

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN”**

TEMA:

DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO APLICADO A LA
MINIMIZACIÓN DE TIEMPOS NO PRODUCTIVOS Y
OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD EN LA INDUSTRIA DE
ALIMENTOS.

AUTOR:

ANDREA WENDY ARMAS CADENA

Guayaquil - Ecuador

2018

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres,

A mi esposo

Y a mis hijos.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por su guía, iluminación y discernimiento en el transcurso de mi vida.

A mi amado esposo, por su apoyo en todo este tiempo.

A mis padres, por ser el pilar en mi carrera profesional

A mis profesores de la ESPOL, por compartir sus conocimientos en el
transcurso de la maestría.

Al PhD. Fernando Sandoya, por su guía en la realización de esta tesis.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Matemáticas** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A handwritten signature in blue ink that reads "Andrea Armas". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Ing. Andrea Armas Cadena

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Mgr. Wendy Plata Alarcón

Presidente del Tribunal



Fernando Sandoya Sánchez, Ph.D.

Director del Proyecto



Francisco Vera Alcívar, Ph.D.

Vocal del Tribunal



M.Sc Pedro Ramos de Santis

Vocal del Tribunal

AUTOR DEL PROYECTO



Handwritten signature of Andrea Armas in blue ink, written over a horizontal line.

Ing. Andrea Armas Cadena

ÍNDICE GENERAL

Contenido

<u>CAPÍTULO 1</u>	1
<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. <u>PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN</u>	1
1.2. <u>IMPORTANCIA DE USAR UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN EN LAS EMPRESAS</u>	3
1.3. <u>FUNCIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN DENTRO DE LAS ORGANIZACIONES</u>	6
1.4. <u>ANTECEDENTES</u>	7
1.5. <u>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</u>	10
1.6. <u>OBJETIVO GENERAL</u>	10
1.7. <u>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u>	11
<u>CAPÍTULO 2</u>	12
<u>MARCO TEÓRICO: LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN</u>	12
2.1. <u>CARACTERÍSTICAS DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN</u> 12	
2.2. <u>CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN</u>	14
2.2.1. <u>FLOW SHOP</u>	14
2.2.2. <u>JOB SHOP</u>	16
2.2.3. <u>OPEN SHOP</u>	18
2.3. <u>FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN</u>	19
2.4. <u>HEURÍSTICAS PARA LA SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN</u>	22
2.5. <u>LEKIN: SISTEMA PARA PROGRAMAR LA PRODUCCIÓN</u>	33
<u>CAPÍTULO 3</u>	42
<u>DIAGNÓSTICO ACTUAL DE LA SECUENCIACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL PLAN SEMANAL DE PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA</u>	42

3.1. <u>ANTECEDENTES DE LA EMPRESA DE ESTUDIO</u>	42
3.2. <u>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN</u>	44
3.2.1. <u>PROCESO TAJADAS DE PLÁTANO MADURO PRE FRITO CONGELADO</u>	44
3.3. <u>SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN</u>	46
<u>CAPÍTULO 4</u>	51
<u>IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN CON EL SISTEMA LEKIN</u>	51
4.1. <u>PROGRAMACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN</u>	51
4.2. <u>PROPUESTA DE UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN CON EL USO DEL SISTEMA LEKIN</u>	55
<u>CAPÍTULO 5</u>	64
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	64
5.1. <u>CONCLUSIONES</u>	64
5.2. <u>RECOMENDACIONES</u>	65
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	66
<u>ANEXO A</u>	67
<u>ANEXO B</u>	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama funcional de los procesos de producción de la empresa	8
Figura 2 Producción Modelo Flow Shop	15
Figura 3 Producción Modelo Job Shop	17
Figura 4 Producción Modelo Open Shop	18
Figura 5 Gráfica de Gantt	34
Figura 6 Conjunto de trabajos	35
Figura 7 Secuencia	36
Figura 8 Cuadro de Máquinas	37
Figura 9 Parque de Máquinas	38
Figura 10 Gráfica de Objetivos	39
Figura 11 Comparación de Resultados y Objetivos	39
Figura 12 Destinos de Exportación	42
Figura 13 Producción y Ventas	42
Figura 14 Proceso de Maduro en Tajadas	44
Figura 15 Proceso de Maduro en tajadas	45
Figura 16 Programación del Planificador	46
Figura 17 Programación de Producción	47
Figura 18 Parametrización de las máquinas y tareas en LEKIN	50
Figura 19 Configuración de los trabajos en LEKIN	51
Figura 20 Secuencia de las Máquinas	52
Figura 21 Diagrama de Gantt del Programa de Producción actual	52
Figura 22 Resumen de la Programación Actual	53
Figura 23 Diagrama de Resultados de la Programación actual	53
Figura 24 Reglas de Programación en LEKIN	55
Figura 25 Heurísticas de Programación en LEKIN	55
Figura 26 Resultado de la propuesta de programa de producción	56
Figura 27 Secuencia de la Programación con el Algoritmo Shifting Bottleneck	57
Figura 28 Diagrama de Gantt del Programa de producción seleccionado	59
Figura 29 Diagrama de resultados	59
Figura 30 Diagrama de resultados Programación Actual VS Propuesta LEKIN	61

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1 Características de las Máquinas	12
Tabla 2 Listado de Producto Terminado Proceso Maduro	48
Tabla 3 Proceso Productivo de Maduro	49
Tabla 4 Resultados del programa actual de producción	54
Tabla 5 Matriz de Ponderación	57
Tabla 7 Resultados del Programa de Producción	58
Tabla 8 Comparación del Programa actual VS Programa propuesto LEKIN ...	60
Tabla 9 Estimación de Ingresos	61

ABREVIATURAS O SIGLAS

Kg: Kilogramo.

Hr: Hora.

Ppm: Partes por millón.

Hz: Hertz.

Cm: Centímetro.

Aprox: Aproximadamente.

ERP: Enterprise Resource Planning o Planificación de Recursos Empresariales.

MRP: Material Requirement Planning o Planificación de los Requerimientos de Material.

BPM: Business Process Management o Buenas Prácticas de Manufactura.

HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Points o Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control.

FSSC 22000: Food Safety System Certification o Sistema de Certificación en Seguridad Alimentaria.

BASC: Business Alliance for Secure Commerce o Coalición Empresarial Anti contrabando.

SIRO: The service in random order rule o Regla del servicio en orden aleatorio.

ERD: The earliest release date first rule o Regla de primero la fecha más temprana de lanzamiento.

EDD: The earliest due date first rule o Regla de primero la fecha de entrega más temprana.

MS: The minimum slack first rule o Regla de primero la holgura mínima.

WSPT: The weighted shortest processing time first rule o Regla de primero el tiempo de procesamiento más corto ponderado.

SPT: The shortest processing time first rule o Regla de primero el tiempo de procesamiento más pequeño.

LPT: The longest processing time first rule o Regla de primero el tiempo de procesamiento más largo.

SST: Regla de primero el tiempo de preparación más corto (the shortest setup time first rule).

CR: Critical ratio rule o Regla del radio crítico.

ATCS: Apparent Tardiness Cost with Setups rule o Regla del costo aparente de la tardanza con tiempos de preparación.

FCFS: First Come First Served o Primero en entrar - primero en salir.

Cmax: Minimización del makespan.

Tmax: Minimización de la tardanza total.

Lmax: Minimización del máximo retraso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La programación de actividades es una tarea que realizan las personas, las empresas y las instituciones con el fin de realizar eficientemente sus planes. Aunque siempre ha sido importante, actualmente ha adquirido una gran importancia en las industrias, debido fundamentalmente a la automatización y la nueva cultura introducida por la Industria. Aunque no se puede dar una definición única sobre lo que significa la programación, pues depende del contexto, algunas definiciones interesantes sobre programación de la producción son las siguientes:

La programación es el plan detallado de lo que va a hacerse en el corto plazo. Por “corto plazo” se entienden las siguientes dos a tres semanas. (Richard B. Chase, 2009)

Un programa puede adoptar la forma de algo tan simple como una lista de actividades pendientes o puede ser mucho más complejo, como la crónica segundo a segundo de lo que va a pasar en las próximas 2 horas. Los empleados miran con ansias la programación para saber adónde les toca trabajar en el futuro. (Richard B. Chase, 2009)

Dentro de la programación existe una lista de pedidos que son prioritarios e indica qué debe ejecutarse primero, en segundo, tercer lugar, etc. En la lista se estima el tiempo que se deberá esperar a que termine un trabajo. La programación se vuelve complicada cuando tienen que realizarse muchos pedidos con trabajadores de habilidades variables, diferentes necesidades de materias primas, distintas prioridades, diferentes máquinas y en lugares distintos.

Las decisiones dentro de la programación empiezan con la planificación y contiene a todos los recursos disponibles de equipos e instalaciones.

Según (Jay Heizer, 2008), indica que la programación asigna a cada trabajo fechas de entrega; pero muchos de estos trabajos compiten simultáneamente por los mismos recursos. Para resolver las dificultades inherentes a la programación, podemos clasificar las técnicas de programación en programación hacia adelante y programación hacia atrás.

La programación hacia adelante (forward), se inicia tan pronto como se conocen los requerimientos del trabajo. Esta programación se utiliza en diversas organizaciones, como hospitales, clínicas, restaurantes y fábricas de máquinas herramienta. En estas instalaciones, los trabajos se realizan contra pedido de cliente, y normalmente se deben entregar lo antes posible. La programación hacia adelante se diseña habitualmente para elaborar un programa que pueda ser cumplido incluso si eso significa no satisfacer la fecha prevista de entrega. En muchos casos, la programación hacia adelante provoca un aumento del inventario de trabajo en curso.

La programación hacia atrás (backward), se inicia a partir de la fecha de entrega, programando primero la última operación a realizar en el trabajo. Las etapas del trabajo se programan entonces, de una en una, en orden inverso. Restando el plazo de producción de cada artículo, se obtiene la fecha de inicio. Sin embargo, puede que no haya recursos necesarios para cumplir el programa resultante. La programación hacia atrás se utiliza en muchos entornos de fabricación, así como en entornos de servicios tales como preparar el servicio de un banquete o la programación de una operación quirúrgica. En la práctica, se emplea a menudo una combinación de la programación hacia adelante y hacia atrás, para hallar un equilibrio razonable entre lo que puede conseguirse y las fechas de entrega a los clientes. Las averías de las máquinas, el ausentismo laboral, los problemas de calidad, la falta de materiales y otros factores complican todavía más la programación. "No es fácil programar a trabajadores que se quedan dormidos en

el trabajo”. Por consiguiente, la asignación de una fecha no asegura que el trabajo será realizado según el programa. (Jay Heizer, 2008)

Según (Jay Heizer, 2008), la técnica correcta de programación depende del volumen de órdenes, de la naturaleza de las operaciones y de la complejidad general de los trabajos, así como de la importancia que se da a cada uno de los cuatro criterios siguientes:

- Minimizar el tiempo de finalización de los trabajos. Este criterio se evalúa determinando el tiempo de finalización medio por trabajo.
- Maximizar la utilización de la capacidad instalada. Se evalúa determinando el porcentaje de tiempo en que se utiliza la instalación.
- Minimizar el inventario de trabajos en proceso (WIP). Se evalúa calculando el número medio de trabajos en el sistema. La relación entre el número de trabajos en el sistema y el inventario de trabajo en curso será elevada. Por lo tanto, cuanto más bajo sea el número de trabajos en el sistema, menor será el inventario.
- Minimizar el tiempo de espera de los clientes. Se evalúa calculando el número medio de días de retraso.

1.2. IMPORTANCIA DE USAR UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN EN LAS EMPRESAS

(Jay Heizer, 2008) Indica que la importancia estratégica de la programación es clara ya que una programación eficaz significa un rápido movimiento de bienes y servicios en las instalaciones. Esto significa una mayor utilización de los activos y, por tanto, mayor capacidad por dólar invertido, lo que, a su vez, reduce el coste. Esta mayor capacidad, una producción más rápida y la flexibilidad citada suponen un mejor servicio al cliente a través de una entrega más rápida. Una buena programación también contribuye a adquirir con los clientes unos compromisos realistas y, en consecuencia, a una entrega fiable.

Un modelo está relacionado con un detalle cuantitativo de un proceso, se utiliza en general para describir distintos objetos, para de esta manera obtener resultados y poder tomar finalmente una decisión. En particular, un modelo matemático permite analizar la realidad de una organización mediante fórmulas matemáticas y poder tomar la decisión más óptima para la empresa. La implementación de un modelo de optimización dentro de una organización se basa en la eficiencia y eficacia para alcanzar los objetivos planteados, utilizando la menor cantidad de recursos posibles dentro de la organización.

La optimización de los procesos dentro de las empresas no implica que la organización vaya a operar utilizando su máxima capacidad, sino que buscará establecer el punto que genere mayor rentabilidad.

La importancia de la optimización de la producción dentro de las empresas es esencial para lograr niveles de competencia dentro del mercado, disminuyendo tiempos no productivos, incrementado la productividad en cada área, reducir los costos relacionados a las fallas de las maquinarias con lo cual se podrá competir con factores externos como el incremento de la demanda, la variabilidad de precios, la falta de materia prima, etc.

La programación es un proceso de toma de decisiones que se utiliza de forma regular en muchas industrias de producción y servicios. Se ocupa de la asignación de recursos a tareas en períodos de tiempo determinados y su objetivo es optimizar uno o más objetivos. Los recursos y tareas en una organización pueden tomar muchas formas diferentes. Los recursos pueden ser máquinas en una industria, pistas de aterrizaje, unidades de procesamiento en un sistema informático, etc. Las tareas pueden ser operaciones en un proceso de producción, despegues y aterrizajes en un aeropuerto, ejecuciones de programas de computación, etc. Cada tarea puede tener un cierto nivel de prioridad, un tiempo de inicio más temprano y una fecha de vencimiento.

Los objetivos también pueden tomar muchas formas diferentes. Un objetivo puede ser la minimización del tiempo de finalización de la última tarea y otro puede ser la minimización del número de tareas completadas después de sus fechas de vencimiento.

La programación, como proceso de toma de decisiones, juega un papel muy importante en la mayoría de las industrias de fabricación y producción, como lo es en entornos de procesamiento de información. También es importante en empresas de transporte, distribución y en otros tipos de industrias de servicios, como por ejemplo una línea de ensamble de automóviles; generalmente produce muchos modelos diferentes, por ejemplo, los diferentes modelos dentro de una línea de ensamble de automóviles pueden ser: un coupé de dos puertas, un sedán de cuatro puertas, hatchback y un station wagon. Ahí dispone de una cantidad de colores diferentes y paquetes de opciones. Algunos autos tienen transmisiones automáticas, mientras que otros son manuales; algunos autos tienen techo solar, otros no.

En una línea de ensamblaje generalmente hay varios cuellos de botella, donde el rendimiento de una máquina o proceso particular determina la producción general. El taller de pintura suele ser un cuello de botella; cada vez que el color cambia las pistolas de pintura deben limpiarse, lo cual es un proceso que lleva mucho tiempo. Uno de los objetivos es maximizar el rendimiento secuenciando el automóvil de tal manera que la carga de trabajo en cada estación se equilibre con el tiempo.

1.3. FUNCIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DE PRODUCCIÓN DENTRO DE LAS ORGANIZACIONES

Existen empresas en las cuales la programación se realiza mediante un sistema informático conocido como ERP (por sus siglas en inglés: Enterprise Resource Planning), en donde se conjugan algunas variables que pueden depender o no de la producción y pueden ser lideradas por otros departamentos aunque sean

parte del mismo proceso. Un sistema ERP automatiza e integra los procesos de la empresa, integra las bases de datos de la compañía en un solo programa, evita errores y datos duplicados, genera un ahorro en tiempo y costos, reduce el inventario en exceso.

La planificación de la programación de producción inicia con los pedidos que envía el departamento de ventas a planta, estos pedidos se convierten en trabajos con fechas de vencimiento. Los trabajos a menudo tienen que ser procesados en máquinas en un orden o secuencia dada. Los trabajos pueden retrasarse si ciertas máquinas están ocupadas, este caso se produce cuando hay trabajos de alta prioridad que deben ser procesados inmediatamente; eventos inesperados en las máquinas como averías o tiempos de procesamiento más largos de lo esperado que influyen de manera inadecuada a los horarios programados.

La producción no es la única área de la organización en la que impacta el proceso de programación. La programación de la producción interactúa en general con toda la planificación.

El proceso de la planificación optimiza la combinación general de los productos de la empresa y asignación de recursos basados en niveles de inventario, pronóstico de demanda, materia prima.

Las fechas de entrega de los trabajos deben determinarse por el sistema de planificación y programación de producción junto con la planificación de requerimiento de material (MRP, por sus siglas en inglés: Material Requirement Planning).

Los MRP), son normalmente bastante elaborados, cada trabajo tiene una lista de materiales detallando los requerimientos para la producción. Estos sistemas realizan un seguimiento del inventario, y además determinan el tiempo de las compras de cada uno de los materiales. Al realizarlo, usan técnicas como el

tamaño del lote y la programación de lotes (batchs de producción) que son similares a los utilizados en la planificación de programación.

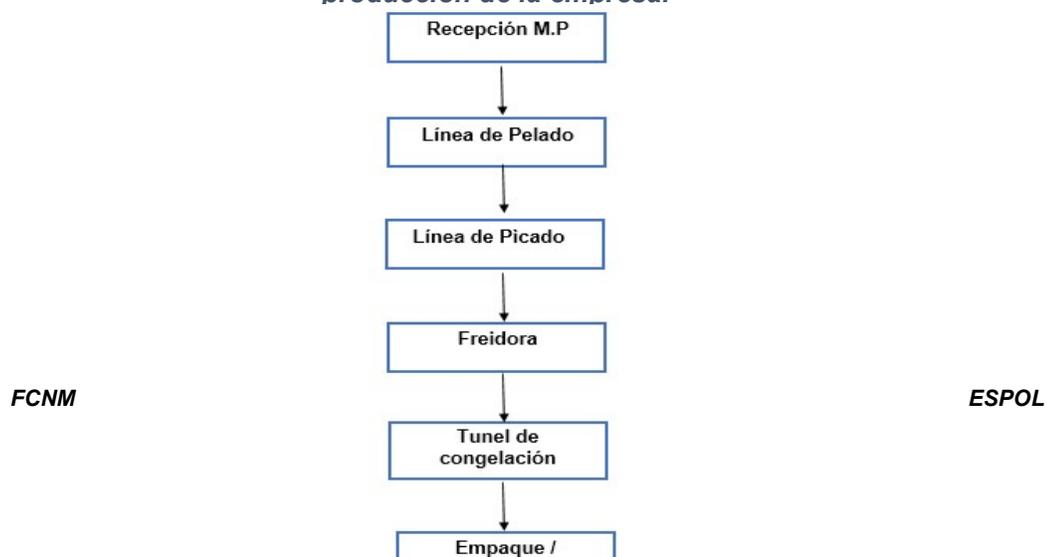
Existen muchos paquetes comerciales de software MRP disponible. Muchas empresas dependen de los sistemas MRP. En los casos de empresas que no disponen de un sistema de planificación o programación, el sistema MRP se puede usar para fines de planificación de la producción. Sin embargo, en una producción compleja no es fácil para un sistema MRP hacer una planificación detallada y programar satisfactoriamente.

Las plantas modernas a menudo emplean sistemas de información involucrando una red informática y varias bases de datos. Redes de área local de computadoras personales, estaciones de trabajo y terminales de entrada de datos están conectados a un servidor central, y se puede usar para recuperar datos de varias bases de datos o para ingresar nuevos datos.

1.4. ANTECEDENTES

La empresa de estudio se encuentra ubicada en la ciudad de Guayaquil, su actividad económica principal consiste en procesar y comercializar productos congelados pre fritos semielaborados derivados del plátano (maduro en tajadas y tostón). Su proceso es sencillo y en línea. El diagrama funcional de procesos de producción de la empresa se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1 Diagrama funcional de los procesos de producción de la empresa.



El proceso de producción se inicia en la recepción de materia prima en bines, esta materia prima pasa por un proceso de maduración, cuando el plátano maduro tiene 29 grados brix de dulzura (aproximadamente después de 7 días de su recepción), está listo para su proceso. Ingresa al área de pelado donde 10 personas se encargan de retirar la cascara del maduro manualmente a una velocidad de 200 kg/hr. Una vez pelado el producto es transportado por medio de bandas al área de picado donde 10 personas se encargan de realizar cortes transversales de acuerdo a las especificaciones técnicas del cliente a una velocidad de 180 kg/hr; posterior a este proceso, el producto es transportado a la freidora con una temperatura de 190 grados centígrados a una velocidad de 2,000 kg/hr (aprox), El producto se recibe en latas de acero inoxidable, las mismas que son transportadas en coches a las bodegas de congelación, donde se almacenan por 45 minutos a -18 grados centígrados.

Una vez que el producto está congelado se procede a empacarlo según el cliente que se ha programado, es aquí donde se presentan inconvenientes ya que los cambios son constantes y la programación varía de acuerdo a las necesidades de cada cliente. El programa de producción que se entrega al inicio de la jornada al supervisor, es modificado sin previo aviso de tal manera que al momento de iniciar el empaque de los productos, la información del cliente es decir el tipo de empaque, cambie debido a circunstancias comerciales en las cuales se prioriza las entregas de manera distinta a las cuales se planificó la producción.

El empaque se lo realiza en la máquina de multicabezal a una velocidad de 1,200 kg/hr promedio y cada cambio que no está programado representa un tiempo de setup 30 minutos de pérdida por el cambio de bobina (funda) que corresponde al cliente. Aproximadamente se realizan de 3 a 4 veces los cambios de empaque.

1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema que presenta la empresa de estudio es que no dispone de un modelo eficiente que le permita programar las actividades de su proceso de producción optimizando tiempo y reduciendo costos, para de esta manera obtener una ventaja ante sus competidores.

Actualmente la planificación de la producción en la planta se realiza de manera empírica, de acuerdo a la experiencia y sentido común de sus gerentes, no se dispone de un control de la productividad y eficiencia del personal en cada una de las etapas del proceso.

Implementando un adecuado sistema de programación de producción se logrará administrar de manera eficiente los recursos, de esta manera se podrán evitar costos innecesarios de producción.

1.6. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación es diseñar un modelo matemático que permita optimizar el programa de producción disminuyendo los tiempos no productivos dentro de la empresa de estudio, respetando las características y restricciones de su sistema de producción con la ayuda de un modelo matemático de optimización y de un software de secuenciamiento de producción.

1.7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del proyecto de tesis son los siguientes:

- Representar el sistema de producción de la empresa.
- Identificar las principales variables que intervienen en el proceso de producción de la empresa.
- Optimizar la productividad en cada etapa del proceso.
- Identificar los factores que retrasan el proceso.
- Minimizar el tiempo de fabricación de los productos.
- Minimizar la tardanza total en los tiempos de entrega de los trabajos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO: LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN

El método de asignación implica asignar tareas o trabajos a los recursos. Los ejemplos pueden ser: asignar tareas a las máquinas, contratos a los postores, personas a los proyectos y vendedores a las zonas. El objetivo más común es minimizar los costes totales o el tiempo necesario para desarrollar las tareas a realizar. Una característica importante de los problemas de asignación es que se asigna sólo un trabajo a una máquina. (Jay Heizer, 2008)

Un problema de secuenciación de la producción es un problema en el cual la empresa debe determinar cómo se debe planificar la ejecución de los trabajos de producción, asignarlos a los operarios y a la maquinaria disponible, según los requerimientos del proceso y las restricciones naturales derivadas del proceso productivo y del diagrama funcional de producción de la empresa.

Una máquina es un recurso y las tareas son las actividades que se realizan en cada máquina. La secuenciación de tareas en la producción es el proceso de determinar la tarea que va a iniciar primero en una máquina. Las prioridades como fecha de vencimiento, orden de llegada, etc. son las que determinan que tarea va primero y cuál es su secuencia. Para poder determinar las prioridades se debe ajustar la fecha de vencimiento de los clientes, minimizar el tiempo de flujo, minimizar el tiempo de inactividad de las máquinas.

Los problemas de secuenciación dentro de la producción se dan en una o varias máquinas. Se puede establecer que los problemas en varias máquinas se dan

entre máquinas especializadas y máquinas no especializadas. Las máquinas no especializadas pueden ejecutar cualquier actividad, mientras que las maquinas especializadas solo ejecutan actividades específicas.

Los problemas en las máquinas no especializadas se dividen en problemas de máquinas idénticas, uniformes o no relacionadas con respecto a la velocidad del proceso de las máquinas.

Los problemas de las máquinas especializadas se denominan, por sus denominaciones en inglés, problemas Open Shop, Flow Shop, y Job Shop. Cada trabajo tiene que realizar diferentes operaciones y acoplarse en las diferentes máquinas especializadas. La diferencia entre estos problemas radica en las características de las trayectorias a través de las máquinas que deben seguir los trabajos, tal como se indica en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Características de las Máquinas

Máquinas No Especializadas:	Idénticas: Misma velocidad de proceso
	Uniformes: Distinta velocidad pero constantes y no dependen de los trabajos
	No relacionadas: Velocidad de proceso depende de los trabajos
Máquinas Especializadas	Flow Shop: Cada tarea se procesa en las máquinas siguiendo un orden.
	Open Shop: Cada tarea se procesa en las máquinas en cualquier orden.

	Job Shop: Cada tarea se procesa en las máquinas, el orden es arbitrario pero las prioridades son conocidas.
--	---

Fuente: Problemas de planificación y secuenciación determinística: modelización y técnicas de resolución (David López) - Elaboración: Propia

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN

2.2.1. FLOW SHOP

En las plantas de proceso, cada trabajo debe estar relacionado a una serie de operaciones. Estas operaciones deben realizarse en el mismo orden, lo que implica que los trabajos deben seguir la misma secuencia, las máquinas deben estar configuradas en serie, esto se conoce como el modelo Flow Shop.

Las capacidades de almacenamiento entre máquinas sucesivas a veces pueden ser ilimitadas. Este caso es cuando los productos que se están procesando son físicamente pequeños como por ejemplo los circuitos impresos, circuitos integrados, por lo que es relativamente fácil almacenar grandes cantidades entre las máquinas. Cuando los productos son físicamente grandes como: televisores, copadoras, el espacio de almacenamiento entre dos máquinas sucesivas puede tener una capacidad limitada, lo que causa bloqueo.

El bloqueo es un cuello de botella que se produce cuando el lugar de almacenamiento está lleno y no se permite que la máquina libere un trabajo en el lugar de almacenamiento después de completar su proceso. Si este es el caso, entonces el trabajo debe permanecer en la máquina, evitando que un trabajo que se encuentra en espera comience su proceso.

Este proceso consiste en una serie de etapas con varias máquinas en paralelo en cada etapa. Un trabajo debe procesarse en cada etapa solo en una de las máquinas. Este proceso se conoce como Flow Shop, Flow Shop compuesto, Flow Shop multiprocesador o Flow Shop híbrido.

Las características del Flow Shop son: alto volumen de producto, baja variedad de producto, bajo valor de la mercadería comparado con el valor del producto, programación simple.

Flow Shop Híbrido.

Es un caso especial del Flow Shop, donde un conjunto de trabajos requiere ser procesado en una serie de etapas en donde una de las etapas tiene más de una máquina en paralelo.

Flow Shop con almacenamiento intermedio ilimitado.

En la búsqueda de un horario óptimo surge la pregunta si es suficiente determinar una permutación en la que los trabajos atraviesan todo el sistema. Es posible que un trabajo continúe mientras otro espera su turno en la línea. Las máquinas no funcionan de acuerdo con el principio del que primero llega es el primero que salir y la secuencia en que los trabajos pasan por las máquinas puede cambiar de una máquina a otra.

Cambiar la secuencia de los trabajos que esperan en una cola entre dos máquinas a veces puede generar como resultado un makespan más pequeño. Sin embargo, existe un cronograma óptimo sin cambios en la secuencia de trabajo entre las dos primeras máquinas y entre las dos últimas. Esto implica que hay horarios óptimos que no requiere cambios de secuencia entre máquinas.

Flow Shop con almacenamiento intermedio limitado

Considera máquinas en serie con cero almacenamiento intermedio entre máquinas sucesivas. Cuando una máquina finaliza con el proceso de un trabajo,

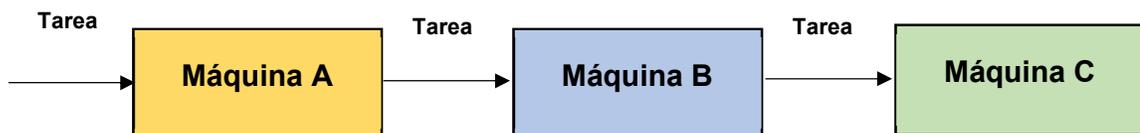
ese trabajo no puede pasar a la siguiente máquina si esa máquina está ocupada; el trabajo debe permanecer en la primera máquina y no puede iniciar ningún proceso posterior.

Algunos ejemplos de plantas con procesos tipo Flow Shop:

- Ensamble de electrodomésticos.
- Envasado de vino.
- Bebidas gaseosas.
- Fabricación de tarros de conserva.
- Editoriales.

En la **Figura 2 Producción Modelo Flow Shop** se muestra un esquema simplificado del proceso de producción de un modelo Flow Shop, donde intervienen tres máquinas A, B, C y la tarea siguen una misma secuencia.

Figura 2 Producción Modelo Flow Shop



Fuente: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems (Pinedo, 2008) - Elaboración:
Propia

2.2.2. JOB SHOP

En la programación de la producción de las empresas se debe decidir sobre la asignación de los recursos a los trabajos para optimizar objetivos en corto plazo. Se considera un modelo Job Shop un conjunto de máquinas y trabajos que siguen una secuencia ordenada de operaciones que se debe de procesar en las máquinas con el objetivo de minimizar el tiempo de la última operación.

Si en una planta un trabajo tiene que pasar por algunas máquinas y más de una vez, se dice que el trabajo vuelve a circular. La recirculación es un fenómeno común en el mundo real. Por ejemplo, en trabajos de fabricación de semiconductores deben recircularse varias veces antes de completar todo su proceso.

La característica principal del modelo Job Shop es que está orientada a agrupar los procesos de fabricación en función de la tecnología, dado que en el Job Shop no existe un flujo único de elaboración en todos los productos. El volumen de estos procesos es muy bajo y variable ya que son elaborados bajo pedido del cliente.

Un proceso de Job Shop requiere trabajadores altamente calificados que adapten sus conocimientos a las necesidades de los clientes, los procesos en el modelo Job Shop suele no ser repetitivo y sus productos son procesados una vez que el cliente ha planteado su requerimiento. De esta manera se busca generar una oferta personalizada.

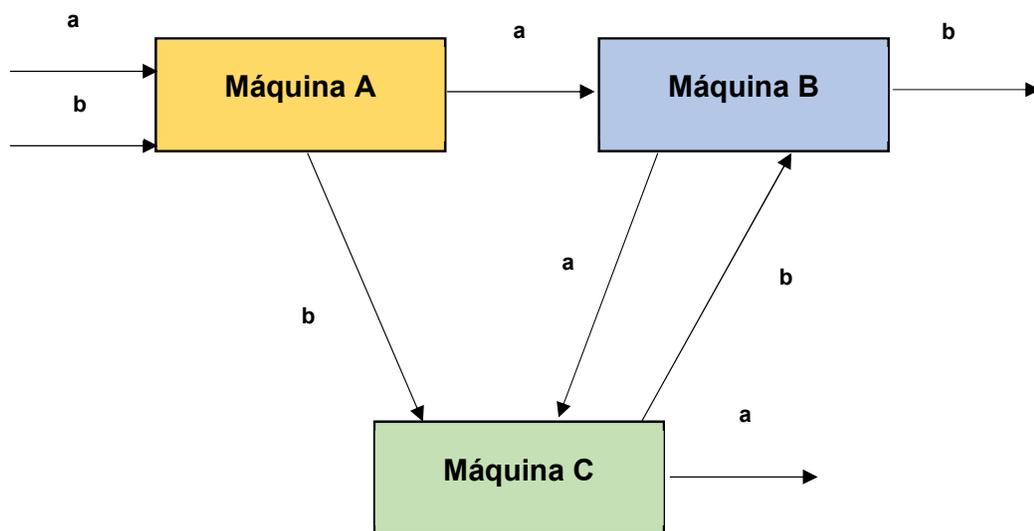
Las empresas que usan este tipo de modelo Job Shop son generalmente industrias como carpinterías, restaurantes, talleres artesanales, talleres de pintura. Estas industrias se enfocan en la personalización por lotes pequeños, obteniendo como ventaja la flexibilidad de programación y producción, baja inversión en sus equipos, al ser uso general.

La principal ventaja del Job Shop consiste en la flexibilidad de su producción, es decir, su alto número de salidas de producto en términos de referencias. Las desventajas de este modelo son que requiere de altos tiempos de alistamiento de las máquinas, debido a la preparación en cada cambio, la alta variabilidad de los procesos afecta en la estimación de los tiempos de producción y dificulta la programación de los trabajos. En la **Figura 3** se muestra el modelo de un sistema Job Shop, en la cual intervienen tres máquinas A, B y C. Donde se realizan dos

tareas a y b. La tarea “a” pasa por la máquina A, luego a la máquina B y termina en la máquina C.

En cambio el proceso de la tarea “b” es distinto, inicia en la máquina A, luego pasa a la máquina C y termina en la máquina B. Su proceso no es continuo.

Figura 3 Producción Modelo Job Shop



Fuente: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems (Pinedo, 2008) -

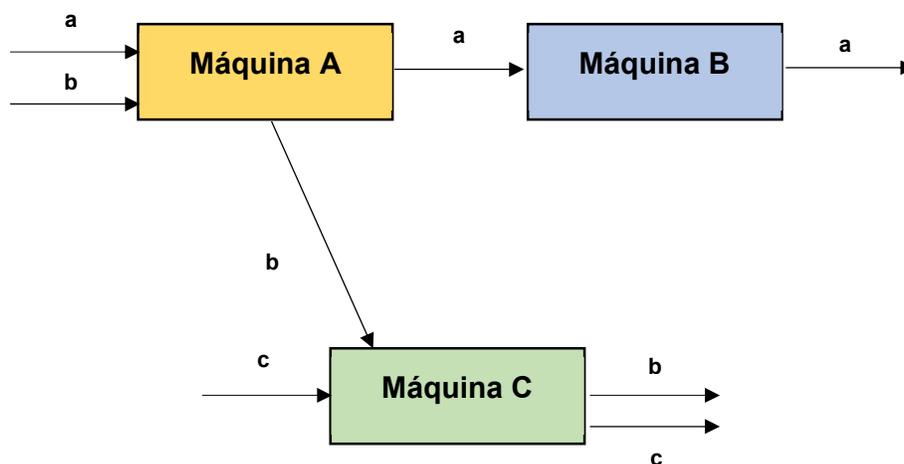
Elaboración: Propia

En un modelo Open Shop, cada trabajo tiene una ruta fija que esta predeterminada. A menudo ocurre que la ruta del trabajo es inmaterial y depende del planificador para decidir. Cuando las rutas de los trabajos están disponibles, se hace referencia al modelo como un Open Shop.

Las características de un modelo Open Shop son: el proceso de sus tareas no es en serie, no hay un orden establecido, una tarea no tiene dependencia de otra, no requiere estándar de tiempo.

En un sistema Open Shop permite aleatoriedad en cada secuencia de trabajo, no existe restricción de ordenamiento. Por ejemplo, un taller de reparación de autos donde la secuencia de la reparación no está definida estrictamente. En la **Figura 4** se muestra el modelo de un sistema Open Shop. Intervienen tres máquinas A, B y C; donde la tarea “a” pasa por la máquina A y B. La tarea “b” inicia su proceso en la máquina A y termina en la máquina C, y la tarea “c” solo pasa por la máquina C. Se puede observar que no sigue un orden, el modelo es aleatorio.

Figura 4 Producción Modelo Open Shop



Fuente: Scheduling Theory, Algorithms, and Systems (Pinedo, 2008) -

Elaboración: Propia

2.3. FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN

El modelo aplicable en base a la característica del sistema de producción de la empresa que se va a realizar el estudio es un Flow Shop; ya que se caracteriza en que sus tareas pasan por todos sus procesos en un mismo orden, por lo cual el resto del documento se describirá este modelo, su formulación y solución.

Los problemas de secuenciación de trabajos de producción se pueden modelizar de la siguiente manera: se debe precisar realizar n trabajos, tareas o procesos

J_j , donde $j = 1, 2, 3 \dots \dots n$, para lo cual se dispone de m maquinas M_i , donde $i = 1, 2, 3 \dots \dots m$.

La clasificación de los problemas de secuenciación se puede realizar utilizando tres campos $\alpha/\beta/\gamma$, dónde:

α Recopila las características de las máquinas M_i .

β Indica los n trabajos o tareas a procesar J_j .

γ Indica los criterios y el modelo de optimización a desarrollar.

Cada trabajo J_j tiene los siguientes datos:

Un numero de m_j de operaciones $O_{1j}, O_{2j}, \dots \dots, O_{m_jj}$, en donde se puede dividir el trabajo J_j de esta manera una vez fijada la planificación, cada operación se procesa en una única máquina.

Se puede definir $u_{ij} = k$ si la operación O_{ij} debe realizarse en la máquina M_k . Si el trabajo j consta de una única operación $m_j = 1$, se puede denotar $u_j = k$, dicha operación debe asignarse a la máquina M_k .

Para los modelos de Flow Shop, Open Shop y Job Shop, se requieren máquinas especializadas que sean capaces de realizar varias tareas. Por lo tanto, m_j no tiene que ser 1, y cada trabajo J_j se divide en m_j operaciones que tal vez requiera maquinas distintas. Incluso puede darse el caso que $m_j \geq m$ con lo que alguna máquina tendrá que realizar varias operaciones de un mismo trabajo.

Se tiene un modelo Flow Shop en el que cada trabajo J_j consiste en una cadena de $m_j = m$ operaciones.

Cada trabajo J_j se debe procesar en la maquina M_i en un tiempo p_{ij} , todos los trabajos deben de seguir la misma serie. No es necesario que un trabajo j pase

por todas las máquinas. Si el trabajo j no se procesa en la máquina i se considera $p_{ij} = 0$. Así determinaremos que no todos los trabajos tengan que realizarse en todas las máquinas en los problemas Flow Shop.

En cuanto al criterio que se quiere optimizar, depende en gran medida de la visión de la empresa, entre los más empleados están:

- La minimización del makespan (C_{max}),
- La minimización de la tardanza total (T_{max}),
- La minimización del máximo retraso (L_{max}),
- Otros de naturaleza particular al sistema de producción de la empresa.

De todos ellos el más popular es el que consiste en minimizar el makespan.

A continuación se describe el modelo matemático para optimizar este último objetivo, pero de la misma manera pueden desarrollarse modelos con cualquiera de los otros objetivos considerados.

Formulación matemática Modelo Flow Shop.

La función objetivo consiste en minimizar el tiempo total en el que todos los trabajos completan su ejecución (Makespan).

Variables de decisión:

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } i \text{ es primero que la } j \text{ en la máquina } m \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

t_{im} : tiempo de inicio de la actividad i en la máquina m

Función Objetivo:

Minimizar Makespan.

$$\text{Min } Z = \lambda$$

Restricciones:

- Función objetivo: Minimizar el máximo $\{t_{im} + p_{im}\} \forall i,m$

$$\lambda \geq t_{im} + p_{im} \quad \forall i,m$$

- Orden de actividad: Si la tarea i se realiza primero que la j , $x_{ijm} = 1$ y $x_{jim} = 0$ para que se cumpla la igualdad.

$$x_{ijm} + x_{jim} = 1$$

- Precedencias: Para que una máquina procese cierto producto, este ya debió haber sido procesado por la máquina anterior.

$$t_{im+1} \geq t_{im} + p_{im}$$

- Orden: Cada artículo debe esperar a que el producto que está siendo procesado en la máquina m termine para continuar con su respectiva ruta.

$$t_{im} \geq t_{jm} + p_{jm} - M * x_{ijm}$$

2.4. HEURÍSTICAS PARA LA SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN

Una heurística es una técnica computacional que busca la solución más óptima, pero no garantiza que la solución encontrada sea la mejor opción.

Ciertos problemas de planificación y programación pueden formularse con programación lineal y son inherentemente fáciles; se pueden resolver fácilmente mediante el uso de algoritmos eficientes existentes. Otros problemas fáciles de planificación y programación pueden ser resueltos a través de diferentes algoritmos que también son eficientes; estos algoritmos se conocen como algoritmos de tiempo polinomiales. Que un problema pueda ser resuelto en un tiempo eficiente, implica que las instancias muy grandes de ese problema, con cientos o incluso miles de trabajos, todavía se puede resolver en un tiempo

relativamente corto en una computadora. En particular los problemas de secuenciación de trabajos de producción son de tipo difícil y no pueden ser resueltos de manera exacta por algoritmos que se ejecutan en tiempos polinomiales, por lo que se debe recurrir a algoritmos heurísticos o meta heurísticos para su solución.

Estos problemas no se pueden formular con programación lineal y no hay reglas simples o algoritmos que rindan soluciones óptimas en un tiempo determinado en la computadora. Puede ser posible formular estos problemas con programación entera, pero resolverlos y poder optimizarlos puede requerir un mayor tiempo en la computadora. Dado que en la práctica esa cantidad de tiempo no siempre estará disponible en un sistema informático. Usualmente se complace con una solución aceptable que presumiblemente no está lejos de ser la solución óptima.

Una regla de programación prioriza todos los trabajos que están esperando por ser procesados en una máquina. El esquema de priorización puede tomar en cuenta los atributos de los trabajos, los atributos de las máquinas, así como el tiempo actual. Cuando una máquina termina su proceso, la regla de programación selecciona el trabajo que se encuentra en espera y que tiene alta prioridad. Las reglas de programación pueden ser estáticas y dinámicas, las estáticas no dependen del tiempo mientras que las dinámicas dependen del tiempo. A continuación, se describe las reglas de programación más utilizadas (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005) :

Regla del servicio en orden aleatorio (*the service in random order rule* - *SIRO*):

De acuerdo a esta regla de prioridad, cada vez que una máquina termina su proceso, el siguiente trabajo se selecciona en forma aleatoria. Esta regla, no busca minimizar ningún objetivo en particular.

Regla de primero la fecha más temprana de lanzamiento (*the earliest release date first rule -ERD*):

En este caso la regla es equivalente a la muy conocida regla de Primero en Llegar – Primero en Servir (First Come First Served rule - FCFS). Esta regla en un sentido minimiza la variación en los tiempos de espera de los trabajos en una máquina.

Regla de primero la fecha de entrega más temprana (*the earliest due date first rule -EDD*): en este caso, siempre que una máquina es liberada, el trabajo con la fecha de entrega más pronta es la elegida para ser procesada. Esta regla tiende a minimizar el máximo retraso entre los trabajos que esperan procesamiento. Actualmente, en un ambiente de 1 máquina, con n trabajos disponibles al tiempo cero, la regla EDD hace minimizar el máximo retraso.

Regla de primero la holgura mínima (*the minimum slack first rule -MS*): esta regla es una variación de la regla EDD. Si una máquina es liberada en el tiempo t , la holgura restante de cada trabajo en ese tiempo, definida como el $\max(d_j - p_j - t, 0)$, es registrada. El trabajo con la mínima holgura es la siguiente en ser programada. Esta regla tiende a minimizar la fecha de entrega.

Regla de primero el tiempo de procesamiento más corto ponderado (*the weighted shortest processing time first rule -WSPT*): esta regla indica que cuando una máquina es liberada, el trabajo con el más alto ratio entre el peso (w_j) sobre el tiempo de procesamiento (p_j) será el siguiente en continuar. Los trabajos son ordenados en orden decrecientes de (w_j/p_j). Esta regla tiende a minimizar la suma ponderada de los tiempos de terminación. En un ambiente de una sola máquina, con n trabajos disponibles en el momento cero, la regla WSPT minimiza el. Cuando todos los pesos son iguales la regla WSPT se reduce a la regla SPT.

Regla de primero el tiempo de procesamiento más pequeño (*the shortest processing time first rule - SPT*): esta regla consiste en programar los trabajos en orden creciente de su tiempo de procesamiento p_j .

Regla de primero el tiempo de procesamiento más largo (*the longest processing time first rule - LPT*): esta regla ordena los trabajos en orden decreciente del tiempo de procesamiento. Cuando hay maquinas en paralelo, esta regla tiende a balancear la sobrecarga de trabajo de las maquinas. El razonamiento atrás de esto es el siguiente. Es ventajoso mantener los trabajos con corto tiempo de procesamiento para después debido que esos trabajos son útiles en el final para balancear la carga de trabajo.

Después de que la asignación de trabajos a las maquinas ha sido determinado, los trabajos en cualquier máquina dada puede ser re-secuenciada sin afectar el balance de la carga de trabajo.

Regla de primero el tiempo de preparación más corto (*the shortest setup time first rule - SST*): siempre que una máquina se encuentre liberada, esta regla selecciona para procesar el trabajo con el más corto tiempo de preparación (setup).

Regla del radio crítico (*critical ratio rule - CR*): esta regla programa los trabajos de acuerdo al radio del tiempo hasta el tiempo del vencimiento y el tiempo de procesamiento restante. Es un balance entre el EDD y LPT.

Regla del costo aparente de la tardanza con tiempos de preparación (*Apparent Tardiness Cost with Setups rule - ATCS*): esta regla es una combinación de la regla WSPT, MS y SST en un sencillo indicador de jerarquización o ranking. Bajo esta regla, los trabajos son secuenciados de uno en uno, es decir, cada vez que la máquina esta liberada, un

indicador es calculado para cada trabajo pendiente. Hay n trabajos y una máquina sencilla.

Los trabajos están sujetos a la secuencia dependiente de los tiempos de preparación S_{jk} . El objetivo es minimizar la suma de la tardanza ponderada. La prioridad de cualquier trabajo j depende del trabajo una vez completado cuando la máquina está liberada. La regla calcula el indicador del trabajo j una vez culminado el trabajo i en el tiempo t .

Las reglas básicas de programación son útiles cuando uno intenta encontrar un razonablemente un buen programa con respecto a un sencillo objetivo tal como el makespan, la suma de los tiempos de terminación o el máximo retraso. Sin embargo, en la práctica los objetivos son frecuentemente muy complicados.

Un objetivo realista puede ser una combinación de una gran cantidad de objetivos y estos pueden además ser una función del tiempo o una función del conjunto de trabajos esperando por ser procesados. Secuenciar los trabajos en base de 1 o 2 parámetros conduzca a un programa adecuado.

La heurística del cuello de botella cambiante (*the shifting bottleneck heuristic*): M denota el conjunto de todas las m máquinas. En la descripción de una iteración de la heurística, en esta heurística se asume que las iteraciones previas de una selección de arcos disyuntivos ya han sido fijadas para un subconjunto M_0 de máquinas. Por lo que para cada una de las máquinas en M_0 una secuencia de operaciones ya ha sido determinada.

Una iteración determina cual máquina en $M - M_0$ tiene que ser incluida para el siguiente conjunto M_0 . La secuencia en la cual las operaciones en esta máquina tienen que ser procesada es además generada en esta iteración. En orden para seleccionar la máquina para ser incluida en el

siguiente en M_0 , se hace un intento para determinar que una de las máquinas aún por ser programados causaría en uno u otro sentido la interrupción severa. Para determinar esto, el grafo dirigido original se modificó mediante la supresión de todos los arcos disyuntivos de las máquinas que aún no se ha programado y conservar solo los arcos disyuntivos relevantes de las máquinas en el conjunto M_0 . (uno desde cada par), llamar este grafo G'' .

Eliminando todos los arcos disyuntivos de una máquina específica implica que todas las operaciones en esta máquina, que originalmente iban a ser hecho en esta máquina, una tras otra, ahora se pueden hacer en paralelo (como si la máquina tiene capacidad infinita, o equivalentemente, cada uno de estas operaciones tiene la máquina por sí mismo).

El grafo G tiene uno o más caminos críticos que determinan el makespan correspondiente. Llame a este makespan $C_{max}(M_0)$. Supongamos que la operación (i, j) , $i \in \{M - M_0\}$, tiene que ser procesado en una ventana de tiempo para el cual la fecha de liberación y la fecha de terminación son determinados por el camino crítico en G'' , la fecha de liberación es igual al camino más largo en G'' desde el recurso U al nodo (i, j) y la fecha de terminación es igual a $C_{max}(M_0)$, menos el camino más largo desde el nodo (i, j) al sumidero mas p_{ij} . Considerar cada de una de las máquinas en $M - M_0$ como un separado problema del tipo 1 $|r_j| L_{max}$. El mínimo L_{max} del problema de máquina sencilla corresponde a la máquina i es denotado por $L_{max}(i)$ y es una medida de la criticidad de la máquina i .

Después de resolver todos estos problemas de máquinas sencillas, la máquina con el más largo retraso máximo es elegida. Entre las máquinas restantes, esta máquina, es en un sentido la más crítica o el "cuello de botella" (bottleneck por su terminología en inglés) y además por ser incluida en la siguiente en M_0 . Se etiqueta a esta máquina k , se denomina

a su máximo retraso $L_{max}(k)$ y se la programa acorde a la óptima solución obtenida por el problema de la máquina sencilla asociado con esta máquina. Si los arcos disyuntivos que especifica la secuencia de operaciones en la máquina k son insertados en el grafo G'' , entonces el makespan de la programación parcial actual por $L_{max}(k)$, esto es:

$$C_{max}(M_o \cup k) \geq C_{max}(M_o) + L_{max}(k).$$

Antes de empezar la siguiente iteración y determinar la siguiente máquina por ser programada, un paso adicional tiene que ser hecho dentro de la actual iteración. En este paso adicional todas las máquinas en el original conjunto M_o son reprogramadas en orden para ver si el makespan puede ser reducido. Eso es, una máquina, llamada máquina l es sacado del conjunto M_o y un grafo G'' es construido por modificando el grafo G'' a través de la inclusión de los arcos disyuntivos que especifica la secuencia de operaciones en la máquina k y la exclusión de los arcos disyuntivos asociados con la máquina l .

La máquina l es reprogramada por la solución correspondiente al problema $1 \mid r_j \mid L_{max}$ con fecha de liberación y terminación determinada por la ruta crítica en el grafo G'' . Reprogramando cada una de las máquinas en el original conjunto M_o completa la iteración.

En la siguiente iteración el procedimiento entero es repetido y otra máquina es agregada al actual conjunto $M_o \cup k$. (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005)

La heurística de la búsqueda local (Local Search): los algoritmos de recocido simulado y búsqueda tabú que se mencionaran a continuación en forma más detallada, estos se consideran como procedimientos de búsqueda local. Esta heurística se apalanca en la idea de que una solución puede ser mejorada mediante cambios pequeños y luego

revisando la respuesta. Sea un conjunto P de soluciones posibles cuya bondad es dada por una función de costo $c: P \rightarrow R$, que corresponde a la función que uno desea optimizar (se asume que la optimización es de minimización). Se define que para solución $x \in P$ un vecindario $N(x)$ donde cada solución contenida en $N(x)$ es denominada vecino y puede ser alcanzada mediante un desplazamiento unitario. Así pues, una ejecución de un algoritmo de búsqueda local determina un camino por el que cada solución visitada es vecina de la inmediatamente anterior. (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005)

La heurística del recocido simulado (Simulated Annealing): El recocido simulado es un proceso de búsqueda que tiene su origen en los campos de la ciencia de los materiales y la física. Esto fue desarrollado como un modelo de simulación para describir el proceso físico del recocido de la materia condensada. El procedimiento del recocido simulado funciona a través de un gran número de iteraciones. En la iteración k del procedimiento, hay un programa de actividades actual S_k tan bueno como un mejor programa que se encontrará más adelante, S_o . Para una simple máquina estos programas son secuencias (permutaciones) de los trabajos. Dado que $G(S_k)$ y $G(S_o)$ denotan los valores correspondientes de la función objetivo. Note que $G(S_k) \geq G(S_o)$.

El valor del mejor programa obtenido, $G(S_o)$ es frecuentemente referido como el criterio de aspiración. El algoritmo, en su búsqueda para un programa óptimo, se mueve de un programa a otro. En la iteración k , una búsqueda por un nuevo programa es conducido dentro del vecindario de S_k .

Primero, un llamado programa candidato, llamado S_c , es seleccionado desde el vecindario. Esta selección de un programa candidato puede ser hecho de forma aleatoria o en un organizado, posiblemente secuencial,

forma. Si, $G(S_0) < G(S_k)$ un movimiento es realizado, parametrizando $S_{k+1} = S_c$, si $G(S_c) < G(S_0)$, entonces S_0 es colocado igual a S_c .

Sin embargo, si $G(S_c) \geq G(S_k)$ un movimiento a S_c es realizado solo con la probabilidad:

$$P(S_k S_c) = \exp\left(-\frac{G(S_k) - G(S_c)}{\beta_k}\right);$$

con una probabilidad $1 - P(S_k S_c)$ el programa S_c es rechazado a favor del actual programa, colocando $S_{k+1} = S_k$. El programa S_0 no hace cambios cuando este es mejor que el programa S_c . Dado que $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq \dots > 0$ son controles de parámetros referidos como parámetros de enfriamiento o temperaturas (en analogía con el proceso de recocido mencionado arriba). Frecuentemente β_k es elegido para ser un a^k para algún a entre 0 y 1.

De la descripción anterior del procedimiento de recocido simulado es evidente se permite que se mueve a soluciones peores. La razón por permitir estos movimientos es dar al procedimiento la oportunidad de alejarse de un mínimo local y encontrar una solución mejor más adelante. Desde β_k disminuye con k , la probabilidad de aceptación para un movimiento no mejora, es menor en iteraciones posteriores del proceso de búsqueda. La definición de la probabilidad de aceptación también asegura que, si un vecino es significativamente peor, su probabilidad de aceptación es muy baja y un movimiento es poco probable hacerse. Varios criterios de parada se utilizan para este procedimiento. Una manera es dejar que el procedimiento de ejecución para un número predefinido de iteraciones. Otra es la de permitir que el procedimiento de ejecución hasta que no se ha logrado mejorar durante un predeterminado número de iteraciones. (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005)

La heurística de la búsqueda Tabú (Tabu search): esta heurística es en muchos aspectos similar al recocido simulado debido a que también se mueve de una lista a otra con el siguiente programa de ser peor que posiblemente el anterior. Para cada programa, un vecindario se define como en el simulado recocido. La búsqueda dentro de la vecindad por un candidato potencial para trasladarse a nuevo es un problema del diseño. Al igual que en el recocido simulado, esto se puede hacer al azar o de manera organizada.

La diferencia básica en la búsqueda tabú y el recocido simulado se encuentra en el mecanismo que se utiliza para la aprobación de un programa candidato. En la búsqueda tabú del mecanismo es no probabilístico, sino de una naturaleza determinística. En cualquier etapa del proceso de una lista tabú de mutaciones, el cual el procedimiento no permite hacer, se mantiene. Una mutación en la lista tabú puede ser, por ejemplo, un par de trabajos que no pueden ser intercambiado. La lista tabú tiene un número fijo de entradas (por lo general entre 5 y 9), que depende de la aplicación. Cada vez que un movimiento se realiza a través de una cierta mutación en el programa actual, la mutación inversa se introduce en la parte superior de la lista tabú; todas las otras entradas en la lista tabú son empujadas hacia abajo una posición y el fondo se elimina la entrada. La mutación inversa se pone en la lista tabú para evitar volver a un mínimo local que se ha visitado antes. Actualmente, en el momento que una mutación inversa que es tabú podría tener lugar a un nuevo programa, no visitado antes, eso es mejor que cualquiera generado hasta el momento.

Esto puede suceder cuando la mutación está cerca de la parte inferior de la lista tabú y un número de movimientos ya se han realizado desde la mutación se introduce en la lista. (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005)

La heurística de algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms*): los algoritmos genéticos son más generales y abstractos que el caso del recocido simulado y la búsqueda tabú. Los algoritmos genéticos, cuando se aplica a la programación, miran a las secuencias o los programas como individuos o como miembros de una población. Cada individuo se caracteriza por su salud. La salud de un individuo se mide por el valor asociado de la función objetivo. El procedimiento funciona de forma iterativa, y cada iteración se conoce como una generación.

La población de una generación se compone de los sobrevivientes de la generación anterior, además de los nuevos programas, es decir, los descendientes (hijos) de la generación anterior. El tamaño de la población por lo general se mantiene constante de una generación a la siguiente. La descendencia se genera a través de la reproducción y mutación de las personas que formaron parte de la generación anterior (los padres). Las personas a veces se denominan también como cromosomas. En un entorno multi-máquina de un cromosoma puede consistir en sub-cromosomas, cada uno que contiene la información sobre la secuencia de trabajo en una máquina. Una mutación en un cromosoma padre puede ser equivalente a un intercambio de pares adyacentes en la secuencia correspondiente. En cada generación los individuos más aptos reproducen mientras que en el ajuste mueren menos. Los procesos de nacimiento, defunción y reproducción que determinan la composición de la próxima generación pueden ser complejos, y por lo general dependerá de los niveles de condición física de los individuos de la actual generación.

Este esquema de diversificación es una característica importante de los algoritmos genéticos.

En los algoritmos genéticos el concepto de vecindad tampoco se basa en un simple programa, sino en varios programas. Un nuevo programa puede

ser generado mediante la combinación de partes de diferentes programas de la población actual. Un mecanismo que crea un nuevo programa de este tipo se refiere a menudo como un operador de cruce. (Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing and Services, 2005)

2.5. LEKIN: SISTEMA PARA PROGRAMAR LA PRODUCCIÓN

En esta investigación se dará solución a los problemas de secuenciación de la producción aplicando métodos heurísticos. En este caso, se utilizará el sistema LEKIN. Un sistema que ha sido desarrollado en Stern School of Business, NYU, cuyo objetivo principal es resolver los problemas de secuenciación descritos en la teoría de la programación y sus aplicaciones. El propósito de este sistema es ingresar y validar los datos del problema de programación, crear varias soluciones y evaluar su desempeño.

La gran ventaja del sistema LEKIN es que contiene varios algoritmos y heurísticas de programación y su diseño permite al usuario enlazar y probar sus propias heurísticas y comparar su desempeño con las heurísticas y algoritmos incluidos en el sistema LEKIN. El sistema puede trabajar en diferentes ambientes de máquinas como: máquinas simples, máquinas paralelas, flujo continuo, flujo flexible continuo, flujo intermitente y flujo flexible intermitente. (Pinedo, Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition, 2008)

Al inicio, se debe definir el algoritmo que se va a utilizar, esta selección debe realizarse de entre los 9 algoritmos de optimización que ofrece LEKIN:

- ATCS (Regla del primer costo aparente de retraso o tardanza)
- EDD (Regla de la fecha de entrega más temprana.)
- LPT (Regla “primero los trabajos de tiempo de Proceso más Largo)
- MS (Regla Mínima Actividad Primero)
- SPT (Regla de primero el tiempo de procesamiento más pequeño)
- WSPT (Regla del tiempo ponderado de procesamiento más corto.)

- CR (Regla de proporción crítica. Los trabajos se organizan según la proporción del tiempo de salida hasta la fecha del vencimiento y el tiempo del proceso restante),
- FCFS (primero en entrar - primero en salir. Organiza los trabajos en el orden de sus fechas del descargo.)
- WSPT (Regla de primero el tiempo de procesamiento más corto ponderado)

El sistema LEKIN contiene una serie de algoritmos de programación y heurísticas, está diseñado para permitir al usuario vincular y probar su propia heurística, comparar sus resultados con diferentes funciones objetivo, heurísticas y algoritmos de búsqueda que están integrados en el sistema.

Al momento de ingresar toda la información del plan de producción en el software LEKIN, éste muestra 4 ventanas, que son:

- Gráfico de Gantt,
- Conjunto de trabajos,
- Conjunto de secuencia, y,
- Cuadro de máquinas.

Estas 4 ventanas permiten observar distintos aspectos del proceso.

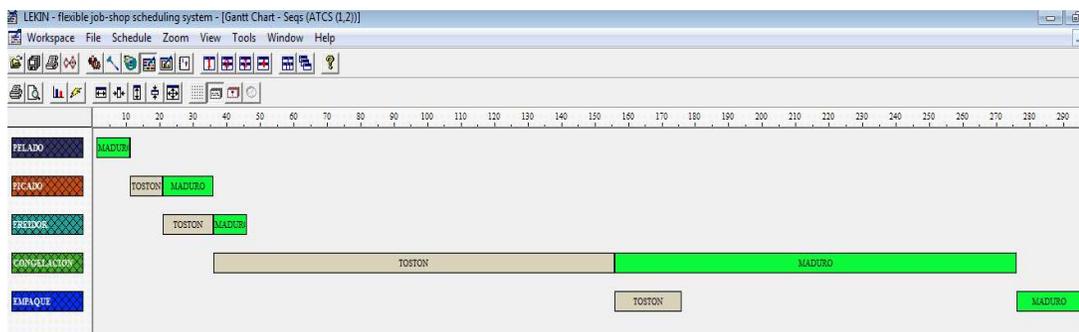
Ventana de Gráfica de Gantt: El diagrama de Gantt es probablemente la forma más popular de mostrar los horarios de la máquina. Fue diseñado por Henry Laurence Gantt (1861-1919). El cuadro muestra los tiempos de inicio, finalización y configuración de cada operación. Las operaciones del mismo trabajo tienen el color de este trabajo. Los cuadros con puntos corresponden a los tiempos de configuración de la operación y los períodos de indisponibilidad de la máquina.

El usuario puede activar o desactivar las líneas de la cuadrícula, los nombres de los trabajos, marcar el trabajo más tarde y los pares de estado en el

gráfico. Los trabajos tardíos pueden estar marcados con un borde rojo en lugar de negro. Los pares de estado se muestran en los rectángulos correspondientes a los tiempos de configuración. Un par de estado define una entrada en la matriz de configuración que es responsable del tiempo de configuración en cuestión.

En la **Figura 5** se puede visualizar los tiempos de proceso de cada uno de los trabajos y el nivel de utilización de las máquinas. (Pinedo, Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition, 2008).

Figura 5 Gráfica de Gantt



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Conjunto de trabajos: Contiene toda la información respecto a cada trabajo (peso, tiempos de inicio y proceso, entre otros). Tiene una estructura de árbol de 2 niveles, muestra para cada trabajo: el nombre, el peso, la fecha de lanzamiento, la fecha de vencimiento y el tiempo total de procesamiento. Para cada operación: el centro de trabajo requerido, el tiempo de procesamiento y el estado.

Figura 6 Conjunto de trabajos

ID	Wght	Rls	Due	Pr.tm.	Stat.	Bgn	End	T	wT
MADURO	1	1	24	175		2	287	263	263
PELADO				10	A	2	12		
PICADO				15	A		27		
FREIDOR				10	A	27	37		

Además de eso, si hay un horario activo, se muestra información de tiempo para cada trabajo y operación, se puede observar en la **Figura 6** (Pinedo, *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, Third Edition, 2008).

Ventana de Secuencias: Muestra la lista de trabajos en el orden en el que son procesados en cada una de las máquinas y el tiempo promedio de utilización de las mismas en el proceso (sin contar el tiempo ocioso).

Proporciona muchas reglas de secuenciación para generar horarios que pueden ser adecuados para el objetivo en cuestión. Las secuencias generadas se muestran en esta ventana. La información se organiza en una estructura de árbol de dos niveles, con máquinas en el nivel de raíz y operaciones en el nivel de hoja. Para cada máquina y operación, los datos incluyen tiempos de inicio, tiempos de finalización, tiempos de configuración y otros datos útiles. El rendimiento general del programa se muestra en la parte inferior de esta ventana. Al hacer doble clic en una operación, se abre la ventana de diálogo Trabajo y se carga con los datos para la operación seleccionada. La ventana de secuencia no tiene ningún comando específico.

Se puede observar en la **Figura 7** (Dinero, Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition, 2008),

Mch/Job	Setup	Start	Stop	Pr.tm
PELADO	0			10
PICADO	0			25
FREIDOR	0			25
CONGELACION	0			240
EMPAQUE	0			40
Summary				

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Ventana Cuadro de Máquinas. Describe toda la información con respecto a los centros de trabajo, los centros de trabajo, a cada estación de trabajo deseada.

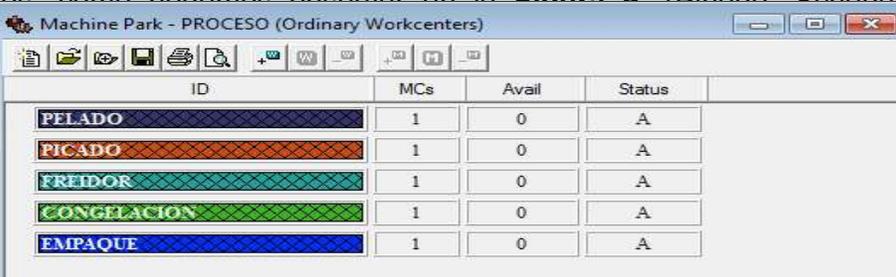
Schedule	Time	C _{max}	T _{max}	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
BASE	1	18	2	2	45	3	83	5
BASE	1	18	2	2	45	3	83	5
General SB Routine / Cmay	1	17	4	1	41	4	78	4
BASE	1	18	2	2	45	3	83	5

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Ventana de Parque de máquinas: Muestra los resultados obtenidos en la aplicación de 7 de los 9 algoritmos que ofrece el software. Esta ventana cubre la parte relacionada con la máquina del espacio de trabajo. En una conveniente estructura de árbol de 2 niveles, muestra para cada centro de trabajo: el nombre y la cantidad de máquinas; para cada máquina: el nombre, la fecha de disponibilidad y el estado inicial. Si el tipo de parque de máquinas está configurado como ordinario, la ventana no muestra máquinas separadas. La información de la máquina está integrada en las líneas del centro de trabajo.

El orden de visualización de los centros de trabajo se puede cambiar en el cuadro de diálogo Ruta de flujo. Si el tipo de grupo de trabajos está establecido en Flow Shop, este orden también define las rutas de todos los trabajos, como se resume en el capítulo 10. **Figura 9 Parque de Máquinas**

Theor

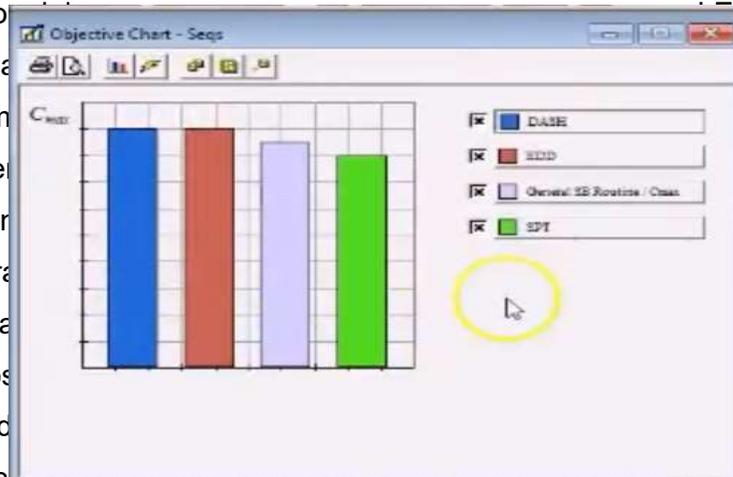


ID	MCs	Avail	Status
PELADO	1	0	A
PICADO	1	0	A
FREIDOR	1	0	A
CONGELACION	1	0	A
EMPAQUE	1	0	A

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Ventana de Gráficos de Objetivos Se observan gráficamente los resultados

del objetivo. Esta ventana está diseñada para mostrar los resultados de programación de objetivos en un gráfico de barras. En esta ventana se mostrará en un gráfico de barras los resultados de programación de objetivos. Si hay demasiados datos, el gráfico se volverá desordenado. Para volver a un gráfico al



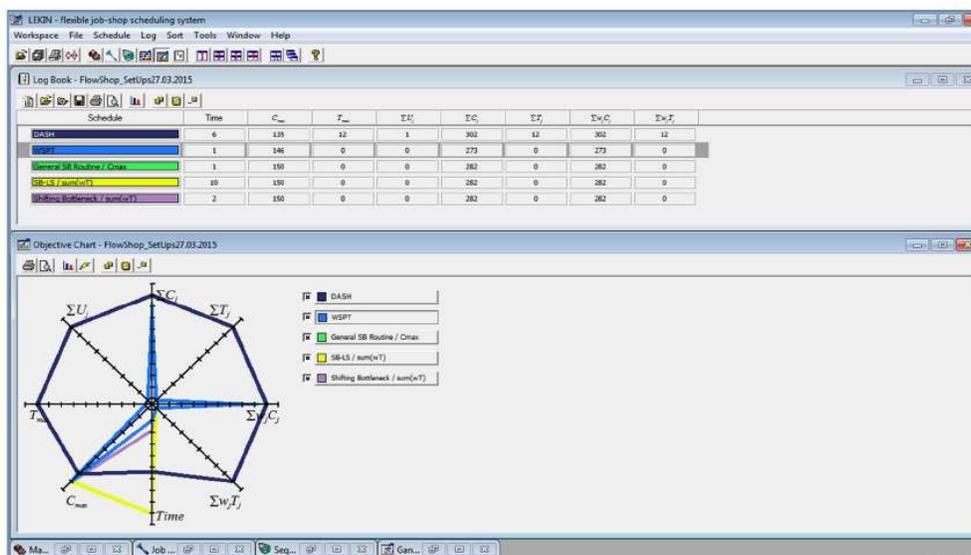
borrar las casillas de verificación correspondientes. También se puede usar para copiar, cambiar, o eliminar los datos registrados. En

este sentido, duplica la funcionalidad de la ventana del Libro de registro.

Figura 10, (Pinedo, Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition, 2008).

Una vez que el usuario hay concluido con el ingreso de toda la información puede realizar la corrida del sistema, en la **Figura 11** LEKIN muestra la comparación de resultados mediante las diferentes heurísticas, de esta forma se puede determinar el programa de producción que cumple con los objetivos esperados. (Pinedo, Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition, 2008).

Figura 11 Comparación de Resultados y Objetivos



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

CAPÍTULO 3

DIAGNÓSTICO ACTUAL DE LA SECUENCIACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL PLAN SEMANAL DE PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA

3.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA DE ESTUDIO

La empresa de estudio tiene aproximadamente 8 años dentro del mercado de exportación de productos pre fritos congelados derivados del plátano verde y maduro, con una facturación de 13 millones de dólares anuales.

La compañía cuenta con 300 trabajadores aproximadamente, que corresponde a 250 obreros y 50 personal administrativo. En la actualidad posee una hacienda de más de 530 hectáreas que provee el 50% de la materia prima: el Plátano y una fábrica donde se manufactura y procesa las tajadas de maduro y tostón pre frito congelado.

La empresa posee certificaciones de BPM, HACCP, FSSC 22000, BASC, FDA, ETHICAL SOURCING STANDARS, con las cuales demuestra su compromiso de mejora continua a sus clientes.

Actualmente la empresa dispone de 19 clientes y 33 marcas exportando más de 300 contenedores anualmente a diferentes destinos del mundo como Estados Unidos, Inglaterra, Chile. Se detalla en la **Figura 12** los destinos de exportación que mantiene actualmente, Estados Unidos (Chicago, Miami, Los Ángeles, Atlanta, Nueva Orleans), Puerto Rico, Inglaterra, y Chile.

Figura 12 Destinos de Exportación

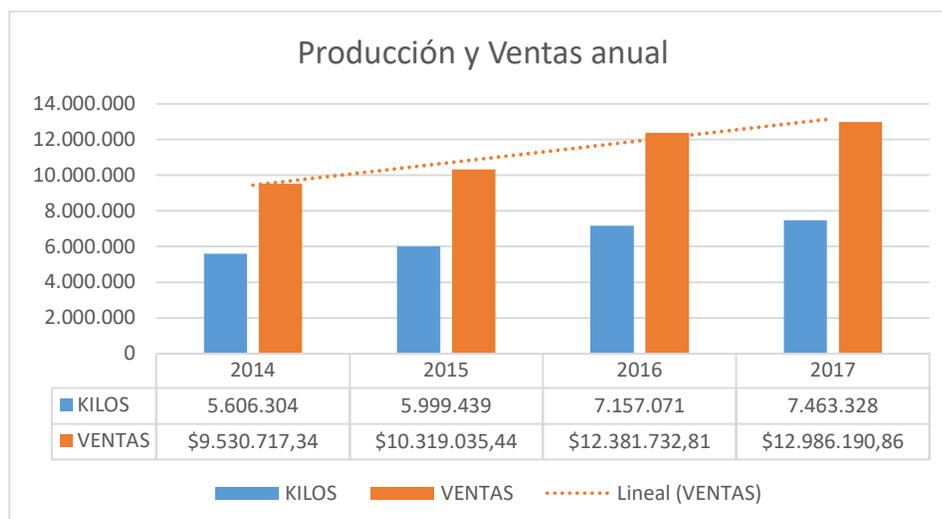
FCNM



ESPOL

La empresa que se va a realizar el estudio ha tenido un constante crecimiento en estos últimos años. En la **Figura 13** se muestra el incremento que ha tenido en los últimos 4 años. En el año 2,016 la empresa realizó una inversión adquiriendo bandas transportadoras en el proceso de pelado, picado y freidora de esta manera logro ser un poco más eficiente.

Figura 13 Producción y Ventas



Fuente: Empresa de estudio – Elaboración: Propia

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

3.2.1. PROCESO TAJADAS DE PLÁTANO MADURO PRE FRITO CONGELADO.

La materia prima (plátano verde) se recibe en camiones al granel se descarga en bins para el proceso de maduración, es almacenado en cámaras de maduración por un periodo de 24 horas con gas etileno a una temperatura de 25 grados centígrados. Posterior a este proceso se retira la materia prima y es almacenado en galpones al medio ambiente por 6 días aproximadamente para ser procesado.

El maduro en cascara ingresa en bins al área de proceso donde primero pasa por un tanque de desinfección de 3 litros de dióxido de cloro con una concentración de 50 ppm, el área de calidad controla la concentración cada dos horas.

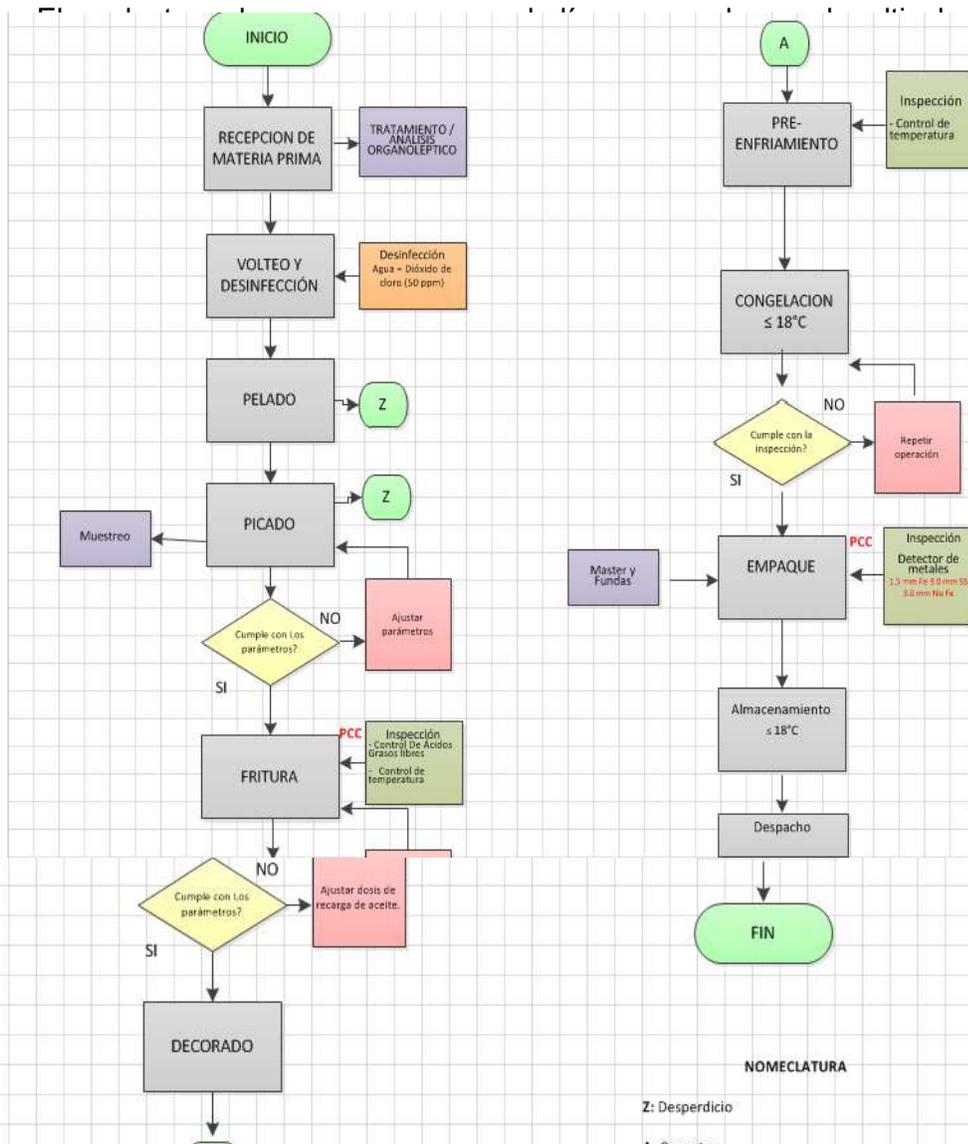
El plátano maduro ingresa en bins al área de pelado, es pesado en un bascula donde se registra su peso. El área de pelado consta de 10 personas y se encargan de retirar manualmente la cascara con una productividad de 160 kg/hr, depositan en un ducto la cascara donde es transportada por medio de una banda al contenedor de desechos y la pulpa se coloca en otro ducto donde se pesa y se transporta por medio de una banda a la mesa de picado. Se coloca la pulpa en tablas de picar y el personal realiza cortes inclinados en relación al eje central del maduro, que se forme superficies elípticas planas. El área de picado consta de 10 personas y tienen una productividad de 150 kg/hr.

Las tajadas obtenidas se depositan en un ducto donde se pesa y transporta a la banda del freidor. La temperatura del aceite debe de estar entre 160 a 190 grados centígrados durante 4 minutos aproximadamente,

fijar una velocidad 20 a 50 Hz. El producto sale del freidor con una temperatura de 70 grados aproximadamente, se transporta por la banda de pre enfriamiento y el producto baja su temperatura hasta 35 grados centígrados aproximadamente.

El producto es decorado en bandejas de acero inoxidable y se lo coloca en coches donde son llevados a las bodegas de enfriamiento, se almacena durante 35 minutos aproximadamente y el producto sale con una temperatura de -10 grados aproximadamente. Posterior a este proceso el producto se transporta a los tunes de congelación donde es almacenado por 45 minutos y sale con una temperatura de -14 a -18

Figura 15 Proceso de Maduro en tajadas



Diseño de un modelo matemático aplicado a la minimización de tiempos no productivos y optimización de la productividad en la industria de alimentos.

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**



Fuente: Internet – Elaboración: Propia



3.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Actualmente la empresa de estudio realiza su programación de manera empírica y en base a las necesidades de cada cliente. Generalmente la planificación cambia constantemente por la presión por parte de los clientes. El planificador envía su programa semanalmente a producción de las órdenes que se deben de enviar, detallando el cliente, producto, cantidades, materia prima. **Figura 16**

*Diseño de un modelo matemático aplicado a la
 minimización de tiempos no productivos y
 optimización de la productividad en la industria
 de alimentos.*

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**

Figura 16 Programación del Planificador

SEM DESPACHO	NAVIERA DESTINO	PRODUCTO-MARCA-PRESENTACION	ORDEN	CARTONES PRODUCIDOS	CARTONES POR PRODUCIR	DIAS DE PROCESO	KG CASCARA	KG TERMINADOS PENDIENTES
3	SEABOARD-NY	Maduro 20 X 1.5 Lb	500	0	500	1	14,791	6,804
	SEABOARD-NY	Maduro 12 X 2 Lb	600	0	600	1	14,200	6,532
		Maduro 14 X 2 Lb	1,200	0	1,200	1	33,132	15,241
	MSC-NY	Maduro 6 X 2. 5 Lb	1,000	0	1,000	1	14,791	6,804
		Maduro 10 X 4 Lb	1,100	0	1,100	2	43,388	19,958
		Maduro 6 X 4 Lb	1,200	0	1,200	1	28,399	13,064
		Maduro 7 X 4 Lb	200	0	200	0	5,522	2,540
		Maduro 8 X 4 Lb	200	0	200	0	6,311	2,903
	KING OCEAN-OR	Maduro 4 X 5 Lb	500	0	500	0	9,861	4,536
		Maduro 5 X 5 Lb	600	0	600	1	14,791	6,804
		Maduro 6 X 5 Lb	600	0	600	1	17,749	8,165
	SEABOARD-NY	Maduro 4 X 6 Lb	600	0	600	1	14,200	6,532
		Maduro 6 X 6 Lb	1,100	0	1,100	2	39,049	17,962
Total general			9,400	0	9,400	11	256,184	117,845

Fuente: Empresa de Estudio – Elaboración: Propia

Diseño de un modelo matemático aplicado a la
 minimización de tiempos no productivos y
 optimización de la productividad en la industria
 de alimentos.

MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

En base a esta planificación, el área de producción procede a programar los días de proceso de maduro y tostón, coordinar con compras el ingreso de materia prima verde en cascara para el proceso de maduro y verde pelado para el proceso de tostón. Coordinar con bodega los insumos y material de empaque que se requiere para el proceso, así como también coordina con exportaciones la naviera, día de carga, día de despacho. Figura 17

Figura 17 Programación de Producción

ENERO. 2018		8		Lunes		15		Martes		16		Miercoles		17		Jueves		18		Viernes		19		Sabado		20		Total		
Producto	Pedido		Lunes	15	Martes	16	Miercoles	17	Jueves	18	Viernes	19	Sabado	20	Total															
	X Procesar	Saldo													Master	Kilos	Master	Kilos	Master	Kilos	Master	Kilos	Master	Kilos	Master	Kilos				
1	Maduro 20 X 1.5 Lb	500	0	500	4,550																								500	4,550
2	Maduro 12 X 2 Lb	600	0	600	4,920																								600	4,920
3	Maduro 14 X 2 Lb	1,200	0	1,200	16,320																								1,200	16,320
4	Maduro 6 X 2. 5 Lb	1,000	0			1,000	10,900																						1,000	10,900
5	Maduro 10 X 4 Lb	1,100	0			1,100	11,990																						1,100	11,990
6	Maduro 6 X 4 Lb	1,200	0					1,200	10,920																				1,200	10,920
7	Maduro 7 X 4 Lb	200	0							200	1,820																		200	1,820
8	Maduro 8 X 4 Lb	200	0									200	2,000																200	2,000
9	Maduro 4 X 5 Lb	500	0							500	5,000																		500	5,000
10	Maduro 5 X 5 Lb	600	-200							200	2,000	200	2,000																400	4,000
11	Maduro 6 X 5 Lb	600	0											600	7,620														600	7,620
12	Maduro 4 X 6 Lb	600	0											100	1,270	500	6,350											600	7,620	
13	Maduro 6 X 6 Lb	1,100	0													1,100	13,970											1,100	13,970	
TOTAL		9,400																											9,200	101,630
Materia prima Maduro				0	5,857	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,857	98,000	
				21,044		24,222		24,267		24,044		24,200		20,320		138,098														201,203

Fuente: Internet – Elaboración: Propia

A continuación, se detalla los productos terminados que la línea de producción elabora.

Ítem	Código	Descripción	PLAN SEMANAL		
			Peso	Pedido semanal cartones	Kilos P.T
1	MS1	Maduro 20 X 1.5 Lb	1.50 Lb	500	6,804
2	MS2	Maduro 12 X 2 Lb	2.00 Lb	600	6,532
3	MS3	Maduro 14 X 2 Lb	2.00 Lb	1,200	15,241
4	MS4	Maduro 6 X 2. 5 Lb	2.50 Lb	1,000	6,804
5	MS5	Maduro 10 X 4 Lb	4.00 Lb	1,100	19,958
6	MS6	Maduro 6 X 4 Lb	4.00 Lb	1,200	13,064
7	MS7	Maduro 7 X 4 Lb	4.00 Lb	200	2,540
8	MS8	Maduro 8 X 4 Lb	4.00 Lb	200	2,903
9	MS9	Maduro 4 X 5 Lb	5.00 Lb	500	4,536
10	MS10	Maduro 5 X 5 Lb	5.00 Lb	600	6,804
11	MS11	Maduro 6 X 5 Lb	5.00 Lb	600	8,165
12	MS12	Maduro 4 X 6 Lb	6.00 Lb	600	6,532
13	MS13	Maduro 6 X 6 Lb	6.00 Lb	1,100	17,962
Total					117,845

T, Fuente: Empresa de estudio – Elaboración: Propia

En la se puede apreciar los productos terminados que actualmente disponemos:

- 13 presentaciones para Maduro,

Disponemos un total de 29 presentaciones que dispone la línea de producción y elabora semanalmente de acuerdo a los requerimientos de los clientes.

La línea de producción trabaja 20 horas al día de acuerdo a la programación se destina 4 días proceso maduro y 2 días proceso de tostón.

En la **Tabla 3** se detalla el proceso por etapa de tajadas de maduro por día y en la **Tabla 4** se detalla el proceso por etapa del tostón, indicando el número de personas que se requiere por día, horas de trabajo, horas de set up, Kg/hora y Kg/Hr/Hombre.

Tabla 3 Proceso Productivo de Maduro

Ítem	Etapa	# Personas	Horas	Kg/Hr	kg/Hr/Persona
------	-------	---------------	-------	-------	---------------

1	Pelado	20	20	200	4,000
2	Picado	20	20	180	3,600
3	Freidora	12	20	290	3,480

Fuente: Empresa de estudio – Elaboración: Propia

En el ANEXO A, se muestra un detalle de la necesidad de materia prima, la capacidad instalada, y las horas en cada etapa de proceso, en base a la plan de producción semanal.

En el ANEXO B, se muestra los tiempos de set up del multicabezal.

CAPÍTULO 4

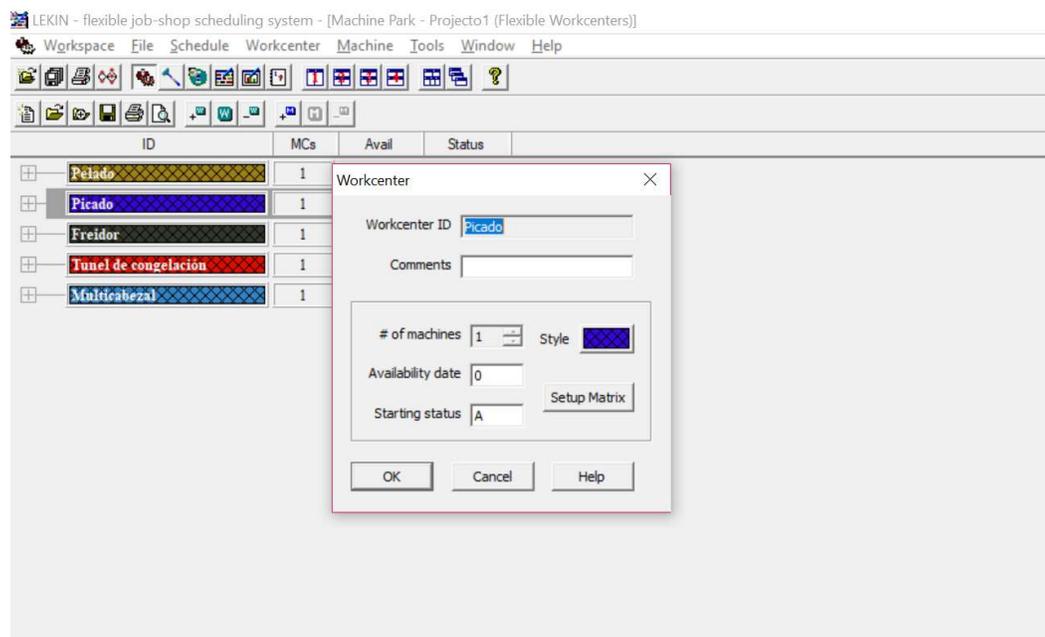
IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN CON EL SISTEMA LEKIN

4.1. PROGRAMACIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

En el capítulo anterior, se mostró los productos, los tiempos de las etapas de cada proceso, el volumen de producción por etapa, esta información procederemos a ingresar en el software LEKIN con el objetivo de verificar el desempeño de la situación actual.

En la **Figura 20** se muestra el ingreso de los 5 subprocesos: pelado, picado, freidor, túnel de congelación y multicabezal.

Figura 18 Parametrización de las máquinas y tareas en LEKIN



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Terminado de ingresar los datos de las 5 máquinas, ingresamos los datos de cada uno de los productos terminados del Maduro y Tostón, tiempos de operación, tiempos de terminación, como se muestra en la **Figura 21**.

Figura 19 Configuración de los trabajos en LEKIN

ID	Wght	Rls	Due	Prtm.	Stat.	Bgn	End	T	wT
MS1	1	1	48	16		1	17	0	0
MS2	1	1	48	15		3	22	0	0
				2	A	3	5		
				2	A	5	7		
				2	A	7	9		
				4	A	11	15		
				5	A	17	22		
MS3	2	1	48	36		5	41	0	0
				4	A	5	9		
				5	A	9	14		
				5	A	14	19		
				9	A	19	28		
				13	A	28	41		
MS4	2	1	48	16		9	47	0	0
MS5	2	1	48	44		11	61	13	26
MS6	2	1	72	29		17	70	0	0
MS7	1	1	72	7		21	72	0	0
MS8	1	1	72	7		22	74	2	2
MS9	1	1	72	9		23	77	5	5
MS10	1	1	72	15		24	82	10	10
MS11	3	1	72	18		26	87	15	45
MS12	3	1	120	19		28	96	0	0

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Una vez ingresada toda la información de los trabajos y máquinas en el sistema LEKIN acorde a la situación actual del programa de producción, en la **Figura 22** nos muestra la secuencia de cada máquina y tiempos de parametrización.

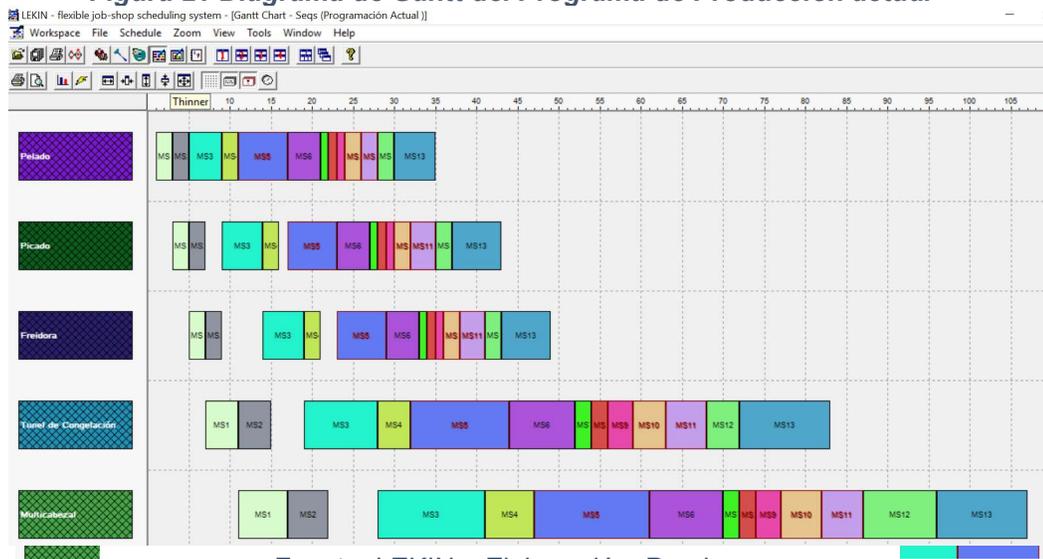
En la **Figura 23** se puede visualizar el diagrama de Gantt del programa actual de producción.

Figura 20 Secuencia de las Máquinas

Mch/Job	Setup	Start	Stop	Pr.tm
Pelado	0			34
Picado	0			37
Freidora	0			37
Tunnel de Congelación	0			72
Multicabezal	0			90
MS1	0	11	17	6
MS2	0	17	22	5
MS3	0	28	41	13
MS4	0	41	47	6
MS5	0	47	61	14
MS6	0	61	70	9
MS7	0	70	72	2
MS8	0	72	74	2
MS9	0	74	77	3
MS10	0	77	82	5
MS11	0	82	87	5
MS12	0	87	96	9
MS13	0	96	107	11

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Figura 21 Diagrama de Gantt del Programa de Producción actual



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

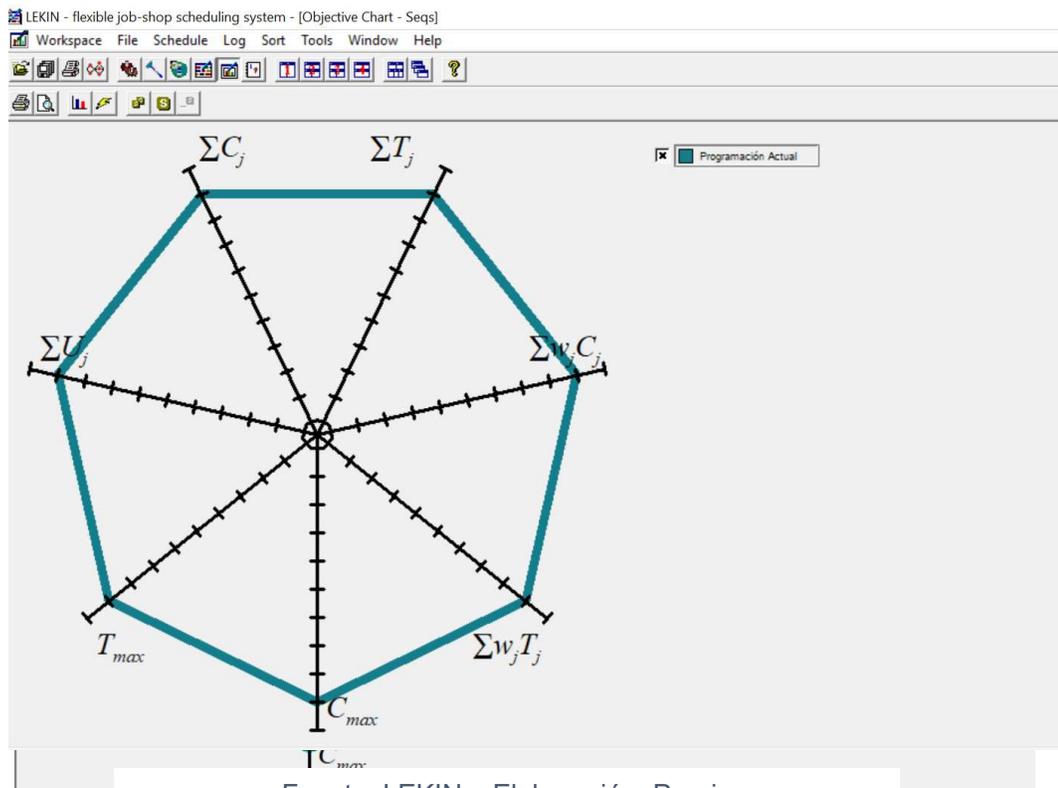
Figura 22 Resumen de la Programación Actual

The screenshot shows the LEKIN software interface with a menu bar (Workspace, File, Schedule, Log, Sort, Tools, Window, Help) and a toolbar. Below the toolbar is a table with the following data:

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	ΣU_j	ΣC_j	ΣT_j	$\Sigma w_j C_j$	$\Sigma w_j T_j$
Programación Actual	1	107	15	5	853	45	1652	88

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Figura 23 Diagrama de Resultados de la Programación actual



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

En la **Figura 24** se muestra los resultados de la programación en el sistema LEKIN que mantiene actualmente el programa de producción, en la siguiente **Tabla 4** observaremos los datos en minutos y horas.

Tabla 4 Resultados del programa actual de producción

Resultado	Volumen	Time	Cmax	Tmax	ΣU_j	ΣC_j	ΣT_j	$\Sigma w_j C_j$	$\Sigma w_j T_j$
Progr. Actual /min	38,400	1	2,495	1,355	1	11,954	1,355	18,130	2,110

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Analizando los resultados podemos darnos cuenta lo siguiente: el makespan C_{max} es de 42 horas, esto nos indica que el último trabajo en salir termina en la hora 42.

La tardanza máxima T_{max} es de 23 horas, esto nos indica que un trabajo tuvo 23 horas tarde en su entrega.

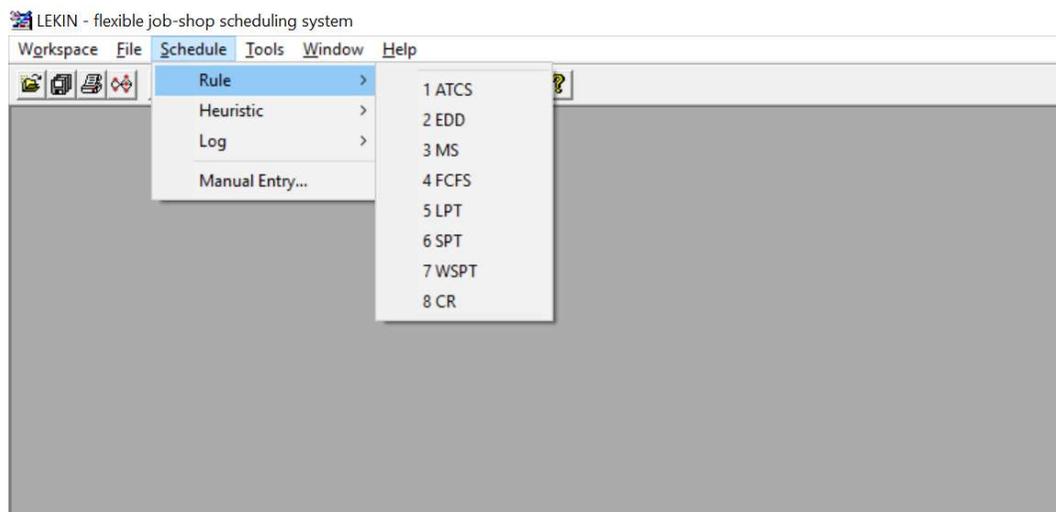
La sumatoria de las penalidades ΣU_j tiene 1, es decir, que existe un trabajo que su terminación fue después de la fecha de entrega,

Estos tres indicadores aportan valor en la toma de decisiones y son los principales que vamos a considerar para analizar si la propuesta es mejor o no que la situación actual.

4.2. PROPUESTA DE UN PROGRAMA DE PRODUCCIÓN CON EL USO DEL SISTEMA LEKIN

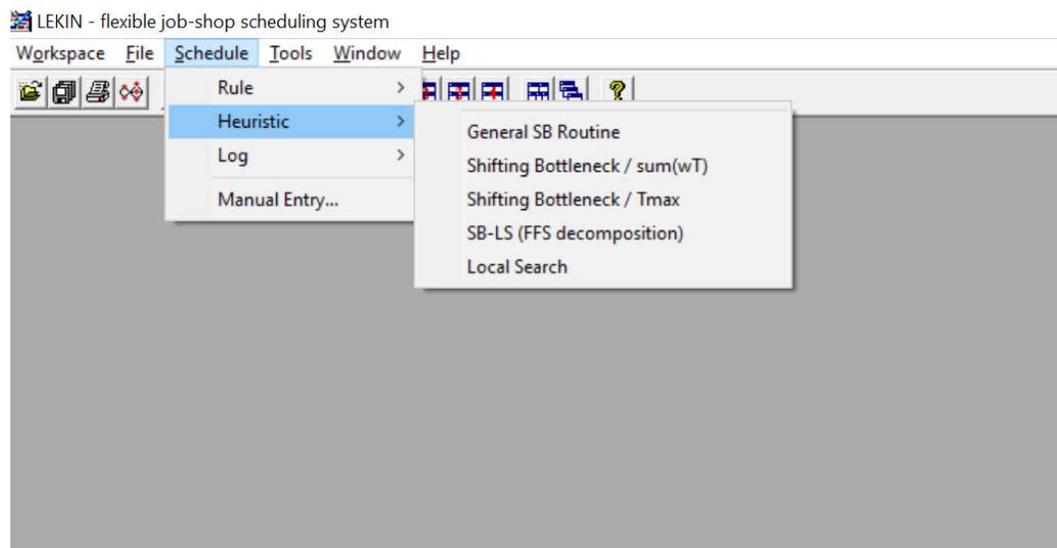
Por medio del sistema LEKIN procederemos a realizar una mejor propuesta para la programación de producción. LEKIN posee reglas básicas y heurísticas de programación, se muestra en la **Figura 26** y **Figura 27**.

Figura 24 Reglas de Programación en LEKIN



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Figura 25 Heurísticas de Programación en LEKIN



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Procesando todas las reglas y heurísticas que posee LEKIN, podemos analizar cada una de ellas y seleccionar la mejor propuesta. LEKIN permite visualizar un resumen detallado de cada una de las reglas y heurísticas.

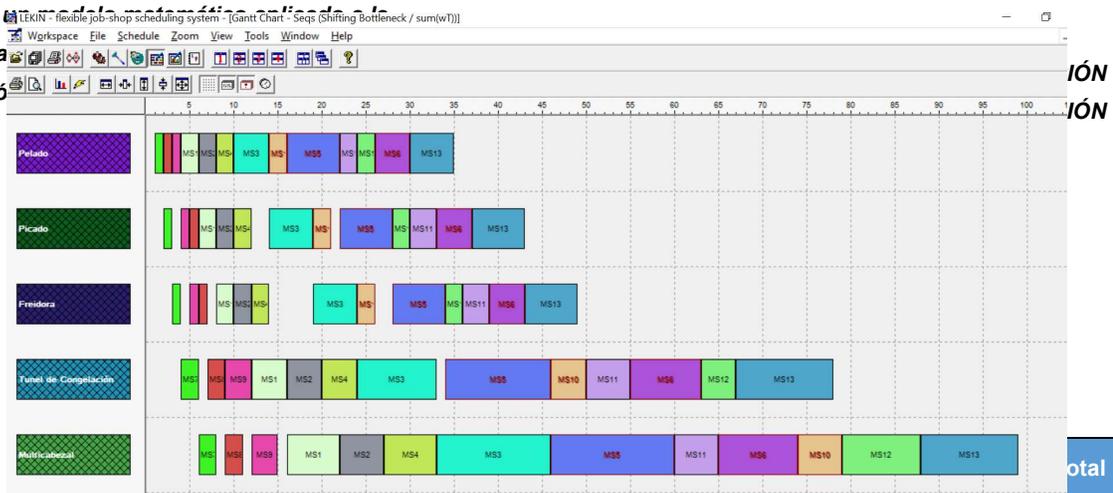
Los indicadores que vamos a analizar serán: el makespan C_{max} , tardanza máxima T_{max} y sumatoria de las penalidades ΣU_j , buscaremos su minimización.

Figura 26 Resultado de la propuesta de programa de producción.

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	ΣU_j	ΣC_i	ΣT_i	$\Sigma w_i C_i$	$\Sigma w_i T_i$
ATCS (1,1)	1	127	59	10	1049	144	1973	237
CR	1	140	63	13	1229	317	2323	571
DASH	4	101	10	3	728	23	1452	37
EDD	1	107	15	5	853	45	1652	88
FCFS	1	107	15	5	853	45	1652	88
General SB Routine / Cmax	1	101	33	1	636	33	1372	66
Local Search / Cmax	61	98	50	2	560	75	1166	150
LPT	1	127	67	10	1285	448	2139	609
MS	1	121	29	11	1109	208	2010	288
Programación Actual	1	107	15	5	853	45	1652	88
Shifting Bottleneck / sum (wT)	2	99	12	3	627	21	1344	35
SPT	1	98	50	2	553	75	1175	150
WSPT	1	104	56	4	695	145	1194	243

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

La **Figura 28** muestra el desempeño de todas las propuestas de programación por LEKIN, para poder seleccionar la mejor, se procederá a realizar una matriz de ponderación en donde se dará un valor a los 3 indicadores que analizaremos el makespan C_{max} , tardanza máxima T_{max} y sumatoria de las penalidades ΣU_j , buscaremos su minimización.



ACTS	0	53	34	20	0	0	0	0	108
									109
									74
EDD	0	52	28	12	0	0	0	0	92
FCFS	0	46	22	12	0	0	0	0	79
General SB Routine / Cmax	0	46	22	18	0	0	0	0	86
Local Search / Cmax	0	41	22	1	0	0	0	0	65
LPT	0	52	28	29	0	0	0	0	109
MS	0	52	28	29	0	0	0	0	109
Programa Actual	0	42	23	1	0	0	0	0	65
SPT	0	42	23	1	0	0	0	0	65
WSPT	0	42	23	1	0	0	0	0	65

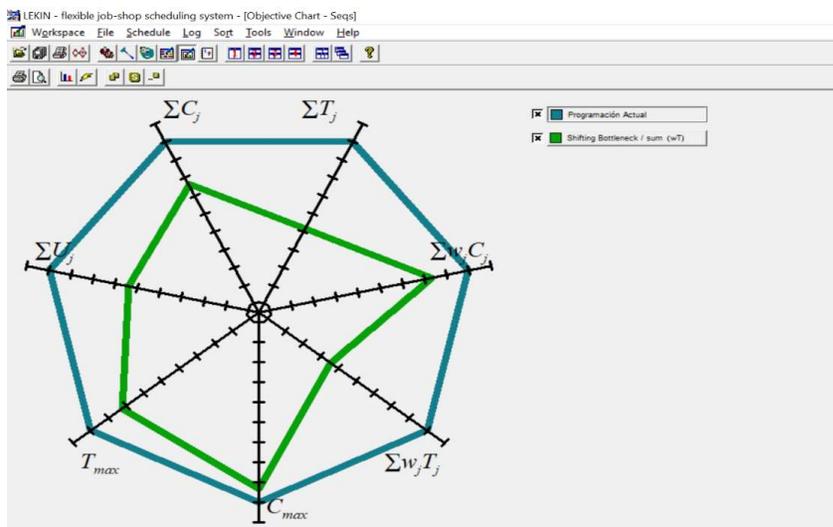
Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

Acorde a esta matriz, representada en la **Tabla 5** el programa de producción seleccionado por la heurística es **Tabla 6** búsqueda local o Local Search / C_{max} .

Tabla

Figura 32de la

Figura 32 Diagrama de resultados Programación Actual VS Propuesta
 LEKIN



Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

En la **Tabla 8** se muestra la estimación de ingresos que la empresa obtendría anualmente con la implementación de la propuesta de programación de LEKIN, utilizando los mismos recursos (personal, tiempo, maquinaria). **Representa un incremento del 36% en sus ingresos anuales y 9% de incremento de capacidad en la línea de producción.**

Tabla 8 Estimación de Ingresos

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor	Detalle
Incremento de producción	Horas	8		Podemos procesar 8 horas más por semana
Producción adicional semanal	Kilos	11,080	\$ 19,279.20	Procesamos 1,385 kg / hora P.T/ Costo kg \$1.74
Producción adicional mensual	Kilos	221,600	\$ 385,584.00	Laborando 5 días a la semana, 20 días al mes
Producción adicional anual	Kilos	2,659,200	\$ 4,627,008.00	Incremento de \$4.6 millones al año aplicando la propuesta de LEKIN

Fuente: LEKIN – Elaboración: Propia

*Diseño de un modelo matemático aplicado a la
minimización de tiempos no productivos y
optimización de la productividad en la industria
de alimentos.*

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se cumplió el objetivo general planteado en esta tesis que consistía en optimizar el programa de producción y se logró incrementar el 9% de la línea productiva generando un incremento de sus ventas del 36% anual.
- Se cumplieron los objetivos específicos planteados.
- Se implementó correctamente el uso del software LEKIN para el desarrollo de la presente tesis.
- La heurística del cuello de botella cambiante, presentó la mejor propuesta para el programa de producción con respecto a las demás heurísticas y reglas que proporciona el software LEKIN.
- La selección de la heurística del cuello de botella cambiante, se basó en una ponderación de tres factores de desempeño (makespan C_{max} , tardanza máxima T_{max} y sumatoria de las penalidades $\sum U_j$), donde la propuesta con la menor sumatoria total, fue seleccionada.
- El programa de producción propuesto mediante el sistema LEKIN, genera un incremento de la línea de producción del 9% aproximadamente, por ende un mayor ingreso para el área comercial. Esto representa un incremento de 11,080 kilos diarios, laborando 5 días a la semana representa 55,400 kilos representa \$96,396 semanales y anualmente representa \$4.6 millones de ingreso en la línea comercial.
- El makespan C_{max} , se reduce en un 7% con referencia a la producción actual, esto implica una mayor eficiencia en la línea de producción ya que requiere menor tiempo para procesar el mismo volumen de producción por ende incrementa la capacidad semanal de producción de maduro en tajadas con los mismos recursos.

- La tardanza máxima T_{max} , disminuye un 20% en comparación a la situación actual de la empresa de estudio, esto implica un mejor nivel de servicio.
- La sumatoria de las penalidades ΣU_j , disminuye un 40% con respecto a la programación actual de la compañía, esto indica un mejor nivel de servicio.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se debe revisar periódicamente el modelo desarrollado en el software LEKIN y validar que la información ingresada este alineada con la realidad, dado que los cambios en la línea de producción son constantes.
- Se recomienda aplicar esta práctica en otras empresas de producción dado a los beneficios obtenidos implementando un programa de producción mediante un software matemático.

BIBLIOGRAFÍA

- Jay Heizer, B. R. (2008). *Dirección de la Producción y de operaciones. Decisiones tácticas 8va edición*. Madrid: Pearson Education S.A.
- Pinedo, M. L. (2005). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. USA: Springer.
- Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition*. NY, USA: Springer.
- Richard B. Chase, F. R. (2009). *Administración de operaciones producción y cadena de suministros, duodécima edición*. México, D.F.: McGraw- Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

*Diseño de un modelo matemático aplicado a la
minimización de tiempos no productivos y
optimización de la productividad en la industria
de alimentos.*

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**

ANEXO A

Ítem	Codigo	Descripción	PLAN SEMANAL			NECESIDAD M.P POR ETAPA DE PROCESO						CAPACIDAD INSTALADA POR ETAPA DE PROCESO						TOTAL				
			Peso	Pedido semanal cartonés	Kilos P.T	M.P Kg	Pelado Kg	Picado Kg	Freidor Kg	Congelación Kg	Empaque Kg	Pelado Kg/Hr	Picado Kg/Hr	Freidor Kg/Hr	Congelación Kg/Hr	Multicabezal Empaque Kg/Hr	Pelado Hr		Picado Hr	Freidor Hr	Congelación Hr	Multicabezal Empaque Hr
1	MS1	Maduro 20 X 1.5 Lb	1.50 Lb	500	6,804	14,791	7,987	7,544	7,544	6,940	6,804	4,000	3,600	3,480	1,700	1,100	2	2	2	4	6	16.53
2	MS2	Maduro 12 X 2 Lb	2.00 Lb	600	6,532	14,200	7,668	7,242	7,242	6,662	6,532	4,000	3,600	3,480	1,700	1,200	2	2	2	4	5	15.37
3	MS3	Maduro 14 X 2 Lb	2.00 Lb	1,200	15,241	33,132	17,891	16,897	16,897	15,546	15,241	4,000	3,600	3,480	1,700	1,200	4	5	5	9	13	35.87
4	MS4	Maduro 6 X 2. 5 Lb	2.50 Lb	1,000	6,804	14,791	7,987	7,544	7,544	6,940	6,804	4,000	3,600	3,480	1,700	1,200	2	2	2	4	6	16.01
5	MS5	Maduro 10 X 4 Lb	4.00 Lb	1,100	19,958	43,388	23,429	22,128	22,128	20,357	19,958	4,000	3,600	3,480	1,700	1,400	6	6	6	12	14	44.59
6	MS6	Maduro 6 X 4 Lb	4.00 Lb	1,200	13,064	28,399	15,336	14,484	14,484	13,325	13,064	4,000	3,600	3,480	1,700	1,400	4	4	4	8	9	29.19
7	MS7	Maduro 7 X 4 Lb	4.00 Lb	200	2,540	5,522	2,982	2,816	2,816	2,591	2,540	4,000	3,600	3,480	1,700	1,400	1	1	1	2	2	5.68
8	MS8	Maduro 8 X 4 Lb	4.00 Lb	200	2,903	6,311	3,408	3,219	3,219	2,961	2,903	4,000	3,600	3,480	1,700	1,400	1	1	1	2	2	6.49
9	MS9	Maduro 4 X 5 Lb	5.00 Lb	500	4,536	9,861	5,325	5,029	5,029	4,627	4,536	4,000	3,600	3,480	1,700	1,500	1	1	1	3	3	9.92
10	MS10	Maduro 5 X 5 Lb	5.00 Lb	600	6,804	14,791	7,987	7,544	7,544	6,940	6,804	4,000	3,600	3,480	1,700	1,500	2	2	2	4	5	14.88
11	MS11	Maduro 6 X 5 Lb	5.00 Lb	600	8,165	17,749	9,585	9,052	9,052	8,328	8,165	4,000	3,600	3,480	1,700	1,500	2	3	3	5	5	17.85
12	MS12	Maduro 4 X 6 Lb	6.00 Lb	600	6,532	14,200	7,668	7,242	7,242	6,662	6,532	4,000	3,600	3,480	1,700	1,600	2	2	2	4	4	14.01
13	MS13	Maduro 6 X 6 Lb	6.00 Lb	1,100	17,962	39,049	21,086	19,915	19,915	18,322	17,962	4,000	3,600	3,480	1,700	1,600	5	6	6	11	11	38.53
Total					117,845						117,845											

*Diseño de un modelo matemático aplicado a la
minimización de tiempos no productivos y
optimización de la productividad en la industria
de alimentos.*

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**

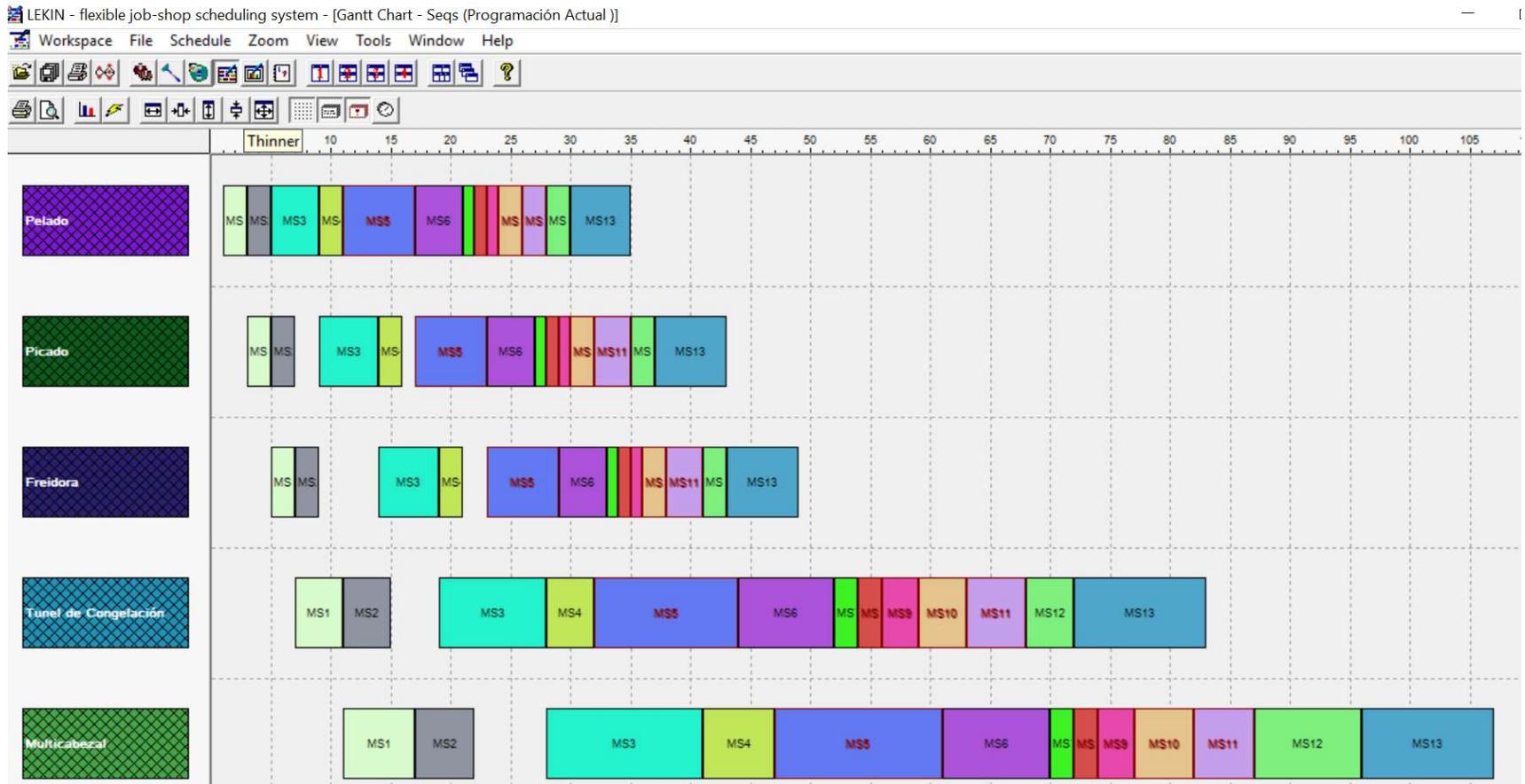
ANEXO B

Matriz		Multicabezal													
Set Up / hr		LEKIN	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Ítem	LEKIN	Descripción	MS1	MS2	MS3	MS4	MS5	MS6	MS7	MS8	MS9	MS10	MS11	MS12	MS13
1	A	MS1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	B	MS2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	C	MS3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	D	MS4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	E	MS5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
6	F	MS6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
7	G	MS7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
8	H	MS8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
9	I	MS9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
10	J	MS10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
11	K	MS11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
12	L	MS12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13	M	MS13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

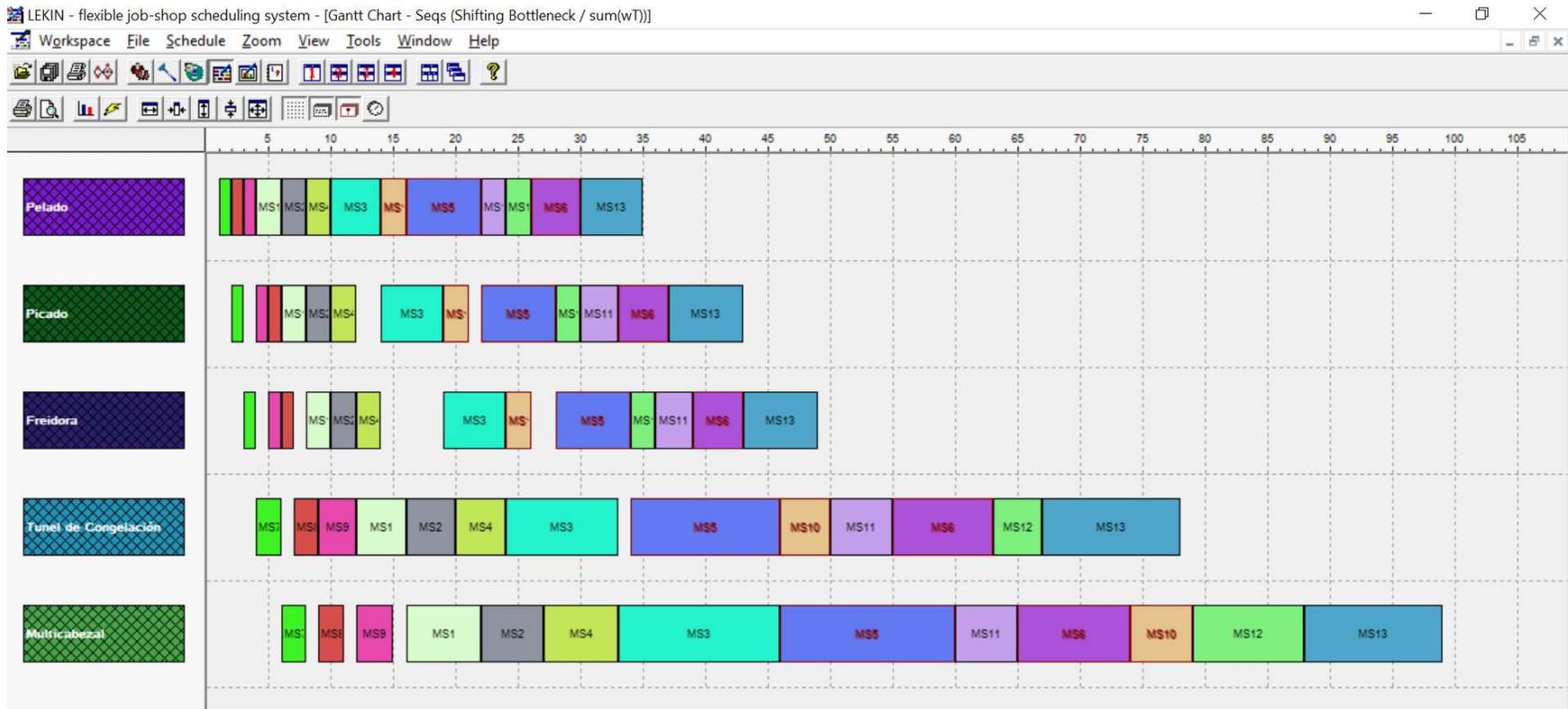
*Diseño de un modelo matemático aplicado a la
minimización de tiempos no productivos y
optimización de la productividad en la industria
de alimentos.*

**MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN**

ANEXO C



ANEXO D



Diseño de un modelo matemático aplicado a la minimización de tiempos no productivos y optimización de la productividad en la industria de alimentos.

MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE, MENCIÓN
MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

ANEXO E

