sido necesarios.

```
'FunciónObjetivo'
m1.setObjective(Cint*gp.quicksum(x[0,j] for j in range (nmeses))+ Cext1*gp.quicksum(x[1,j] for j in range (nmeses))
+Cper*gp.quicksum(y[j] for j in range (nmeses))+Cext2*gp.quicksum(x[2,j] for j in range (nmeses))
+c, gp.GRB.MINIMIZE)
```

Figura 18. Declaración de la función objetivo en el programa.

6. Sentencia comentada en el ultimo punto del apartado anterior para la resolución del problema:

```
m1.optimize()
```

7. Para terminar, se muestra por pantalla, con la ayuda de un bucle for, cada uno de los valores que han recogido las variables resultantes tras optimizar el problema.

```
for v in m1.getVars():
    print('%s = %g' % (v.varName, v.x))
```

Figura 19. Exposición de las soluciones del programa.

4.4. Casos de estudio

En este apartado se explicará cómo se han obtenido los datos que son empleados en el modelo, así como los diferentes escenarios o marcos productivos que se van a plantear y que, posteriormente, se resolverán.

4.4.1. Datos empleados

Puesto que anteriormente se han definido cuáles son los datos y parámetros que vamos a usar, procederemos ahora a explicar la obtención numérica de cada uno de los valores que serán aplicados en la resolución cuantitativa del modelo productivo, bien en las restricciones o bien en la función objetivo.

Productividad

Empezando por el conjunto de las constantes y de los parámetros, la productividad teórica que se ha impuesto en el modelo está regulada por diversos estudios de medida de tiempos y de métodos realizados en la planta de procesado, siendo necesaria formación profesional para poder realizar estos análisis.

Aunque sean las máquinas las encargadas de generar el producto, no se ha tenido en cuenta la productividad que proporcionan en el modelo ya que el rendimiento de éstas es mucho mayor que el de los operarios, siendo el cuello de botella los propios trabajadores.

En esta sección, cada uno de los operarios, trabajan de manera efectiva 8 horas diarias, componiéndose la propia jornada laboral de dos turnos diferentes de trabajo teniendo, por lo general, un mes natural, 22 días hábiles de trabajo.

Por tanto, tenemos un total de 352 horas mensuales que, multiplicadas por la productividad teórica, establecida en 700 Kg/H, nos da una productividad de 246.600 Kg /mes.

Definiremos a continuación dos productividades alcanzables por los operarios, las cuales serán empleadas en las distintas simulaciones para analizar diferentes casuísticas ya que la productividad es un parámetro que puede variar en función de diversos factores como la habilidad en el desempeño del trabajo de los operarios, la honestidad de los mismos, las averías de las máquinas, etc.

A la productividad anteriormente mencionada se le denominará de tipo 1.

Con la productividad de tipo 2 el teórico se fijará en 600 Kg/h, quedando el parámetro anterior como:

$$Prh = 211.200 \text{ Kg/mes}$$

Los escenarios en los que se ha usado la productividad tipo 2 son escenarios pesimistas ya que simulan una productividad inferior a la teórica.

En cambio, con la productividad tipo 3 el teórico se establecerá en 800 Kg/h, siendo éste un supuesto optimista, tomando el parámetro el valor:

$$Prh = 281.600 \text{ Kg/mes}$$

La realidad es que el valor de estas productividades depende en gran medida del rendimiento de las máquinas ya sea por el tiempo de avería, las horas de parada o el mantenimiento correctivo.

Los propios operarios suman en esta pérdida de productividad ya que, a lo anterior, se añade la falta ocasional de materia prima, la honestidad en el trabajo o la destreza individual en el desempeño de las correspondientes tareas o funciones.

Costes de almacenamiento y parámetros de capacidad

Enfocándonos ahora en los costes de almacenamiento, el valor del coste interno ha sido estimado ya que la empresa no dispone de un estudio concreto o de un histórico que aclare ciertamente en cuánto se podría tasar este parámetro.

Este coste, como veremos, es ciertamente inferior al coste externo ya que la mayoría de los factores que influyen en estos costes de almacenaje son inferiores en el interior de la propia empresa: el precio del suelo es menor, la estacionalidad de la demanda se realiza correctamente, el almacenaje es más compacto (existen pocas referencias), etc.

La capacidad de almacenamiento máxima existente dentro de las instalaciones es de 200.000 Kg/mes, tomando el parámetro a este valor en el modelo matemático.

Sin embargo, los costes de los congeladores externos están fijados por sus propietarios según la demanda y la disponibilidad del espacio libre. Por la ubicación, su forma de trabajo y las condiciones contractuales que ofrece resulta ser el primer almacén más rentable que el segundo.

La posibilidad de reunir las producciones en estos dos almacenes externos se debe a que el primero de ellos tiene una capacidad limitada a 100.000 Kg/mes, correspondiéndose este valor con el parámetro b, ya que tiene contratos con otros clientes.

$$C_{int} = 0,1 \frac{\text{€}}{\text{kg}} * \text{mes}$$

$$C_{ext1} = 0,2 \frac{\text{€}}{\text{kg}} * \text{mes}$$

$$C_{ext2} = 0,3 \frac{\text{€}}{\text{kg}} * \text{mes}$$

Remuneración de la mano de obra

Respecto al salario de los operarios, por el convenio existente de la empresa con los trabajadores en función de las horas trabajadas, los pluses por las horas nocturnas empleadas, las ausencias o retrasos y demás variables; de manera aproximada, el sueldo bruto mensual se ha fijado en 1.300 €.

$$C_{per} = 1300 \text{ €/mes}$$

Precio de venta

En el precio de venta del producto entran en juego factores muy importantes como son la ley de la oferta y la demanda, la posible entrada o salida de clientes, las mejoras en el servicio de calidad al cliente o la mejora de la productividad que provoque una reducción de los costes. El valor del producto queda fijado en 1,15 €/Kg.

$$P_{vp} = 1,15 \text{ €/Kg}$$

Coste fijo

Respecto al coste fijo, asociado al parámetro c, se recogerán todos los costes que se enumeran a continuación y que, al no tener relación directa con las variables, se han anotado de la siguiente manera:

El coste de mantenimiento recoge la proporción de operarios encargados de realizar los mantenimientos preventivos y correctivos y el coste de los posibles recambios que haya que colocar por desgaste o rotura, representando este conjunto un 7% del precio de venta.

Están dimensionadas también la luz y el agua consumidas en esta sección respecto a la del total de la empresa, reflejado esto en un 5% del precio de venta.

El coste asociado a la materia prima, es decir, habiendo alcanzado la materia prima este punto de la cadena productiva, la carne acumula un coste tras las etapas de la matanza y del despiece del pavo.

El coste de la carne suele representar el 50% del precio de venta. Este porcentaje, en gran medida, depende del producto que se esté tratando ya que cada una de las partes del animal están valoradas de distinta manera.

Tampoco se ve reflejado en este apartado el coste logístico o el de expedición del producto ya que este coste se recoge de manera íntegra en la sección de expedición de la empresa.

Identificar el número de movimientos que realizan con las cargas, así como el tiempo invertido en cada una de estas acciones o el número concreto de trabajadores ocupados en mover el producto que estamos analizando es bastante complejo. Se asigna el 10% del precio de venta a este coste.

En resumen, el parámetro c anterior vendrá dado por el producto de los kilos totales vendidos durante el año por el precio de venta en cuestión y por la suma de los anteriores porcentajes enumerados. Esto mismo se recoge en el código del programa de manera ilustrativa.

Demanda

Centrándonos ahora en la demanda, he tomado los datos que me han facilitado desde el departamento comercial de la propia empresa, siguiendo la base estadística de las ventas del año anterior, es decir, del 2021, agrupando todos los artículos que se producen en esta sección de la empresa.

No se ha ampliado este período de análisis con los datos del 2020 ya que la pandemia hizo fluctuar mucho las características de los mercados siendo poco fiables los valores resultantes.

A lo anterior, sumamos el estudio de mercado realizado para el presente año (con las consecuentes entradas y salidas de clientes), quedando una estimación final del volumen total de la demanda al que podría estar sujeto la empresa a lo largo del año. Mostrando esto de forma gráfica, queda de la siguiente manera:

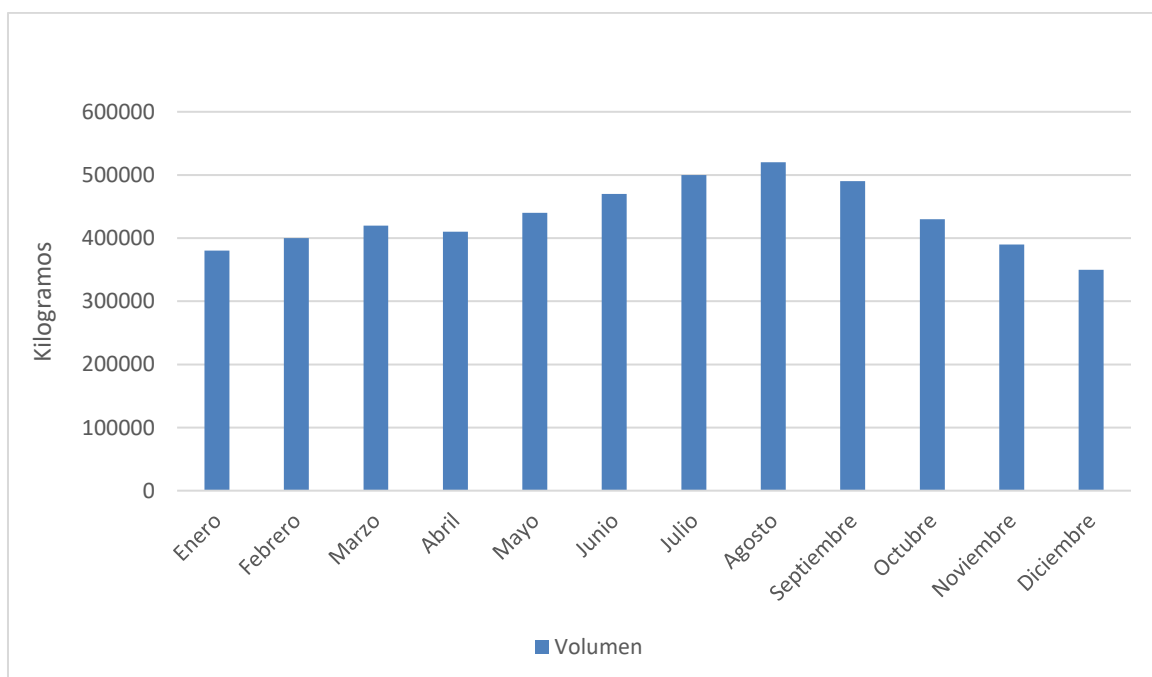


Figura 20. Gráfica de la demanda total estimada para el presente año 2022.

Cabe resaltar que la empresa tendrá mayores problemas para el almacenamiento en los meses de verano, ya que se observa claramente como aumenta la demanda de estos artículos en este período.

En los casos de estudio, esta demanda será considerada como “demanda normal”, es decir, la demanda que se prevee tener durante el año en la empresa, siendo los valores exactos los que se adjuntan en la tabla siguiente:

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
380.000 Kg	400.000 Kg	420.000 Kg	410.000 Kg	440.000 Kg	470.000 Kg
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
500.000 Kg	520.000 Kg	490.000 Kg	430.000 Kg	390.000 Kg	350.000 Kg

Tabla 1. Estimación mensual de la demanda de carne de pavo en el 2022.

Para los diferentes escenarios que se estudiarán próximamente, se tendrá en cuenta también cómo fluctúa el volumen de pedidos. De este modo, se planteará un caso optimista donde la demanda mensual crezca un 3% respecto a la demanda normal, y uno pesimista donde las ventas disminuyan un 5% sobre esta misma demanda.

Se muestran en las tablas siguientes los resultados de estas valoraciones:

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
391.400 Kg	412.000 Kg	432.600 Kg	422.300 Kg	452.300 Kg	484.100 Kg
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
515.000 Kg	535.600 Kg	504.700 Kg	442.900 Kg	401.700 Kg	360.500 Kg

Tabla 2. Estimación demanda mensual optimista para el 2022.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
361.000 Kg	380.000 Kg	399.000 Kg	389.500 Kg	418.000 Kg	446.500 Kg
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
475.000 Kg	494.000 Kg	465.500 Kg	408.500 Kg	370.500 Kg	332.500 Kg

Tabla 3. Estimación demanda mensual pesimista para el 2022.

El coste fijo c anteriormente comentado cambiará de valor en función de cuál sea la demanda del escenario productivo analizado. Quedarían, para cada una de las previsiones de venta, los siguientes valores:

$$c1 = 4.305.600 \text{ €}$$

$$c2 = 4.434.768 \text{ €}$$

$$c3 = 4.090.320 \text{ €}$$

4.4.2. Escenarios productivos

Procederemos ahora a plantear, con los datos ya definidos en el apartado anterior, cada uno de los casos de estudio que pueden tener lugar a lo largo del intervalo descrito. Partimos de la base que se muestra a continuación:

Escenario	Productividad	Demanda
1	Tipo 1	Normal
2		Optimista
3		Pesimista

4	Tipo 2	Normal
5		Optimista
6		Pesimista
7	Tipo 3	Normal
8		Optimista
9		Pesimista

Tabla 4. Escenarios de estudio planteados para su correspondiente análisis.

Cada uno de los escenarios se corresponde con la asignación de un tipo de productividad y un tipo de demanda. La combinación de todas las posibilidades da lugar al conjunto de casos, establecidos en nueve, que analizaremos y resolveremos en el punto siguiente.

Tanto las capacidades máximas de los almacenes, como el salario de los operarios, los costes de almacenamiento y el precio de venta no variarán en las sucesivas simulaciones, siendo estos valores, los ya comentados anteriormente:

$$C_{int} = 0,1 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} * \text{mes} \quad C_{ext1} = 0,2 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} * \text{mes} \quad C_{ext2} = 0,3 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} * \text{mes}$$

$$C_{per} = 1300 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \quad P_{vp} = 1,15 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} \quad a = 200.000 \text{ Kg} \quad b = 100.000 \text{ Kg}$$

Se adjunta una tabla similar a la anterior que recoge el valor que toman cada uno de los parámetros variables en los diferentes escenarios:

Escenario	Productividad	Demanda
1	<i>Prh = 246.600 Kg/mes</i>	5.200.000 Kg / Año
2		5.356.000 Kg / Año
3		4.940.000 Kg / Año

4	$Prh = 211.200 \text{ Kg/mes}$	5.200.000 Kg / Año
5		5.356.000 Kg / Año
6		4.940.000 Kg / Año
7	$Prh = 281.600 \text{ Kg/mes}$	5.200.000 Kg / Año
8		5.356.000 Kg / Año
9		4.940.000 Kg / Año

Tabla 5. Valores de la productividad y de la demanda en los escenarios productivos.

4.5. Resultados

Una vez realizados todos los pasos necesarios en el software de programación, al ejecutar la simulación del modelo, el programa ha devuelto una serie de resultados los cuáles han sido copiados en la hoja de cálculo Excel, facilitando de esta manera el trabajo y análisis de los mismos.

Como indicación, puesto que el número de operarios debe ser un número entero positivo y no un número real como muestra Python en las distintas soluciones dadas, se ha decidido realizar una operación de redondeo en la misma hoja de cálculo.

Este redondeo parte de un prueba lógica aplicada en la propia empresa ya que, si se estudia la elaboración de un nuevo producto o se realiza un reajuste de una línea de producción en base a unos datos o parámetros ya establecidos, podríamos obtener dos resultados:

- 1) Si la parte decimal del equilibrio dado por el modelo iguala o supera el 5, el redondeo se realiza al número entero siguiente.
- 2) Si, por el contrario, la parte decimal del equilibrio arroja un número inferior a 5, el redondeo se realiza sobre el número entero en cuestión.

En el presente apartado se procederá a mostrar todos los resultados obtenidos en las simulaciones de los casos de estudio comentados en el apartado anterior, ilustrando que valores alcanzan las variables del problema y la función objetivo.

También se expondrán los ingresos obtenidos con las ventas de las producciones y el beneficio general alcanzado por la empresa en cada uno de los casos.

4.5.1. Primer Escenario

Este primer escenario surge de emplear en el modelo la productividad de tipo 1 con la demanda normal. Los resultados obtenidos son:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	80.000	1,54
Febrero	200.000	100.000	100.000	1,62
Marzo	200.000	100.000	120.000	1,70
Abril	200.000	100.000	110.000	1,66
Mayo	200.000	100.000	140.000	1,78
Junio	200.000	100.000	170.000	1,90
Julio	200.000	100.000	200.000	2,03
Agosto	200.000	100.000	220.000	2,11
Septiembre	200.000	100.000	190.000	1,99
Octubre	200.000	100.000	130.000	1,74
Noviembre	200.000	100.000	90.000	1,59
Diciembre	200.000	100.000	50.000	1,41

Tabla 6. Solución estimada del primer escenario.

El valor aportado por la función objetivo tras la simulación es:

Func.Obj	5.293.012,81 €
-----------------	-----------------------

Una vez realizado el redondeo comentado, la planificación del caso quedaría:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	80.000	2
Febrero	200.000	100.000	100.000	2
Marzo	200.000	100.000	120.000	2
Abril	200.000	100.000	110.000	2
Mayo	200.000	100.000	140.000	2
Junio	200.000	100.000	170.000	2
Julio	200.000	100.000	200.000	2
Agosto	200.000	100.000	220.000	2
Septiembre	200.000	100.000	190.000	2
Octubre	200.000	100.000	130.000	2
Noviembre	200.000	100.000	90.000	2
Diciembre	200.000	100.000	50.000	1

Tabla 7. Solución final del primer escenario.

La función objetivo sufriría modificaciones al cambiar el número de operarios, siendo el valor final:

Func.Obj	5.295.500,00 €
-----------------	-----------------------

Los ganancias obtenidas por las ventas, en este caso, son las resultantes de multiplicar la demanda de este período por el precio de venta ya fijado, serían:

Ingreso ventas	5.980.000,00 €
-----------------------	-----------------------

El beneficio queda como la diferencia entre los dos valores anteriores:

Beneficio anual	684.500,00 €
------------------------	---------------------

4.5.2. Segundo Escenario

Para resolver este segundo escenario usaremos la productividad de primer tipo con la demanda optimista, arrojando la simulación los siguientes valores ya redondeados:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	91.400	2
Febrero	200.000	100.000	112.000	2
Marzo	200.000	100.000	132.600	2
Abril	200.000	100.000	122.300	2
Mayo	200.000	100.000	152.300	2
Junio	200.000	100.000	184.100	2
Julio	200.000	100.000	215.000	2
Agosto	200.000	100.000	235.600	2
Septiembre	200.000	100.000	204.700	2
Octubre	200.000	100.000	142.900	2
Noviembre	200.000	100.000	101.700	2
Diciembre	200.000	100.000	60.500	1

Tabla 8. Solución final del segundo escenario.

La función objetivo toma el siguiente valor:

Func.Obj	5.471.198,00 €
-----------------	-----------------------

Los ingresos resultantes son:

Ingreso ventas	6.159.400,00 €
-----------------------	-----------------------

El beneficio del segundo escenario es:

Beneficio anual	688.202,00 €
------------------------	---------------------

4.5.3. Tercer Escenario

La resolución del tercer caso de estudio, resultante de combinar la productividad de tipo 1 con la demanda pesimista. Tras redondear el número de operarios, la estructura óptima de la sección sería:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	61.000	1
Febrero	200.000	100.000	80.000	2
Marzo	200.000	100.000	99.000	2
Abril	200.000	100.000	89.500	2
Mayo	200.000	100.000	118.000	2
Junio	200.000	100.000	146.500	2
Julio	200.000	100.000	175.000	2
Agosto	200.000	100.000	194.000	3
Septiembre	200.000	100.000	165.500	2
Octubre	200.000	100.000	108.500	2
Noviembre	200.000	100.000	70.500	2
Diciembre	200.000	100.000	32.500	1

Tabla 9. Solución final del tercer escenario.

La función objetivo arroja como resultado un valor de:

Func.Obj	5.002.220,00 €
-----------------	-----------------------

La recaudación obtenida por las ventas en este tercer escenario es:

Ingreso ventas	5.681.000,00 €
-----------------------	-----------------------

De esta manera, el beneficio alcanzado en este caso es:

Beneficio anual	678.780,00 €
------------------------	---------------------

4.5.4. Cuarto Escenario

Empleamos, para resolver este caso, la productividad de tipo 2 con la demanda normal, teniendo como resultado la siguiente table. Una vez se ha redondeado la solución anterior, la solución óptima es:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	80.000	2
Febrero	200.000	100.000	100.000	2
Marzo	200.000	100.000	120.000	2
Abril	200.000	100.000	110.000	2
Mayo	200.000	100.000	140.000	2
Junio	200.000	100.000	170.000	2
Julio	200.000	100.000	200.000	2
Agosto	200.000	100.000	220.000	2
Septiembre	200.000	100.000	190.000	2
Octubre	200.000	100.000	130.000	2
Noviembre	200.000	100.000	90.000	2
Diciembre	200.000	100.000	50.000	2

Tabla 10. Solución final del cuarto escenario.

Las función objetivo final queda de la siguiente manera:

Func.Obj	5.296.800,00 €
-----------------	-----------------------

La liquidez conseguida por la venta de las producciones a lo largo del año se fija en:

Ingreso ventas	5.980.000,00 €
-----------------------	-----------------------

El beneficio de la empresa, para la productividad y demanda comentadas, es:

Beneficio anual	683.200,00 €
------------------------	---------------------

4.5.5. Quinto Escenario

Para una demanda optimista y una productividad de segundo tipo, el modelo de programación arroja el siguiente resultado. Como en los casos anteriores, tras redondear el número de operarios, se producen algunas modificaciones, quedando el resultado final:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	91.400	2
Febrero	200.000	100.000	112.000	2
Marzo	200.000	100.000	132.600	2
Abril	200.000	100.000	122.300	2
Mayo	200.000	100.000	152.300	2
Junio	200.000	100.000	184.100	2
Julio	200.000	100.000	215.000	2
Agosto	200.000	100.000	235.600	3
Septiembre	200.000	100.000	204.700	2
Octubre	200.000	100.000	142.900	2
Noviembre	200.000	100.000	101.700	2
Diciembre	200.000	100.000	60.500	2

Tabla 11. Solución final del quinto escenario.

La función objetivo, tras el redondeo realizado, muestra un coste de:

Func.Obj	5.473.798,00 €
-----------------	-----------------------

Para una demanda optimista, los ingresos aportados por las ventas son:

Ingreso ventas	6.159.400,00 €
-----------------------	-----------------------

El beneficio de la sección, para este ejercicio económico y con las características mencionadas sería:

Beneficio anual	685.602,00 €
------------------------	---------------------

4.5.6. Sexto Escenario

El resultado obtenido tras simular el modelo con la productividad de tipo 2 y una demanda pesimista es la siguiente. Puestos a redondear la solución estimada del problema, la tabla final queda:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	61.000	2
Febrero	200.000	100.000	80.000	2
Marzo	200.000	100.000	99.000	2
Abril	200.000	100.000	89.500	2
Mayo	200.000	100.000	118.000	2
Junio	200.000	100.000	146.500	2
Julio	200.000	100.000	175.000	2
Agosto	200.000	100.000	194.000	2
Septiembre	200.000	100.000	165.500	2
Octubre	200.000	100.000	108.500	2
Noviembre	200.000	100.000	70.500	2
Diciembre	200.000	100.000	32.500	2

Tabla 12. Solución final del sexto escenario.

Los costes que proporciona la función objetivo en cada una de las opciones anteriores son:

Func.Obj	5.003.520,00 €
-----------------	-----------------------

Como ya se ha mostrado anteriormente, para una demanda optimista los ingresos obtenidos por las ventas son:

Ingreso ventas	5.681.000,00 €
-----------------------	-----------------------

De esta manera, el beneficio que aporta este escenario productivo es:

Beneficio anual	677.480,00 €
------------------------	---------------------

4.5.7. Séptimo Escenario

La simulación del modelo de programación para una productividad de tipo 3 y una demanda normal, muestra los siguientes resultados. En este caso, en función del umbral límite establecido, la tabla con la solución del escenario queda de la siguiente manera:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	80.000	1
Febrero	200.000	100.000	100.000	1
Marzo	200.000	100.000	120.000	1
Abril	200.000	100.000	110.000	1
Mayo	200.000	100.000	140.000	2
Junio	200.000	100.000	170.000	2
Julio	200.000	100.000	200.000	2
Agosto	200.000	100.000	220.000	2
Septiembre	200.000	100.000	190.000	2
Octubre	200.000	100.000	130.000	2
Noviembre	200.000	100.000	90.000	1
Diciembre	200.000	100.000	50.000	1

Tabla 13. Solución final del séptimo escenario.

Cabe indicar de nuevo que esta modificación realizada con el número de operarios tiene su repercusión en el valor final dado por la función objetivo, quedando ésta como se observa a continuación:

Func.Obj	5.296.800,00 €
-----------------	-----------------------

Si procedemos a calcular qué ingreso anual nos proporcionan las ventas de los kilos producidos, obtenemos lo siguiente:

Ingreso ventas	5.980.000,00 €
-----------------------	-----------------------

Llegados a este punto, con las condiciones dadas para este caso, la empresa obtendría en este ejercicio económico un beneficio de:

Beneficio anual	683.200,00 €
------------------------	---------------------

4.5.8. Octavo Escenario

El modelo productivo provisional tras combinar la productividad de tercer tipo con una demanda optimista queda. Aplicando el redondeo ya explicado a la solución aportada por la simulación, la tabla con los resultados concluyentes es:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	91.400	1
Febrero	200.000	100.000	112.000	1
Marzo	200.000	100.000	132.600	2
Abril	200.000	100.000	122.300	1
Mayo	200.000	100.000	152.300	2
Junio	200.000	100.000	184.100	2
Julio	200.000	100.000	215.000	2
Agosto	200.000	100.000	235.600	2
Septiembre	200.000	100.000	204.700	2
Octubre	200.000	100.000	142.900	2
Noviembre	200.000	100.000	101.700	1
Diciembre	200.000	100.000	60.500	1

Tabla 14. Solución final del octavo escenario

La solución dada por la función objetivo en ambos casos son:

Func.Obj	5.465.998,00 €
-----------------	-----------------------

La demanda optimista genera un total de ingresos valorados en:

Ingreso ventas	6.159.400,00 €
-----------------------	-----------------------

Teniendo los ingresos y los costes para este caso de simulación, el beneficio final de la empresa es:

Beneficio anual	693.402,00 €
------------------------	---------------------

4.5.9. Noveno Escenario

Para el último caso de estudio emplearemos una productividad de tipo 3 y una demanda pesimista. Realizando el redondeo, con el criterio antes definido, la solución final resulta:

Meses (j)	Almacén Int (x_{1j})	Almacén Ext1 (x_{2j})	Almacén Ext2 (x_{3j})	Operarios (y_j)
Enero	200.000	100.000	61.000	1
Febrero	200.000	100.000	80.000	1
Marzo	200.000	100.000	99.000	1
Abril	200.000	100.000	89.500	1
Mayo	200.000	100.000	118.000	1
Junio	200.000	100.000	146.500	2
Julio	200.000	100.000	175.000	2
Agosto	200.000	100.000	194.000	2
Septiembre	200.000	100.000	165.500	2
Octubre	200.000	100.000	108.500	1
Noviembre	200.000	100.000	70.500	1
Diciembre	200.000	100.000	32.500	1

Tabla 15. Solución final del noveno escenario

El coste de la función objetivo se ve reflejado en un importe de:

Func.Obj	4.993.120,00 €
-----------------	-----------------------

Los ingresos percibidos por las ventas, a lo largo del año, para esta demanda es:

Ingreso ventas	5.681.000,00 €
-----------------------	-----------------------

Las ganancias obtenidas en esta sección de la empresa con este plan de producción son las siguientes:

Beneficio anual	687.880,00 €
------------------------	---------------------

4.6. Discusión y comparación de los resultados obtenido

Tras haber resuelto todos los escenarios, se discutirán a continuación los resultados obtenidos anteriormente tras las sucesivas simulaciones. Con la ayuda de nuevo de Excel, ilustraremos de manera clara cuales serán las decisiones más favorables que debería llevar a cabo la empresa.

Para ello, como hemos ido calculando el beneficio económico en cada caso, representaremos ahora en un gráfica esta serie de valores:

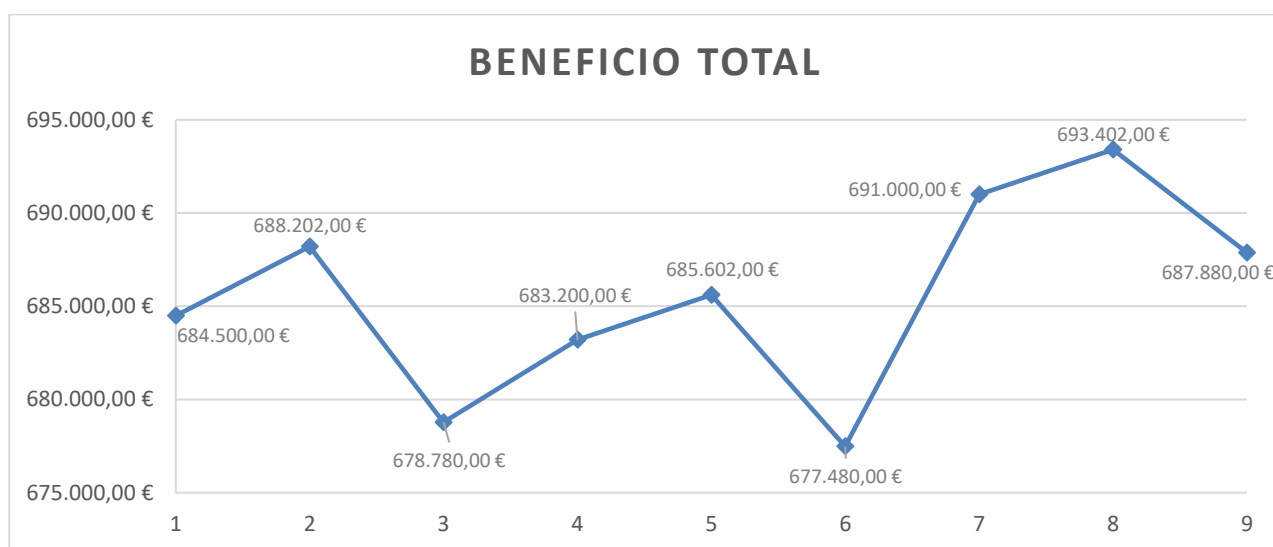


Figura 21. Variación del beneficio económico de la empresa en cada escenario.

Se observa de forma clara que el escenario más productivo es el octavo, necesitando alcanzar una productividad de 800 Kg/H por operario y una demanda optimista, es decir, las ventas deberían incrementar un 3% su valor estimado para el presente año. Con todo esto, se alcanzaría un beneficio de 693.402,00 €.

Cierto es que el escenario siete también arroja un beneficio significativo en comparación con el resto de casos simulados. Con el empleo del coeficiente de correlación lineal de Excel, que mide el grado de relación entre un conjuntos de datos, se ha realizado un análisis más exhaustivo de estos resultados.

Este coeficiente parte de la formula siguiente:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

donde se han enfrentado la productividad empleada y la demanda existente (variable x) con el beneficio generado (variable y) en cada uno de los casos.

Este estudio arroja, respectivamente, una correlación de:

0,71 para la productividad respecto al beneficio económico.

0,64 para la demanda respecto al beneficio económico.

Cuando este parámetro es menor que - 0,6 o mayor que + 0,6 nos indica que existe correlación entre las variables. Puesto que ambas son positivas y mayores que 0,6 podemos afirmar que a medida que crece la productividad o la demanda, también lo hace el beneficio económico; ambas se mueven en el mismo sentido.

Se adjuntan ahora dos gráficas con la tendencia seguida por el beneficio económico según el grado de productividad de la sección y el volumen de pedidos recibidos por la empresa, respectivamente.

Cada punto coincide con los valores obtenidos en cada uno de los escenarios simulados, para cada tipo de productividad se obtienen tres beneficios diferentes. De igual manera, para cada demanda simulada, se obtienen también tres beneficios diferentes.

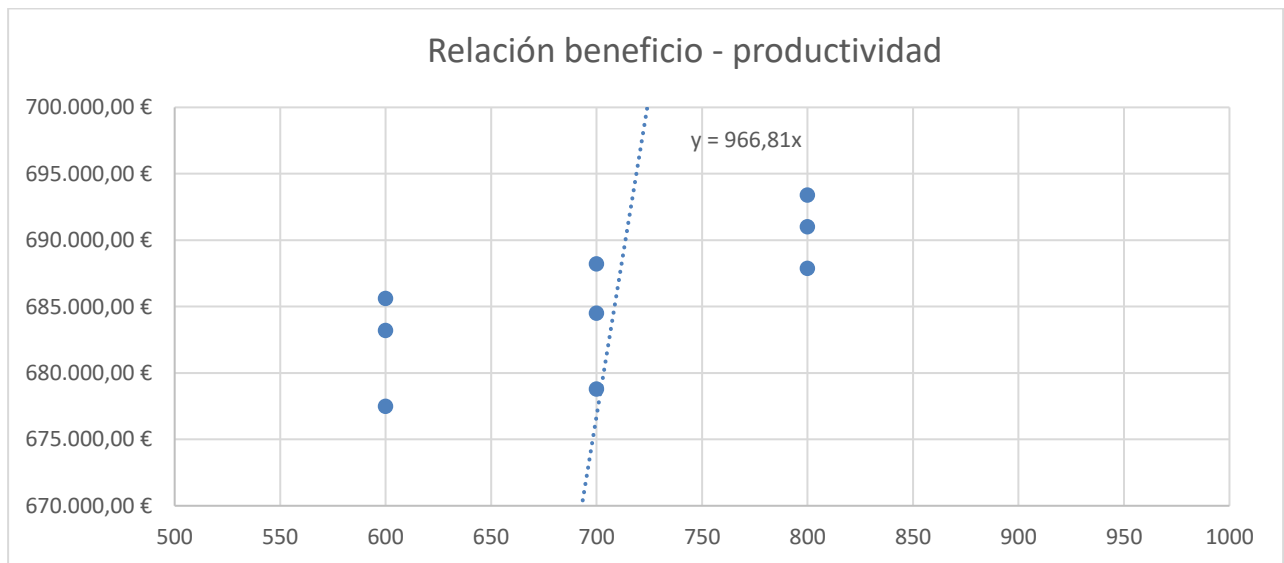


Figura 22. Tendencia del beneficio económico en función de la productividad

En la primera se observa que por cada kilogramo de carne que se produzca a la hora, el beneficio económico se verá incrementado en 966, 81 €.

En la segunda, por cada kilogramo que consiga expedir la empresa, y originado en esta sección, se obtiene un beneficio de 0,1326 €.

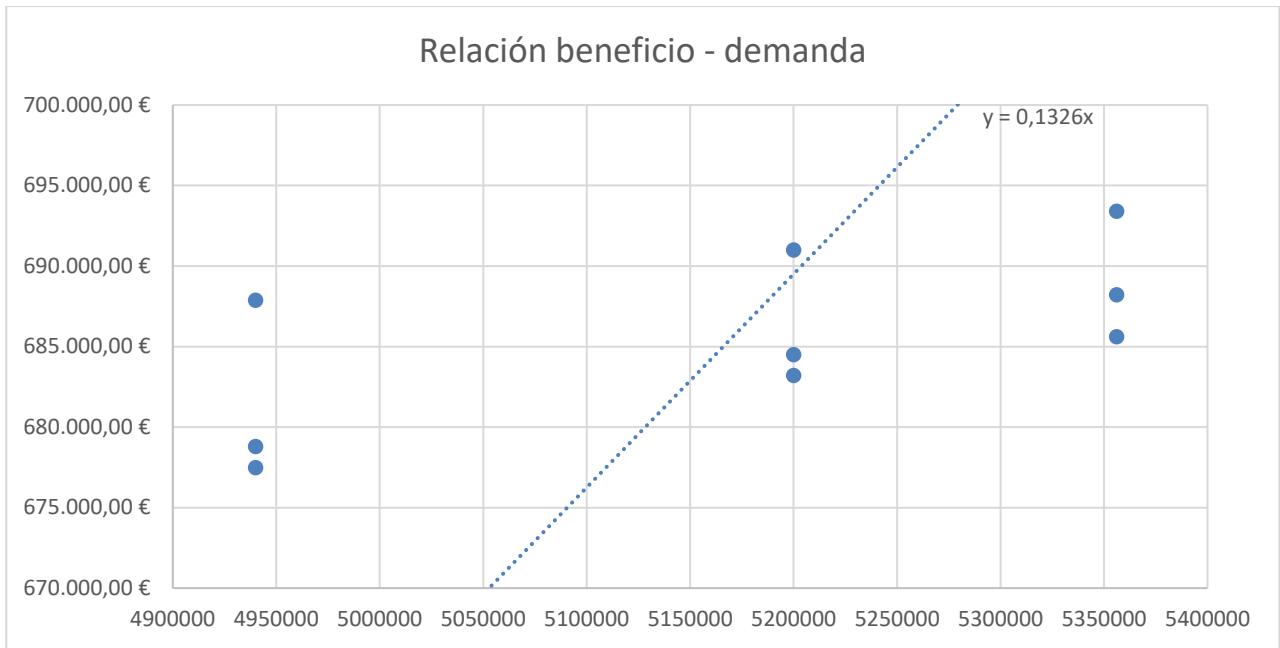


Figura 23. Tendencia del beneficio económico en función de la demanda.

Observando el equilibrio anual de operarios para cada uno de los escenarios, es decir, si sumamos en cada caso el número de trabajadores mensuales dados por el modelo y lo dividimos entre el número de meses que conforman el año, la figura representativa quedaría de la siguiente manera:

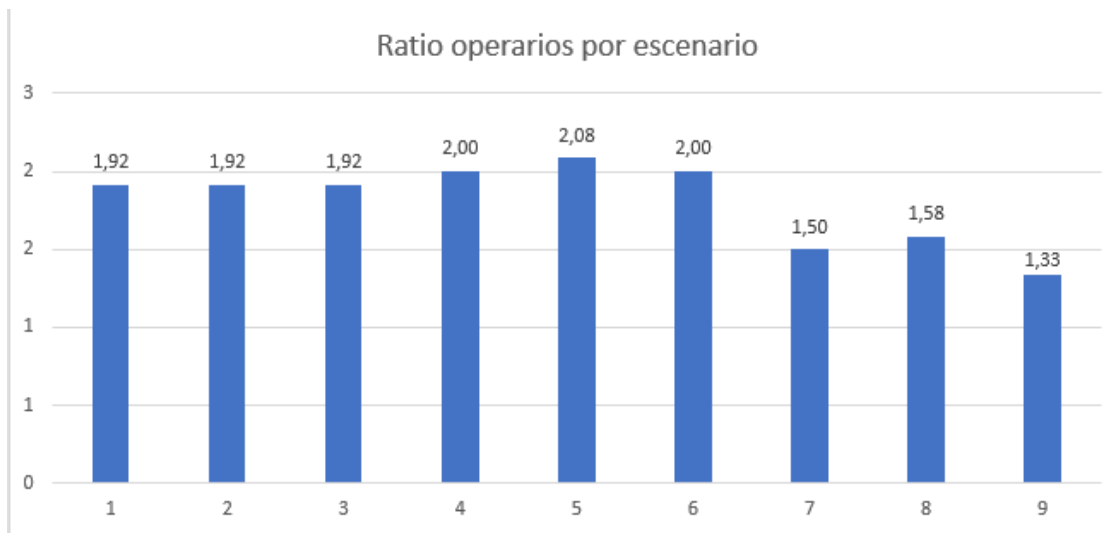


Figura 24. Variación del número de operarios mensuales necesarios en cada uno de los escenarios.

Con estos resultados, los casos donde se requieren menor número de trabajadores coinciden con aquellos donde la productividad es mayor.

El tener una plantilla más corta conlleva un aumento directo de los beneficios ya que con un número menor de trabajadores, el número de sueldos a retribuir se ve mermado; esto es, los gastos operativos y generales se ven reducidos, aumentando el margen de beneficios.

A su vez, a la empresa le conviene disminuir los problemas con cada uno de los individuos, por lo que, con el descenso del número de operarios, se reducen también las distintas personalidades con las que tratar.

De la misma manera, esta cuestión beneficia a la flexibilidad de la sección ya que las modificaciones o cambios pertinentes que sean necesarios realizar en la producción, los cambios de turno o las correcciones individuales se realizan en un menor período de tiempo.

Por último, la calidad puede verse afectada ya que con un menor número de operarios, el seguimiento del trabajo puede ser mayor, por lo que, el producto está más controlado y la supervisión de los procesos se ve aumentada.

4.7. Propuesta de mejora del modelo

Una vez han sido simulados los escenarios planteados y se ha llevado a cabo la discusión de los resultados obtenidos, se procederá a abordar una posible modificación de los parámetros que recogen los costes de almacenamiento externo en la función objetivo, para dotar al modelo de una veracidad y un realismo aún mayor.

Con esto, se introducirá la no linealidad de estos costes ya mencionados anteriormente, necesitando, a su vez, un software especializado para poder resolver esta categoría de modelos.

Para ello, al primer congelador externo, cuya capacidad de aprovisionamiento está limitada a 200.000 kg mensuales, le corresponderá una tarifa unitaria que variará mensualmente según la cantidad que se almacene y que seguirá la función logarítmica:

$$C_{ext1} = \frac{1}{\ln x}$$

donde x representará, como hemos comentado, la cantidad de carne que almacenará la empresa en dicho almacén externo.

Se adjunta a continuación un gráfico de como evoluciona dicha función de acuerdo con los kilos almacenados:

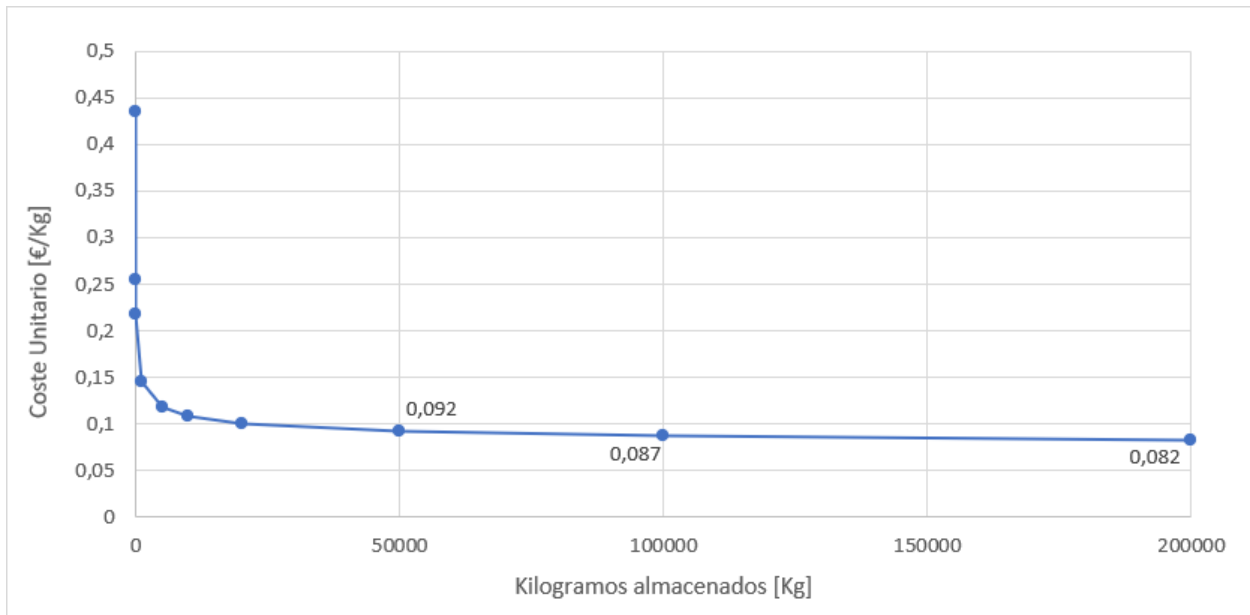


Figura 25. Evolución del coste unitario de la carne en función de los kilos almacenados en el primer almacén externo.

Como se puede observar, si se decide almacenar 50.000 kilogramos, el coste asciende a 9,24 céntimos por cada kilogramo, mientras que, si esta cifra asciende hasta los 200.000 kg, el precio unitario cae hasta los 8,04 céntimos el kilogramo.

El segundo almacén externo muestra una oferta diferente al almacén externo uno, aunque ambas dependen de los kilos son necesarios almacenar. Puesto que la capacidad en este congelador es ilimitada, la formula ahora se corresponde con la siguiente expresión:

$$C_{ext2} = \frac{1}{\sqrt[4]{x}}$$

Si se envían 50.000 kilogramos de carne a este congelador, el gasto repercutido a la empresa es de 6,68 céntimos el kilogramo. Por el contrario, si el volume alcanza los 200.000 kilogramos, la tarifa cae hasta los 4,73 céntimos el kilogramo.

De la misma manera que se ha procedido anteriormente, se adjunta una imagen a continuación de la variación del coste en este caso:

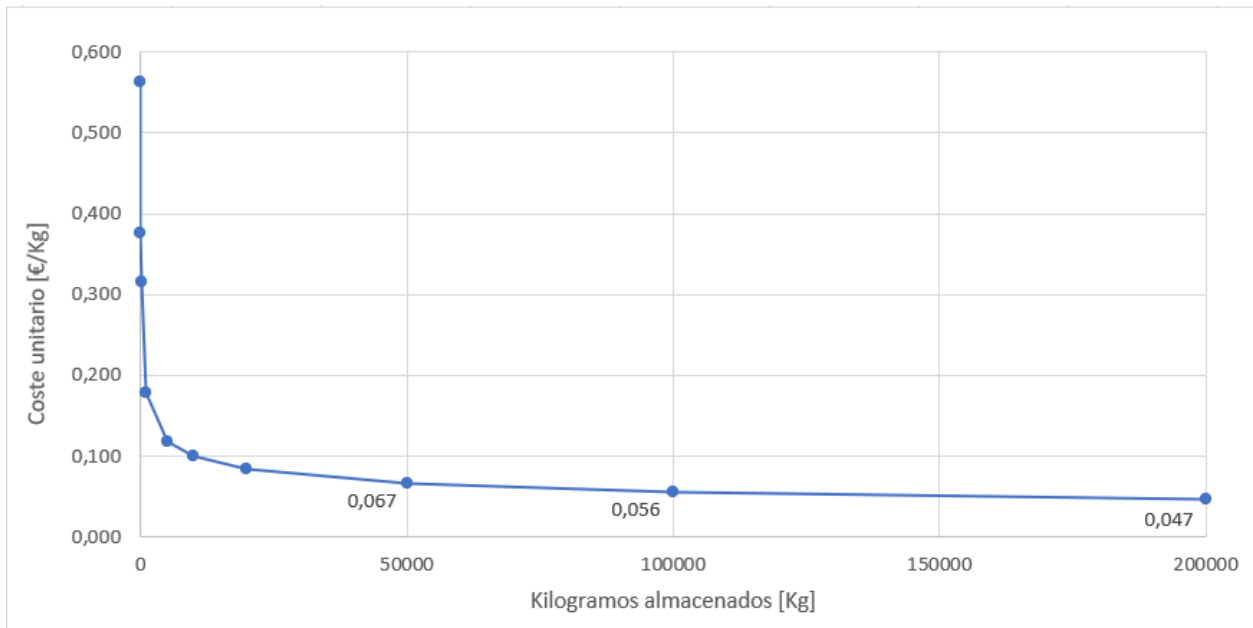


Figura 26. Evolución del coste unitario de la carne en función de los kilos almacenados en el segundo almacén externo.

Con estas dos alternativas planteadas, los congeladores externos, debido al alto coste ofrecido cuando el volumen de conservación es pequeño, se garantizan un acumulo mínimo por parte de la empresa que les permita obtener una cierta rentabilidad en el negocio y un margen de maniobra siempre positivo.

Procavi, por el contrario, cuanto mayor sea el volumen de kilos que decida almacenar de manera externa, el precio de este coste se verá reducido incluso por debajo de los propias tarifas emitidas en la simulación del modelo productivo que nos ha dado lugar en el trabajo.

Así, la función objetivo del modelo se ve afectada de la siguiente manera:

$$c + \text{Min } C_{int} * \sum_{j=1}^{12} x_{1,j} + \sum_{j=1}^{12} \frac{1}{\ln x_{2,j}} * x_{2,j} + \sum_{j=1}^{12} \frac{1}{\sqrt[4]{x_{3,j}}} * x_{3,j} + C_{per} * \sum_{j=1}^{12} y_j$$

5. CONCLUSIONES

Llegados a este punto, estamos en disposición de afirmar que el problema de optimización de la producción acaecido por la sección de la carne separada mecánicamente de la empresa se ha resuelto. Como se ha comprobado en el punto anterior, la empresa, que tiene como base al escenario uno, obtendrá unos beneficios que superan los 680.000 €.

Tras resolver todos los casos propuestos y discutir los resultados obtenidos, la empresa debería evolucionar hacia una ampliación de la cuota de mercado anual que favorezca el número de ventas y con ello, el incremento de los beneficios.

Cierto es que, si se requiere de igual manera aumentar la productividad de los operarios, sería necesario revisar la obtención del producto de manera que éstos sean capaces de pasar de los 700 Kg/H actuales a una cifra más competitiva, provocando así una ventaja comercial que se vea reflejada en los precios de venta y en los beneficios propios.

Esto sería posible si se facilitase la operativa actual de recogida del producto o, por el contrario, invirtiendo en un método más automatizado que dé la posibilidad a la empresa a desprenderse de algún trabajador, ya que como se ha comentado previamente, las máquinas tienen mayor capacidad productiva pero el sistema está congestionado por los operarios.

Resulta de interés comentar el hecho de que, aunque se obtengan beneficios en todos los escenarios simulados, no necesariamente la optimización del modelo es plena ya que no hay que pasar por alto que parte del almacenamiento es subcontratado (ambos congeladores externos) por lo que, el margen de beneficio es aún mayor al actual.

Por ello, sería conveniente para la empresa realizar un estudio sobre la ampliación de los almacenes propios, consiguiendo, de esta manera, ubicar todas las producciones en espacios cercanos, con la comodidad que esto conlleva, pasando, eso sí, toda la responsabilidad del almacenamiento a la propia empresa.

Estas dos opciones comentadas pueden ser unas líneas de trabajo a poder seguir bastante prósperas y en las cuáles se pueden obtener resultados de manera inmediata.

El desarrollo de este modelo, al fin y al cabo, no es más que un primer paso hacia un análisis más profundo del trabajo realizado en esta sala, de modo que, con el tiempo, se puedan ir incluyendo una mayor cantidad de datos o parámetros que afinen la solución del modelo a la vida diariamente en la empresa.

La mayor limitación en el desarrollo del mismo ha sido la nula homogeneidad del conjunto de productos ya que, dado que se dispone de una amplia gama de artículos y existen muchas combinaciones a la hora de elaborar las pastas en las máquinas, esto provoca un retraso inmenso a la hora de definir que máquina produce un tipo de carne u otro, o qué cantidad de cada clase es necesario introducir, debido a la frecuencia de salida del tipo de carne en cuestión del despiece.

Con esto me refiero a que no se puede hacer una planificación fiable del producto necesario en la sala del CSM que permita cambiar la estructura actual de llegada del producto o que conlleve algún ahorro en horas de trabajo efectivas, de tal manera que se pudieran agrupar los artículos a producir en función de los turnos, se podrían optimizar dichas horas.

A pesar de esto, con la elaboración de un modelo productivo como el del trabajo se ve más de cerca las ventajas que puede conllevar el estudiar y definir unas ideas sobre algo muy particular dentro de una empresa ya que surgen mil ideas a la hora de mejorar y tratar de manera más certera los datos que se analizan, buscando una fiabilidad que reporte unos beneficios y una optimización que sea plausible.

De igual manera, cualquier movimiento o cambio que se realice en empresas de este calado, por muy pequeño que sea, genera una repercusión bastante interesante tanto en la cadena productiva como en los artículos propiamente elaborados.

6. BIBLIOGRAFÍA

aliter. (21 de Septiembre de 2020). Obtenido de Túneles de Congelación: <https://alitersoluciones.es/tuneles-de-congelacion/>

Estrategias de inversión. (3 de Diciembre de 2021). Obtenido de Tecnología : <https://www.estrategiasdeinversion.com/actualidad/noticias/otras/gurobi-95-ofrece-funciones-empresariales-y-un-n-491599>

García, L. (21 de 11 de 2021). *Con Salud*. Obtenido de Beneficios y propiedades del pavo: https://www.consalud.es/estilo-vida/beneficios-propiedades-pavo_105892_102.html

González Duque, R. (2011). *Python para todos*.

Grupo Fuertes. (2022). Obtenido de Procavi: <https://www.grupofuertes.com/empresas/procavi/>

Iborra, E. G. (20 de 09 de 2020). *El Diario*. Obtenido de Todas las partes del pavo, ese gran tapado de la dieta sana: https://www.eldiario.es/consumoclaro/comer/partes-pavo-gran-desconocido-dieta-sana_1_6228775.html

Montoya, A., Caicedo, S., & Montoya, I. (2015). Análisis de las oportunidades de aumento de consumo de carne de pavo (*Meleagris gallopavo*) en Colombia. *SUMA DE NEGOCIOS*, 183-193.

Poveda, A. (13 de Febrero de 2017). *El Correo de Andalucía*. Obtenido de En los ‘fogones’ andaluces de Mercadona: <https://elcorreoweb.es/economia/en-los-fogones-andaluces-de-mercadona-DY2643599>

Procavi. (2022). Obtenido de <http://www.procavi.es/ESP/conocenos.aspx>

Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas. (2020). Obtenido de Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/elsectordelacarnedepavoenespana2020_publicar_tcm30-556313.pdf

Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas. (2020). Obtenido de Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/elsectordelacarnedepavoenespana2020_publicar_tcm30-556313.pdf

Wikipedia. (10 de Octubre de 2021). Obtenido de Historia de Python: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Python

Wikipedia. (6 de Noviembre de 2020). Obtenido de Gurobi: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gurobi>

ANEXO

```
import gurobipy as gp

import math

'Datos de entrada'

meses=["Enero", "Febrero", "Marzo", "Abril", "Mayo", "Junio", "Julio", "Agosto", "Septiembre",
"Octubre", "Noviembre", "Diciembre"]

almacenes = ["Interno", "Externo1", "Externo2"]

nmeses =len(meses)

nalmacenes = len(almacenes)

'Demanda anual estimada de la empresa'

demanda=[380000,415000,420000,410000,440000,470000,500000,510000,490000,440000,390000,35
0000]

'Capacidad máxima almacenamiento interno'

a=200000

'Capacidad máxima almacenamiento primer almacén externo'

b=100000

'El coste fijo anual: 5200000 kg por 1,15 por 0,72 que representa la suma de los porcentajes
de todos los costes'

c=4305600

'Costes de almacenamiento'

Cint=0.1

Cext1=0.2

Cext2=0.3
```

'Precio de venta'

Pvp=1.15

'Salario mensual operario'

Cper=1300

'Productividad humana teórica'

Prh=281600

'Modelo'

m1 = gp.Model("Produccion")

'Variables'

x = {} #x_ij: Producción del tipo i en el mes j (36 variables)

y = {} #y_j: número de operarios en el mes j (12 variables)

for j in range (nmeses):

 y[j] = m1.addVar(vtype = gp.GRB.CONTINUOUS, name='Número de operarios en el mes %d' %j)

 for i in range (nalmacenes):

 x[i,j] = m1.addVar(vtype = gp.GRB.CONTINUOUS, name = 'Capacidad[%d,%d]' %(i,j))

'Restricciones'

for j in range (nmeses):

 m1.addConstr(x[0,j] <= a)

 m1.addConstr(x[1,j] <= b)

 m1.addConstr(sum(x[i,j] for i in range (nalmacenes)) >= 0)

 m1.addConstr(gp.quicksum(x[i,j] for i in range (nalmacenes)) <= Prh*y[j])

 m1.addConstr(Cper*y[j] <= (gp.quicksum(x[i,j] for i in range (nalmacenes))*Pvp/10))

 m1.addConstr(gp.quicksum(x[i,j] for i in range (nalmacenes)) >= demanda[j])

 m1.addConstr(sum(y[j] for i in range (nalmacenes)) >= 0)

```
'FunciónObjetivo'
```

```
m1.setObjective(Cint*gp.quicksum(x[0,j] for j in range (nmeses))+Cext1*gp.quicksum(x[1,j]  
for j in range (nmeses))+Cper*gp.quicksum(y[j] for j in range  
(nmeses))+Cext2*gp.quicksum(x[2,j] for j in range (nmeses))+c,gp.GRB.MINIMIZE)
```

```
m1.optimize()
```

```
for v in m1.getVars():
```

```
    print('%s = %g' % (v.varName, v.x))
```