



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
Departamento de Matemáticas**

“Diseño de una heurística para la calendarización del proceso de packing and handling de productos terminados para una empresa con pedidos mensuales”

**INFORME DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN
(DENTRO DE UNA MATERIA DE LA MALLA)**

Previo a la obtención del Título de:
INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

Presentado por:
LAIZ ESTEFANÍA MEDINA GONZÁLEZ
SILVIA ANDREA PAZMIÑO CIFUENTES

Guayaquil-Ecuador
2013

Dedicatoria

A mi mami Silvia

Cifuentes Jácome, por ser un ejemplo de entrega, superación y fortaleza, quien me enseñó a luchar por llegar a la meta, a cumplir retos y no darme por vencida, y sobre todo porque de ella aprendí a tener fe, a confiar y seguir a Dios.



Silvia Andrea Pazmiño Cifuentes

A mi mami Clara González

Álvarez por su constante apoyo y por ser un ejemplo de superación, a mi padre, a mis hermanos, a mi sobrina hermosa para que sepa que todo en esta vida se puede con fe en Jehová y esfuerzo, a todos mis amigos que creyeron en mí.



Laiz Estefanía Medina González

Agradecimiento

Gracias a Dios porque ha sido el motor que me ha impulsado para llegar hasta aquí, por haberme dado la compañera idónea para realizar este proyecto, y habernos abierto todas las puertas necesarias para culminarlo. Agradezco a mi familia quien fue mi principal motivación para llegar hasta aquí, Gastón Mendoza por su apoyo incondicional y al Magíster Erwin por su dedicación y paciencia en guiarnos.

Silvia Andrea Pazmiño Cifuentes

Agradezco a Jehová Dios por ser mi guía y fortaleza a lo largo de esta carrera y porque gracias a él hemos culminado este proyecto. Agradezco a todas las personas quienes han sido parte de este proyecto, el Magíster Erwin Delgado por su dirección, a Silvia Pazmiño porque mejor compañera y amiga no pude haber escogido para terminar este proyecto tan importante en nuestras vidas y a mi familia porque me dieron el apoyo necesario y siempre tuvieron palabras de aliento para mí.

Laiz Estefanía Medina González

Declaración Expresa

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación de Pregrado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la FCNM (Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas) de la ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral).

Laiz Medina González

Silvia Pazmiño Cifuentes

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Magíster Erwin Delgado Bravo
DIRECTOR DE PROYECTO
DE GRADUACIÓN

Matemático John Ramírez Figueroa
DELEGADO DE LA FCNM

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Breve descripción de la empresa	12
1.2. Justificación del Problema	14
1.3. Objetivo General	15
1.4. Objetivos Específicos	15
1.5. Descripción del problema	16
1.5.1. Análisis de la problemática	17
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Revisión de literatura	19
2.2. Método de Asignación	21
2.3. Scheduling	28
2.4. Job Shop Scheduling	28
2.5. Heurística	29
2.5.1. Complejidad de Problemas Algorítmicos	29
2.5.2. Clase de Problema P	29
2.5.3. Clase de Problema NP	30
2.6. Búsqueda Local	30
2.7. Búsqueda Tabú	31
3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA Y DISEÑO DE LA HEURÍSTICA	34
3.1. Formulación matemática	35
3.1.1. Índices del Modelo Matemático	35
3.1.2. Variables del Modelo Matemático	36
3.1.3. Datos e información del problema	36
3.1.4. Restricciones	37
3.2. Diseño de la heurística	41
3.2.1. Parámetros	42
3.2.2. Funciones para generar la solución inicial de la heurística	45
3.2.3. Funciones para generar la búsqueda tabú	47
3.2.4. Seudocódigo de la Heurística Diseñada	53

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.1. Solución del modelo matemático	55
4.2. Solución de la heurística	56
5. CONCLUSIONES	60
6. RECOMENDACIONES	63

Índice de figuras

1.1. Instalaciones	12
1.2. Presentación de Producto Terminado	13
2.1. Clases de Complejidad de Problemas	29
4.1. Resultados con Tenure Time=2	57
4.2. Resultados con Tenure Time=7	57

Índice de tablas

2.1. Problema de Asignación	21
2.2. Algoritmo de la Búsqueda Tabú	32
3.1. Índices del Modelo Matemático	36
3.2. Variables del Modelo Matemático	36
3.3. Tablas y Parámetros del Modelo Matemático	37
3.4. Modelo Matemático	39
3.5. Demanda mensual	40
3.6. Ejemplo de detalles de un producto	41
3.7. Código de los Tipos de Producto	43
3.8. Código de los nombres de los productos	44
3.9. Código de las Máquinas	45
4.1. Solución del modelo matemático	55
4.2. Solución de cantidad a fraccionar	56
4.3. Solución de la heurística	59

Resumen

Actualmente dentro de la industria ecuatoriana no se tiene mucho conocimiento acerca de las distintas herramientas de análisis logístico y específicamente para los procesos de manufactura, de los cuales la mayoría de éstos aún se planifican de modo intuitivo y según la experiencia empírica de la o las personas a cargo de este eslabón de la cadena de suministros, el cual representa un gran peso en las empresas que se dedican a la fabricación de sus productos, tal como lo es la empresa para la cual hemos dirigido este proyecto.

La empresa en la que está basado este proyecto, tiene como una de sus actividades principales el fraccionamiento de productos químicos, los cuales se comercializan en distintas presentaciones. Para este proyecto lo que se ha realizado es una correcta planificación del proceso de “¹ Packing and ²Handling” para la empresa, la cual necesita un calendario de producción con el que puedan tener esquematizada y ordenada la utilización de sus recursos.

La propuesta que se hizo para hallar una solución factible, que se acoja al requerimiento de la empresa, es el diseño de una heurística resuelta con la búsqueda tabú, que fue creada respetando las restricciones de demanda, la prioridad de producción, y disponibilidad de las máquinas, así como también toma en cuenta que no todos los productos se pueden hacer en todas las máquinas. Adicionalmente se formuló un modelo matemático, que nos sirvió para comprobar y ratificar la efectividad de la heurística

¹Packing= Embalaje

²Handling= Manipulación

diseñada.

El modelo matemático cumple con las restricciones del problema y al igual que la heurística, de donde se obtuvo la asignación de productos a fraccionar y en que máquinas realizar dicho proceso, para así obtener como resultado nuestra calendarización que satisface las demandas de los productos en el mes.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Breve descripción de la empresa

En la actualidad la empresa ha evolucionado con el paso del tiempo llegando a ser líder en el mercado de productos químicos, todo esto se debe al compromiso que ha establecido la empresa basándose en el equipo humano que conforma esta institución. La empresa se encarga del fraccionamiento de sustancias químicas en sus diferentes presentaciones que dependiendo del tipo de división que tengan serán clasificadas en tres categorías: Agro, Farma Consumo y Salud Animal.



Figura 1.1: Instalaciones

Este proyecto se ha enfocado en la división Agro la cual tiene los siguientes tipos de productos: herbicidas, fungicidas, insecticidas, acuícolas, con lo cual nos encargaremos

del control de stock para el fraccionamiento estableciendo la calendarización para la planificación del “Packing and Handling” de los productos para su presentación final.



Figura 1.2: Presentación de Producto Terminado

Y uno de los retos a los que se enfrentan día a día las personas encargadas de los sistemas de producción en la empresa es responder a las exigencias de la demanda de manera oportuna e incurriendo en la menor cantidad de costos posible. Y es aquí donde se hace importante que los encargados comprendan que la planificación de la producción mediante el empleo de herramientas informáticas sencillas juega un papel importante y útil a la hora de la Planeación de Requerimientos de Materiales (MRP)[1] al permitir definir cuánto, cuándo y qué, se debe proveer/producir para cumplir con los requerimientos de la demanda.

1.2. Justificación del Problema

Dentro de un proceso de fraccionamiento de los productos, donde cada una de las etapas consume un tiempo en particular, y donde el proceso de manufactura se ve afectado por el tiempo de preparación de las máquinas, requiere gran atención la secuencia de producción para lograr disminuir el tiempo total de procesamiento en toda la línea. Las ganancias obtenidas se medirán en base al tiempo de terminación de una demanda mensual, inventarios, tamaños de lotes, cambios de procesos y mejoras en el acarreo de materiales. El orden en que los productos van a ser procesados, determinará entonces el tiempo de preparación de las diferentes máquinas involucradas en el proceso.

En una organización que cuenta con un sistema computacional especializado en la determinación de la secuencia y asignación de fraccionamiento de la producción, la meta principal de la organización en cuanto a este aspecto se refiere es tener una respuesta rápida, y además evitar incurrir en atrasos innecesarios debido a una mala programación. Cada fracción de tiempo en la organización se ve representada en dinero que se deja de recibir si la secuencia no es la más adecuada, o podría convertirse también en una pequeña porción de mercado que la competencia puede aprovechar para empezar a atacar. Es por esto que se deduce que la secuenciación está estrechamente relacionada con la satisfacción del cliente, así que una cosa puede conducir a la otra. La secuencia y la asignación de producción es un área importante dentro del estudio de toda la línea de producción. Por lo tanto, esto puede incurrir en ganancia o pérdida para la organización, según sea la determinación de la misma de una manera efectiva o no. Por último, es

necesario resaltar que este proyecto hará un aporte significativo a la organización en la cual se estará implementando el modelo matemático y el diseño de una heurística de los cuales se extraerá toda la información necesaria la cual permitirá hacer un contraste para poder seleccionar el mejor método según su alcance y resultados obtenidos, en el caso del modelo matemático ayudará a determinar la secuencia óptima de producción de una manera sencilla, rápida y confiable; mientras que con la heurística nos dará una serie de respuestas buenas validadas en la cual puede estar incluida el óptimo.

1.3. Objetivo General

Dar a la empresa una correcta planificación del particionamiento de sus productos para sus diferentes presentaciones, basándonos en su demanda mensual.

1.4. Objetivos Específicos

- Formular un modelo matemático para el fraccionamiento de los productos.
- Diseñar una heurística para el fraccionamiento de los productos.
- Realizar un contraste entre la heurística y el modelo matemático.
- Seleccionar el mejor método según el alcance y resultado que muestre, en base a la información.

1.5. Descripción del problema

Actualmente la empresa no cuenta con un plan de producción establecido de manera sistemática, simplemente se encuentran trabajando de una manera empírica basándose en el sentido común y la experiencia que han ido adquiriendo con los años. Ellos se manejan bajo los pedidos mensuales que realizan sus clientes, elaborando únicamente los productos que tienen un bajo nivel de inventario tratando de compensar su nivel de stock, basándose explícitamente en su política de inventario.

Cada vez más, las empresas necesitan ser capaces de adaptarse a las exigencias del mercado siendo eficaces y eficientes, y eso conllevará a tener que producir un elevado número de productos de gran valor en el menor tiempo posible. Uno de los factores para alcanzar este objetivo es aumentar la flexibilidad de la planta, y la utilización de procedimientos para el proceso del fraccionamiento de productos, que resultan ser una alternativa a considerar para afrontar mejoras en este sentido, dándoles a sus clientes la total confianza de que sus productos son de calidad.

La programación adecuada de trabajos en procesos de manufactura constituye un importante problema que se plantea dentro de la producción en muchas empresas.

El orden en que éstos son procesados, no resulta indiferente, sino que determinará algún parámetro de interés cuyos valores convendrá optimizar en la medida de lo posible. Así podrá verse afectado el coste total de ejecución de los trabajos, el tiempo necesario para concluirlos o el stock de productos en curso que será generado. Esto conduce de forma directa al problema de determinar cuál será el orden más adecuado para

llevar a cabo los trabajos con vista a optimizar algunos de los anteriores parámetros u otros similares.

1.5.1. Análisis de la problemática

El MRP permite con base en los datos del Programa Maestro de Producción (PMP) o (MPS) por su sigla en inglés “Material Program Schedule”, definir cuánto, cuándo y qué, se debe producir para cumplir con los requerimientos de la demanda y en este proyecto eso es lo que se tratará de determinar la planificación del fraccionamiento de los materiales para la empresa. Esto permitirá una aportación al crecimiento de la utilización de la planeación de requerimientos de materiales, el hecho de que la empresa está buscando reducir los niveles de inventarios, incrementar la capacidad de producción e incrementar las utilidades. Pero, es de todos conocidos que los sistemas MRP (MRP , ERP, ERM) son costosos haciendo que empresas como las PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas) no puedan acceder a estas herramientas y no sea viable su adquisición pero sin embargo es una propuesta para la empresa.

En este tipo de procesos, cada etapa está compuesta por un conjunto de máquinas. Cada trabajo debe ser realizado siguiendo la secuencia de etapas que configuran la línea de operación. En cada etapa solo una máquina puede ejecutar cada trabajo. Se supone que los trabajos deben ser realizados sin interrupción y que la matriz de tiempos de ejecución de cada trabajo sobre cada máquina en cada estación es conocida. Las máquinas no fallan y los trabajos están disponibles desde el tiempo inicial. La programación y asignación de tareas en las máquinas debe realizarse minimizando algún criterio que en

el caso de la empresa es el nivel de stock o inventario del producto, el tiempo total de operación para los trabajos programados y la compatibilidad de productos para poder realizar varios en las máquinas. Una variación de este problema consiste en considerar que un trabajo puede ser procesado utilizando más o menos tiempo dependiendo de la máquina a la que sea asignado o que no existe la compatibilidad entre los productos para poder realizar su producción.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Revisión de literatura

El problema de la calendarización de recursos o tareas y asignación de los mismos a un número m de etapas, máquinas o procesos, data en uno de los objetivos que en nuestro caso es la minimización del tiempo T , que es el tiempo total de cumplir todas las tareas, evitando que exista una intersección de las tareas, es decir que si se está realizando una tarea i no se puede estar realizando una tarea j en la misma máquina m . Otra función objetivo posible podría ser la reducción del número de tareas realizadas hasta una fecha límite. Los recursos podrían ser máquinas en un taller, pistas de aterrizaje de aviones en un aeropuerto, personal disponible en una construcción, unidades de procesamiento en una computadora, etc.

Podría presentarse que cada tarea tenga un cierto nivel de prioridad en cuanto a su realización, que sea ejecutada lo más pronto posible dependiendo de ciertos factores, como en el caso de nuestro problema, la priorización de cada tarea dependerá de la cantidad de productos que existan en inventario y la cantidad demandada de los mismos.

Esto genera una relevancia en la utilización de herramientas de análisis logístico tales como modelos matemáticos, programación de heurísticas, entre otros. La aplicación del problema del Scheduling para la toma de decisiones en cuanto a procesos de producción y/o manufactura es una herramienta a la que hoy en día muchas empresas recurren.

M. Pinedo [2] menciona que el rol del Scheduling está cada vez más vinculado con problemas cotidianos que tienen las empresas en cuanto a la elaboración de un correcto plan de producción. Cuando hablamos de procesos de manufactura, que tienen tareas con una prioridad más alta que la otra, conviene desarrollar un detallado horario de tareas, que ayude a controlar las mismas de una manera eficiente. Así evitaremos tiempos de retardo en caso de que se presenten ciertos inconvenientes imprevistos tales como, que una tarea con prioridad alta sea destinada a una máquina que está ocupada o dañada, lo cual implicaría que en ese momento el operario o supervisor busque y escoja otra máquina.

La complejidad de este problema es considerable, ya que existe un modelo exacto de programación entera-mixta para su resolución, pero dado que su tiempo de resolución crece exponencialmente, éste se vuelve en un problema *NP-completo* así como mencionan B. Pérez et al. [3]. Incluso T. González et al. [4] comprueban que para un número m de máquinas o procesos que sea igual a dos $m=2$ el tiempo de resolución del problema de calendarización de tareas es polinomial, y cuando excede esta cantidad de máquinas, es decir, $m>2$ el problema se vuelve *NP-completo*. Debido a esto, desde la década de los 60' se han venido proponiendo heurísticas que nos proporcionen buenas soluciones a este problema en un tiempo corto.

Lo novedoso de este proyecto es que representa un referente en la creación de una heurística asociada a los temas planteados en la problemática de la empresa, lo cual no es algo común ya que al realizar búsquedas sobre la heurística que vamos a aplicar que aún no está definida, pero sin embargo nuestra investigación se basará en un método de mejora conocido, y ya establecido el cual es, la *Búsqueda Tabú*, apoyándonos en un software que podría instalarse en equipos del medio y bajo nivel computacional y que muestra una multiplicidad no tan alta en su uso el cual no es muy accesible, pero sin embargo posee una capacidad de resolución de problemas complejos.

Los posibles métodos de mejora para la solución que nos brinda la heurística que se va a desarrollar, dará un enfoque más claro hacia cual podría ser la mejor solución para la calendarización del proceso de fraccionamiento.

2.2. Método de Asignación

El método general de asignación implica m agentes y n tareas como lo mencionan David Ray, Dennis Sweeney y Arthur Williams al [9]. Donde si se determina escoger el $x_{i,j}$ según si se asigna una persona para una tarea determinada o no; y el $c_{i,j}$ incurre en el costo de realizar dicha tarea.

$$\begin{aligned}
 z &= \sum_{i \in m} \sum_{j \in n} c_{i,j} * x_{i,j} \\
 \sum_{j \in n} x_{i,j} &\leq 1 && \forall i \in m \\
 \sum_{i \in m} x_{i,j} &= 1 && \forall j \in n
 \end{aligned}$$

Tabla 2.1: Problema de Asignación

El método de asignación involucra asignar tareas o trabajos a los recursos. Esto incluye el establecer tareas a máquinas, personas, etc. cuyo objetivo principal es el minimizar los tiempos de ejecución de las tareas realizadas y de los costos totales de dicha ejecución [10].

La asignación de tareas no solo se centra en una parte de la compañía, sino también satisface metas que están altamente ligadas a los objetivos organizacionales como: nivel de servicio, utilización de recursos, costos de preparación de máquinas, costos de inventario y tiempo de procesamiento. Todos estos elementos deben de encontrarse estrechamente unidos, debido a que debe existir un complemento para tratar de resolver de manera óptima cada uno de las interferencias o imprevistos que se presenten dentro de una línea de producción.

Los problemas antes mencionados pueden estar claramente enmarcados en alguna de las siguientes categorías:

1. Debido a la capacidad: Como daños en las máquinas, ausencia de los operadores o falta de alguna herramienta.
2. Relacionado a la cantidad de producción: Muchas órdenes de pedido por cumplir.
3. Relacionado a la medición de los datos: Diferencia entre el tiempo de procesamiento pre-calculado y el actual.

El principal tropiezo que se manifiesta en la aplicación de un sistema de asignación es debido a que algunas técnicas no ofrecen la posibilidad de ajustar la secuencia de producción manualmente en caso de que ocurra alguna falla, por lo que en ocasiones,

pequeños cambios en el sistema generan cambios completos en el programa establecido, todo esto sin resaltar que las técnicas que proveen mejores resultados son las técnicas matemáticas. La técnica de asignación se conoce como el procedimiento para programar la producción y se obtiene mediante el desarrollo de modelos de programación matemática. Algunos algoritmos son óptimos y otros son heurísticos. Los algoritmos óptimos consiguen la mejor solución y mientras esto sea posible se recomienda utilizarlos. Cuando no se puede conseguir una solución óptima porque el tiempo computacional no lo permite, entonces se desarrollan métodos heurísticos. Los métodos heurísticos proveen una solución práctica pero que no garantizan que sea la solución óptima. Un algoritmo muy conocido en la literatura, que se mencionó como una de las técnicas relevantes para la aplicación de asignación enfocado a la producción y específicamente a la minimización del tiempo total de producción considerando la inclusión de un conjunto de máquinas es ¹Shifting bottleneck heuristic[11]. Este algoritmo modela una competencia de los productos por ser los primeros en procesarse en las máquinas disponibles en la línea, actuando como un cuello de botella.

El proceso de asignación no solo involucra tiempo de producción sino que también afecta los costos en los que se incurre dentro de la producción y hasta puede llevar a la empresa a incurrir en errores legales. Olson y Schniederjans [12] establecen que un error en la determinación de la secuencia de producción en este caso puede llevar a una compañía a tomar dos claras determinaciones:

¹Shifting bottleneck heuristic: Heurística combinada cuello de botella

1. Aplicar un concentrado de un alto costo para ajustar el producto a las especificaciones del cliente resultando este proceso sumamente costoso o en su defecto.
2. Tomar la decisión de desechar el lote y empezar otro. Esta opción resulta altamente costosa también, pues ahora la compañía cuenta con desperdicios contaminados que resulta un proceso costoso disponer de estos y que además deben estar dentro de las regulaciones de la ²EPA, por sus siglas en inglés. Además deben tener en cuenta las reglamentaciones que prohíben a las empresas disponer cierto volumen máximo de desperdicios tóxicos anualmente, siendo esto un nuevo costo que se adiciona a la producción de un nuevo batch de producto. Un caso similar puede ser considerado en la importancia que representa determinar de manera correcta la secuencia en la empresa de medicamentos objeto de estudio.

Un sistema de secuenciación mal planificado puede afectar el tiempo de ocio de las máquinas, afectando enormemente el tiempo de entrega de los productos. Todo lo anterior se debe a que el tiempo de inactividad de la maquinaria se suma al tiempo de entrega, atrasando el proceso. El análisis de los aspectos que determinan la aplicación de la teoría de secuenciación en la línea de producción, ayudándolos a concluir sobre los conceptos a tener en cuenta en la determinación de la secuenciación de productos. Las compañías cuentan con expertos que se dedican a la planificación de la producción. Los planificadores tienen en sus manos la responsabilidad de alcanzar las metas de la compañía manteniendo un alto nivel de satisfacción entre los clientes y bajos costos de producción. Estos tienen en sus manos el estudio de la producción para la determinación

²Environmental Protection Agency(Agencia de Protección Ambiental)

del horizonte de planificación que se ve afectado por muchos factores como por ejemplo el sistema administrativo, la cultura de los gerentes de la compañía, los costos y el logro de las metas, entre otros.

Una mala determinación del horizonte de planificación puede afectar de manera significativa toda la producción. Largos períodos de planificación incrementan el inventario de trabajo en proceso y el tiempo de preparación pero de igual manera permite mayor libertad en la producción por unidad y mayor flexibilidad. Una herramienta como la propuesta en nuestro trabajo se convierte entonces de gran utilidad, debido a que el planificador no tendría que determinar la secuencia adecuada de producción basado solo en su conocimiento, experiencia o intuición sino que cuenta con una ayuda computacional que le ayudará a determinar de manera precisa, fácil de interpretar y donde se involucra el panorama general de la línea de producción de manera sencilla.

Las estrategias de producción manejadas por las compañías influyen de manera directa en la secuenciación de los productos, presentando cada una de ellas diferentes puntos de vista en cuanto a planificación se refiere: En un sistema de producción MTO “*MAKE TO ORDER*”, conocido así por sus siglas en inglés, las ordenes de los clientes se procesan primero y posteriormente se lanza la orden de producción, se firma una fecha de entrega y el objetivo principal es cumplir con esta fecha. La reprogramación de una orden de producción o de una entrega afecta significativamente al cliente externo. Teniendo en cuenta todo lo anterior un sistema de producción basado en la estrategia MTS (“*MAKE TO STOCK*”) donde los productos se manufacturan para mantener en la bodega de producto terminado, permite una mayor flexibilidad en la reprogramación

que un sistema donde se rige la producción por las órdenes de los clientes (MTO). El objetivo de la planificación de la producción es establecer la unión de la experiencia de la alta gerencia, con la implementación de una manera sencilla en un computador personal y que fuera fácil de manejar por cualquier persona con habilidades en las operaciones de producción de un sistema para determinar la secuencia de producción. Se implemento la programación matemática en tres fases:

- En la primera fase se utilizó la programación lineal entera P-mediana.
- Para determinar la secuencia entre el grupo de familias se uso el algoritmo del agente viajero.
- En la fase final, para determinar la secuencia entre familias, se hizo necesario la modelación a través de procesos heurísticos.

Logrando de esta manera determinar la secuencia de producción óptima con el mínimo de cambios en los componentes. Alarcón y colaboradores (2001), plantearon un modelo de programación /secuenciación de producción para un sistema de taller de flujo con diferentes requerimientos. Para la investigación tuvieron en cuenta tres aspectos: Minimización del tiempo total de producción, minimizar el tiempo total en cambio de equipo y minimizar el área de almacenes para así replantear la secuencia entre cada una de las etapas. Otra de las investigaciones analizadas y que es de gran aporte para nuestra investigación es la realizada por Oliff y Burch (1985)[12], donde mediante el análisis a un sistema de producción con múltiples líneas determinan la aplicación de las técnicas de plan agregado, el tamaño de lote y la secuencia de producción.

Las restricciones que se identificaron fueron de cuatro tipos:

- Ecuación del balance de producción.
- Ecuaciones de capacidad de inventario.
- Restricciones de no interferencia
- Un grupo de ecuaciones que regulen y penalicen los cambios abruptos de un producto a otro.

El problema de determinación de secuenciación más estudiado es aquel donde se trata de determinar la secuencia de producción óptima a un grupo de n número de trabajos con m máquinas, modelados como sistema de programación lineal mixta entera. El problema de secuenciación más estudiado (a nivel de programación), es aquel que consiste de un conjunto de n productos a ser procesados dentro de un conjunto de m máquinas que realizan un número de operaciones. Este tipo de trabajo ha acaparado la atención de muchos investigadores debido a la complejidad computacional involucrada. De tal manera que se hace necesario el planteamiento de modelos heurísticos que permitan encontrar una solución cercana a la óptima en un tiempo razonable. El modelo conocido en inglés como “Job Shop Scheduling Problem” (JSSP), es un caso especial de ordenamiento de producción cuyo objetivo es minimizar el tiempo total de producción, caracterizado típicamente por ambientes donde el diseño del producto cumple las especificaciones del cliente o se manufactura según los requerimientos, largas rutinas de producción son complejas e incluye las siguientes restricciones:

1. Una máquina no puede realizar mas de una operación a la vez.
2. El orden de ejecución de la operación es respetado en cada trabajo.

Dentro del proceso de solución se utilizaron dos estrategias del sistema de secuenciación tal como la estrategia de “*total*” y la segunda estrategia “*parcial*”; mientras la primera realiza el clásico estudio en todas las operaciones involucradas en el problema de secuenciación, la segunda solo realiza un estudio parcial de las operaciones, lo que permite obtener una re-secuenciación solo en una parte de las operaciones asociadas al proceso. Al realizar ambas operaciones se determino que realizar un estudio parcial resulta mas factible que realizar un estudio total.

2.3. Scheduling

El Scheduling se refiere a la ubicación de recursos a distintas actividades con el objetivo de optimizar una o más medidas de desempeño [5].

El Scheduling (Calendarización) también se puede definir como aquello que indica, dónde y cuándo las personas y los recursos deben estar en un instante dado [6].

2.4. Job Shop Scheduling

El problema del *Job Shop* explica que se tiene un conjunto de trabajos y un conjunto de máquinas. Cada trabajo consiste en una secuencia de operaciones, las cuales se realizan en una de las máquinas durante un tiempo definido y lo que se intenta minimizar es el *Makespan* o también llamado tiempo de procesamiento [7].

2.5. Heurística

El término heurística se origina de la palabra griega *eureka* que se vincula con el significado de *hallar, encontrar, inventar*. El concepto de heurística se refiere a una técnica o procedimiento inteligente de resolución de problemas de optimización que pueden o no ser resueltos por un método exacto, y sirve para la obtención buenas soluciones aunque no siempre sean las óptimas .

2.5.1. Complejidad de Problemas Algorítmicos

Los problemas se caracterizan por la atención a la dificultad que implica la resolución por un ordenador. Debido ha esto se han definido varias clases de problemas, entre los que se destacan $P, NP, NP-completo$ y $NP-duro$ [8].

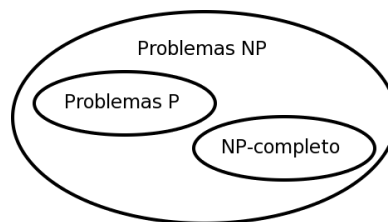


Figura 2.1: Clases de Complejidad de Problemas

2.5.2. Clase de Problema P

Se denomina P al problema que puede resolverse en un tiempo polinómico cuando el tiempo de ejecución de un algoritmo que lo resuelve se puede relacionar con una fórmula polinómica, es decir, los problemas para los que existe un algoritmo polinómico; considerando que los problemas P se pueden resolver en un tiempo de ejecución razonable para la información pertinente.

2.5.3. Clase de Problema NP

En teoría de la complejidad computacional, NP es el acrónimo en inglés de non-deterministic polynomial time (“tiempo polinomial no determinista”). Es el conjunto de problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico por un procedimiento determinista.

La importancia de esta clase de problemas de decisión es que contiene muchos problemas de búsqueda y de optimización para los que se desea saber si existe una cierta solución o si existe una mejor solución que las conocidas.

1. **NP-Completo:** Los problemas *NP-completos* pueden ser descritos como los problemas en NP que tienen menos posibilidades de estar en P . Actualmente los investigadores piensan que las clases cumplen con el diagrama mostrado por lo que P y $NP-completo$ tendrían intersección vacía.
2. **NP-Duro:** Los problemas *NP-duros* pueden ser incluso más difíciles de resolver que los *NP-completos* debido a que no son un subconjunto de los NP , es decir, que para los problemas *NP-duros* no existe un algoritmo polinómico que nos permita verificar la solución.

2.6. Búsqueda Local

Uno de los primeros procedimientos que se utilizó a la hora de resolver los problemas de optimización y combinatoria fue la llamada “Búsqueda Local” [13], la cual se caracteriza por ir realizando una serie de movimientos en el espacio de soluciones, mejorando

en cada una de ellos el valor de la función objetivo.

Inicialización: Seleccionar la estructura de entorno N a utilizar en la búsqueda y encontrar una solución inicial x

Repetir: los siguientes pasos hasta verificarse el criterio de parada (por ejemplo, encontrar un óptimo local):

1. Encontrar la mejor solución vecina x' de x ($x' \in N(x)$).
2. Si x' no es mejor que x , parar. En otro caso hacer $x = x'$ y volver al paso (2).

Sin embargo, el principal problema que presenta esta heurística es que cada vez que alcanza un óptimo local, ya no puede salir de él y continuar la búsqueda. En los últimos años, se han propuesto diversas metaheurísticas con el objetivo de mejorar el esquema de la *búsqueda local*, evitando que dicho procedimiento se quede atrapado en un óptimo local, siendo las más conocidas *Recocido Simulado* y *Búsqueda Tabú*

2.7. Búsqueda Tabú

La búsqueda Tabú surge, en un intento de dotar de *inteligencia* a los algoritmos de búsqueda local. Según Fred Glover, su primer definidor, “La Búsqueda Tabú guía un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones más allá del óptimo local”.

La búsqueda tabú toma de la Inteligencia Artificial el concepto de memoria y lo implementa mediante estructuras simples con el objetivo de dirigir la búsqueda teniendo en cuenta la historia de ésta, es decir, el procedimiento trata de extraer información de lo sucedido y actuar en consecuencia. En este sentido puede decirse que hay un cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente. La búsqueda tabú permite moverse a una solución aunque no sea tan buena como la actual, de modo que se pueda escapar de

óptimos locales y continuar estratégicamente la búsqueda de soluciones aún mejores [4].

Algoritmo de la búsqueda tabú:

Entrada: Una instancia x de P

Paso 1: Sea $M(x)$ el conjunto de todas las posibles soluciones. Elegimos una solución inicial $\alpha \in M(x)$.

Conjunto $TABÚ = \alpha$; $Fin = Falso$; $MEJOR = \alpha$

Paso 2: Se toma la mejor solución factible $\beta \in V_x(\alpha) - TABÚ$

Si $cost(\beta) < cost(\alpha)$, entonces $MEJOR = \beta$

Poner al día $TABU$ y fin ;

$\alpha = \beta$

Paso 3: Si $fin = verdadero$, entonces la salida es $MEJOR$; en otro caso ir al **Paso 2**.

Tabla 2.2: Algoritmo de la Búsqueda Tabú

La *lista tabú*[14] es una lista donde se registran aquellas soluciones o atributos de soluciones que no deben ser elegidas.

El tamaño de la lista tabú (*tabu tenure*) es el tiempo o número de iteraciones que un elemento (movimiento o atributo) permanece en la lista tabú. Si todos los elementos tienen el mismo tamaño de la búsqueda tabú, esta estará identificada por la longitud de la lista tabú, si es variable, es decir, todos los elementos de la lista tabú no tienen el mismo tamaño, un elemento que entró a la lista tabú antes que otro puede salir mucho después.

La lista tabú puede contener:

- Soluciones visitadas recientemente
- Movimientos realizados recientemente o
- Atributos o características que tenían las soluciones visitadas.

Capítulo 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA Y DISEÑO DE LA HEURÍSTICA

Luego de haber examinado los requerimientos para este problema en específico que precisa la empresa, se ha procedido con la observación, recopilación y análisis de los datos e información necesarios para la resolución del modelo matemático que se planteará y además para el diseño de la heurística, la cual como se ha mencionado a lo largo de este proyecto, nos servirá para obtener una correcta planificación del proceso de “Packing and Handling” de productos terminados que necesita la empresa.

3.1. Formulación matemática

El modelo matemático que se ha formulado tiene como objetivos los siguientes puntos:

- Definir una programación para el proceso de particionamiento de productos que satisfaga a la demanda mensual y optimice los recursos requeridos para realizar la actividad mencionada.
- Obtener un sistema de secuenciación óptimo de los productos a fraccionar durante un día de trabajo basado en el balance de los procesos y utilización de las máquinas.

Para el diseño del modelo matemático se cuenta con los siguientes datos de entrada:

- Lista de los productos.
- Demanda mensual de los productos.
- Horizonte de planeación de los productos (*Días Laborables de la empresa*).
- Número de máquinas disponibles para el particionamiento de los productos.

3.1.1. Índices del Modelo Matemático

Para la parametrización de datos se utilizarán índices, los mismos que sirven para unir todo el conjunto de datos, y serán de gran utilidad para este proyecto debido al volumen de información que se posee.

Los índices se los ha clasificado y denominado según como se muestra en la tabla

3.1:

ÍNDICE	DEFINICIÓN
j	Variedad de Productos
i	Máquinas
k	Días laborables de la empresa

Tabla 3.1: Índices del Modelo Matemático

3.1.2. Variables del Modelo Matemático

Los resultados del modelo matemático son obtenidos a través de las variables mostradas en la tabla 3.2:

VARIABLES	DEFINICIÓN
z	Función Objetivo
$x(j,i,k)$	Variable de Decisión Binaria

Tabla 3.2: Variables del Modelo Matemático

Donde z es el tiempo total que tomará el fraccionamiento de todos los productos y x es la variable de la que se obtendrá la asignación de productos a las máquinas y el orden en el cual serán fraccionados los productos.

3.1.3. Datos e información del problema

Los datos e información que se utilizaron para la formulación del proyecto se copiaron según las necesidades del problema y del modelo matemático, los cuales también nos servirán para la heurística planteada.

Las tablas y parámetros que forman parte del modelamiento del sistema, se presentan en la tabla 3.3:

TABLA /PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
p(j,i,k)	Combinaciones posibles por producto,máquina y día
A(j,i)	Capacidad de maquinado por producto en máquina
b(j)	Demanda mensual de los productos
T(i,j)	Tiempos de fraccionamiento en minutos de un producto j en la máquina i

Tabla 3.3: Tablas y Parámetros del Modelo Matemático

3.1.4. Restricciones

Las restricciones del modelo matemático fueron elaboradas de tal manera que cumplan con las exigencias y limitaciones de la empresa, y de esta manera hallar la planificación óptima necesaria. Dentro de las restricciones propuestas que efectúan el plan de producción para el particionamiento de los productos que van a satisfacer la demanda mensual de la empresa se tiene lo siguiente:

1. Cumplimiento de la demanda: La cantidad a producir debe ser mayor o igual a la cantidad demandada (se considera también el inventario inicial).

$$\sum_i \sum_k A_{j,i} * x_{j,i,k} \geq b_j \quad \forall j \in N \quad (3.1)$$

2. Producción por Batch: Se establecerá que para cada producto j en el día k se realice en la máquina i el batch completo.

$$\sum_i A_{j,i} * x_{j,i,k} = h_{j,k} \quad \forall j \in N, \forall k \in M \quad (3.2)$$

3. Selección de la máquina por producto por día: Se debe escoger una máquina i de particionamiento por día k para cada tipo de químico j .

$$\sum_j x_{j,i,k} \leq 1 \quad \forall i \in P, \forall k \in M \quad (3.3)$$

4. Selección de la máquina : Que todas las máquinas i se utilicen en la producción

$$\sum_j \sum_k x_{j,i,k} \geq 1 \quad \forall i \in P \quad (3.4)$$

5. Flexibilidad en la producción: Se establecerá que por día k el mínimo número de variedades de tipos de químicos a fraccionar es de 5.

$$\sum_j \sum_i x_{j,i,k} \leq 5 \quad \forall k \in M \quad (3.5)$$

6. Función Objetivo: El objetivo principal del modelo es minimizar los tiempos de fraccionamiento por batch por producto.

$$z = \sum_j \sum_i \sum_k T_{j,i} * x_{j,i,k} \quad (3.6)$$

A continuación se presenta el modelo matemático completo en la tabla 3.4:

$z = \sum_{j \in N} \sum_{i \in P} \sum_{k \in M} T_{j,i} * x_{j,i,k}$	
$\sum_{i \in P} \sum_k A_{j,i} * x_{j,i,k} \geq b_j$	$\forall j \in N$
$\sum_{i \in P} A_{j,i} * x_{j,i,k} = h_{j,k}$	$\forall j \in N, \forall k \in M$
$\sum_{j \in N} x_{j,i,k} \leq 1$	$\forall i \in P, \forall k \in M$
$\sum_{j \in N} \sum_{k \in M} x_{j,i,k} \geq 1$	$\forall i \in P$
$\sum_{j \in N} \sum_{i \in P} x_{j,i,k} \leq 5$	$\forall k \in M$

Tabla 3.4: Modelo Matemático

El único dato de entrada que necesita el sistema es el valor de la demanda, la misma que se presenta como cantidad total a producir, la cual se muestra en la tabla 3.5:

Producto	Cantidad
ALTO100SL	200
DACONIL720FW	2160
INTERCEPTBIOFUNG	160
KASUMIN	640
LYNX24	320
MERTECT500SC	360
SCORE250EC	15400
SULFOLAC58SC	760
TILT250EC	1
TOPAS100	1
PHYTON24	160
PRIORI25	320
SIGANEX	1
AMINAPOT720	160
CERILLO24	80
COMBATRANSL	52
DACOCIDA4D	372
DUALGOLD	692
ECUAMINA720	320
ESTRIBOLS	1290
FUEGO500	1
GESAPAX500FW	285
GAMIT	480
IGRAN500FW	160
MACHETE600	1120
PANTERA	372
PANTHER	480
PASTAR360SL	1
PENDIMETALIN40	112
RANGER480	1780
AVANTI2	160
NUVAN100EC	1600

Tabla 3.5: Demanda mensual

3.2. Diseño de la heurística

Para este caso puntual de *Job Shop Scheduling Problem* lo que se requiere es asignar una secuencia para la realización de productos respetando la prioridad de producción y en que máquinas se pueden hacer. Para la asignación de los productos a las máquinas se debe tener en cuenta de que cada producto pertenece a una categoría o tipo de producto, que dependiendo de su categoría se puede realizar en ciertas máquinas y en otras no. La prioridad depende de las semanas de stock que tiene cada producto, siendo 0 la prioridad más alta. Además de esto cada producto tiene su tipo de presentación.

A continuación un ejemplo de los detalles de un producto:

Tipo de producto	Fungicidas
Nombre de producto	ALTO 100 SL
Tipo de Presentación	100 MI
Semanas de Stock	2
Máquina	Insect10

Tabla 3.6: Ejemplo de detalles de un producto

La prioridad depende de las semanas de stock que tiene cada producto, la cual se basa en el nivel de stock de un producto y la demanda de éste, por lo que para esta heurística que se ha diseñado se utilizará este parámetro en lugar de solo la demanda como se hizo en el modelo matemático. Esto permitirá condicionar que los productos con un menor nivel de stock y que además sean demandados en el pedido mensual de los clientes, sean los que estén siendo fraccionados de manera preferenciada.

La heurística que se ha diseñado tiene como objetivos los siguientes ítems:

- Obtener una calendarización de los productos para satisfacer la demanda mensual de los mismos, minimizando el tiempo total de terminación de estos.
- Dar a la empresa una programación que permita incrementar el número de máquinas y productos, ya que es una empresa en expansión y con oportunidad de crecimiento en sus ventas, por lo tanto tendrá que aumentar su nivel de producción.

3.2.1. Parámetros

Los parámetros que se tomarán en cuenta para la resolución del problema de *Job Shop Scheduling Problem* planteado son:

- tpp: Tipo de producto, Nombre del producto
- tpm: Tipo de producto, Máquina
- s: Semanas de stock de cada producto
- tm1: Tiempo de procesamiento de cada producto en la máquina 1
- tm2: Tiempo de procesamiento de cada producto en la máquina 2
- tm3: Tiempo de procesamiento de cada producto en la máquina 3
- tm4: Tiempo de procesamiento de cada producto en la máquina 4
- tm5: Tiempo de procesamiento de cada producto en la máquina 5
- ttt: Presentación del producto, Nombre del producto

Para efectos prácticos de la heurística se trabajará con códigos asociados a cada uno de los parámetros, que son:

- **Tipos de Productos:** Cada tipo o clasificación de producto posee varios tipos de presentación que se tomarán en cuenta a la hora del fraccionamiento, esto se debe a los requerimientos y necesidades del cliente.

Código	Tipo de producto
1	Herbicidas
2	Fungicidas
3	Pesticidas
4	4 Lt
5	250 MI

Tabla 3.7: Código de los Tipos de Producto

- **Presentación de Productos:** La empresa posee varias presentaciones de productos, las cuales pertenecen a un tipo o clasificación de producto, y que se detallan a continuación con cada uno de los códigos que se les han asociado para la programación de la heurística.

Código	Nombre del producto
1	ALTO100SL
2	DACONIL720FW
3	INTERCEPTBIOFUNG
4	KASUMIN
5	LYNX24
6	MERTECT500SC
7	SCORE250EC
8	SULFOLAC58SC
9	TILT250EC
10	TOPAS100
11	PHYTON24
12	PRIORI25
13	SIGANEX
14	AMINAPOT720
15	CERILLO24
16	COMBATRANSL
17	DACOCIDA4D
18	DUALGOLD
19	ECUAMINA720
20	ESTRIBOLS
21	FUEGO500
22	GESAPAX500FW
23	GAMIT
24	IGRAN500FW
25	MACHETE600
26	PANTERA
27	PANTHER
28	PASTAR360SL
29	PENDIMETALIN40
30	RANGER480
31	AVANTI2
32	NUVAN100EC

Tabla 3.8: Código de los nombres de los productos

- **Máquinas:** Nombre de la máquinas en las que se pueden fraccionar los productos.

CÓDIGO	MÁQUINA
1	Insect10
2	EMSA
3	Manual
4	LPGT6
5	N3

Tabla 3.9: Código de las Máquinas

3.2.2. Funciones para generar la solución inicial de la heurística

- A: Esta función nos ayuda a encontrar las posiciones donde el vector tpp coincide con el vector tpm comparando los tipos de producto, la respuesta de esta función será la entrada para la función b.

```

Inicio
  Leer [tpp,tpm]
  v=  $\phi$ 
  Para i=1 hasta 32
    Para j=1 hasta 7
      Buscar segunda posición tpp igual
      a primera posición tpm
    Fin Para
    Guardar en v
  Fin Para
  Mostrar v
Fin

```

- B: Función que asocia las máquinas con los productos según su tipo de producto, es decir que en su salida da las máquinas en las que se puede trabajar el producto p.

```
Inicio
Leer [solución de a, tpp, tpm]
v2 =  $\phi$ 
Para i=1 hasta 32
  v1 =  $\phi$ 
  Para j=1 hasta 7
    Si solución anterior es igual a 1
      Entonces
        Almacenar en v1 la primera
        posición de tpm
      Fin Si
    Guardar en v1 en v2
  Fin Para
Fin Para
Mostrar v2
Fin
```

- C: Asigna aleatoriamente que producto se va a realizar en que máquina respetando si se puede o no utilizar dicha máquina para ese producto.

```
Inicio
Leer [solución de b, tpm]
s =  $\phi$ 
Para i=1 hasta 32
  r1 = Número entero aleatorio
  Guardar en s la segunda posición
  de la solución de b y tpm en
  la posición generada con r1
Fin Para
Fin
```

- DE: La respuesta obtenida en c , la muestra como un vector de vectores, donde están todos los productos que se realizarán en cada máquina. La respuesta obtenida en esta función es la solución inicial, previamente ordenada dependiendo de las prioridades.

```

Inicio
Leer [solución de c]
va1=  $\phi$ 
  Para i=1 hasta 5
    Para j=1 hasta 32
      Si solución anterior coincide con j
        Entonces
          Almacenar en va1 la solución
            obtenida en c en la posición j
        Fin Si
    Fin Para
  Fin Para
  Mostrar va1
Fin

```

3.2.3. Funciones para generar la búsqueda tabú

- INTERCAMBIO: Intercambia un producto de una máquina por otro producto de otra máquina. Se ingresa la matriz a intercambiar, y las posiciones de producto y máquina que se quieran mover o intercambiar. Se ingresa la solución inicial, $m1$ que es la posición de la primera máquina, $p1$ es el producto de la primera máquina, $m2$ es la segunda máquina y $p2$ es el producto de la segunda máquina.

```

Inicio
Leer [solución inicial,m1,p1,m2,p2]
solución inicial  $\leftarrow$  sol
d1  $\leftarrow$  producto p1 de la máquina m1 de sol
aux  $\leftarrow$  d1
d1  $\leftarrow$  producto p2 de la máquina m2 de sol
d2  $\leftarrow$  aux
Fin

```

- CostoH: Calcula el tiempo total de terminación del fraccionamiento de los productos.

```
Inicio
Leer [solución inicial]
costo=0
Para i=1 hasta 5
  Para j=1 hasta 32
    Si i=1
      Entonces
        costo=tm1 en la posición i,j
      Fin Si
    Si i=2
      Entonces
        costo=tm2 en la posición i,j
      Fin Si
    Si i=3
      Entonces
        costo=tm3 en la posición i,j
      Fin Si
    Si i=4
      Entonces
        costo=tm4 en la posición i,j
      Fin Si
    Si i=5
      Entonces
        costo=tm5 en la posición i,j
      Fin Si
  Fin Para
Fin Para
Mostrar costo
Fin
```


- LEVIC: Recibe una solución inicial y el número de vecindades que se desean generar, y devuelve la solución vecina generada a partir de cambios de posición que se producen con la función intercambio. Esta función recibe como parámetros de entrada la solución inicial que se generó previamente y el número de vecinos que se generará y se denominará n.

```
Inicio
  Leer [solución inicial,n]
  lv=  $\phi$ 
  Para i=1 hasta n
    a1= Número entero aleatorio
    a2= Número entero aleatorio
    Mientras a1=a2
      a2= Número entero aleatorio
    Fin Mientras
    s1= Número entero aleatorio
    s2= Número entero aleatorio
    cst=costo de hacer el intercambio
    [solución inicial,a1,s1,a2,s2]
    cst1=costo de solución inicial
    Guardar en lv las posiciones:
    [a1,s1,a2,s2] y la diferencia
    entre cst y cst1
  Fin Para
Fin
```

- ACTMEMORIA: Almacena las posiciones de las posibles soluciones que deberán ser consideradas tabú, hasta que termine el tamaño de la *Lista Tabú* o *Tabu Tenure* o hasta que se complete el número de iteraciones de la búsqueda tabú.

```
Inicio
Leer (Largo solución inicial, posición máquinaA, posición productoA,
posición de máquinaB, posición de productoB, Tabu Tenure)
m= Largo de solución inicial
M1= Matriz de ceros tamaño m x m
M2= Matriz de ceros tamaño m x m
Para i=1 hasta Tamaño del vector solución inicial
  Para j=1 hasta Tamaño del vector solución inicial
    Si M1 en la posición i,j es mayor o igual que cero
      Entonces
        Se resta una unidad
      Sino
        Se iguala a cero
    Fin Si
    Si M2 en la posición i,j es mayor o igual que cero
      Entonces
        Se resta una unidad
      Sino
        Se iguala a cero
    Fin Si
  Fin Para
Fin Para
M1 en la posición máquinaA posición de productoA
será igual al Tabu Tenure
M2 en la posición máquinaA posición de productoA
será igual al Tabu Tenure
M1 y M2 serán matrices diagonales.
Mostrar M1
Mostrar M2
Fin
```

- VTABU: Devuelve una lista de candidatos que indica con una T cuál de las vecindades es tabú y con una D cual está disponible.

```
Inicio
  Leer [Lista de vecindades]
  Para i=1 hasta Largo de Lista de vecindades
    Recorrer la matriz M1 en las posiciones
que
    indica la lista de candidatos
    Los valores mayores iguales a cero serán
  Tabú
    Los valores menores iguales a cero estarán
  Disponibles
Fin
```

- SELECCIONAR: Selecciona una de las soluciones disponibles de la lista de vecinos.

```
Inicio
  Leer [Lista de vecindades]
  vt=VTABU[Lista de vecindades]
  k=1
  Mientras M1 en la posición k sea Tabú
    k=k+1
  Fin Mientras
  n1=Lista de vecindades en la posición k,1
  n2=Lista de vecindades en la posición k,2
  n3=Lista de vecindades en la posición k,3
  n4=Lista de vecindades en la posición k,4
  vposicion=ns1,ns2,ns3,ns4
  Mostrar vposicion
Fin
```

- TABUSEARCHING: Une las funciones anteriores y estructura el algoritmo de la búsqueda tabú, cuyo objetivo es minimizar el tiempo total de fraccionamiento de los productos.

```
Inicio
  Leer [solución inicial, Tabu Tenure, número
de iteraciones]
  vt=VTABU[Lista de vecindades]
  lista=LEVIC[solución inicial,100]
  vtt=VTABU[lista]
  sel=SELECCIONAR[lista,vtt]
  solactual=solución inicial
  w=1
  Mientras w sea mayor o igual que el número
de iteraciones
    M=ACTMEMORIA[32,Posiciones obtenidas
de sel,Tabu Tenure]
    solactual=INTERCAMBIO[solactual, Po-
siciones obtenidas de sel]
    lista=LEVIC[solución inicial,100]
    vtt=VTABU[lista]
    sel=SELECCIONAR[lista,vtt]
    w=w+1
  Fin Mientras
  Mostrar solactual
Fin
```

3.2.4. Seudocódigo de la Heurística Diseñada

```
Inicio
  Leer [Tiempos de producción de cada produc-
to en cada máquina, semanas de stock, produc-
tos, máquinas, tipos de producto]
  vvacio=  $\phi$ 
  Generar solución inicial con la información
ingresada
  Para i=1 hasta 100
    Realizar la Búsqueda Tabú a la solu-
ción inicial
    Almacenar en vvacio el resultado obte-
nido en cada iteración
  Fin Para
  Mostrar Promedio de vvacio
Fin
```

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo observaremos el resultado de la asignación de los productos a fraccionar y el orden en el que se realizarán las tareas en cada máquina. Se mostrará un contraste de la solución obtenida en base al modelo matemático formulado y la solución de la heurística que se diseñó para este caso puntual de Job Shop Scheduling.

El contraste con el modelo matemático nos ayudará a comprobar que tan efectiva es la heurística diseñada, tomando en cuenta que una buena heurística nos debe dar un valor cercano al óptimo, y que la respuesta óptima es el valor que se obtiene de la resolución un modelo matemático para la resolución de problemas, la heurística nos dará un valor mayor o igual al óptimo.

Luego de haber implementado el modelo matemático en el software GAMS Versión 23.5 y la heurística en el software Wolfram Mathematica Versión 8, se han obtenido los siguientes resultados.

4.1. Solución del modelo matemático

En la tabla 4.1 se muestra la solución óptima del problema planteado, cuyo valor es de 198.40 horas, esto quiere decir que el tiempo total de fraccionamiento de productos para satisfacer la demanda mensual de la empresa, será de 24 días laborables para terminar el pedido.

MÁQUINAS	ORDEN DE PRODUCCIÓN
Insect10:	score250EC ⇒ kasumin ⇒ lynx24 ⇒ ALTO100SL
EMSA:	PHYTON24 ⇒ PRIORI25 ⇒ SULFOLAC58SC ⇒ MERTECT500SC
MANUAL:	MACHETE600 ⇒ AVANTI2 ⇒ RANGER480 ⇒ INGRAN500FW ⇒ PEDIMENTALIN40 ⇒ GESAPAX500FW
LPGT6:	GAMIT ⇒ COMBATRANSL ⇒ AMINAPOT720 ⇒ PANTERA ⇒ ESTRIBOLS ⇒ SCORE250EC ⇒ DUALGOLD ⇒ CERILLO24 ⇒ ECUAMINA720 ⇒ DACOCIDA4D
N3:	NUVAN100EC

Tabla 4.1: Solución del modelo matemático

Como podemos observar, esta será la secuencia en la que los productos serán fraccionados, y que respeta la prioridad de producción la cual depende de las semanas de stock que tiene disponibles la empresa.

Si se decide realizar el fraccionamiento de un producto, se hace el tamaño de batch completo, debido a esto la empresa trabaja con semanas de stock y prefiere realizar con antelación los productos con un bajo nivel de inventario.

Tal como se muestra en la tabla 4.2 son las respectivas cantidades a fraccionar con respecto a cada producto durante los 24 días laborables de la empresa para una determinada demanda mensual.

ALTO100SL	4000.000	DACONIL720FW	4160.000
INTERCEPTBIOFUNG	4160.000	KASUMIN	5000.000
LYNX24	5000.000	MERTECT500SC	3000.000
SCORE250EC	16000.000	SULFOLAC58SC	3200.000
TILT250EC	4000.000	TOPAS100	4000.000
PHYTON24	3600.000	PRIORI25	3200.000
SIGANEX	3200.000	AMINAPOT720	317.000
CERILLO24	1600.000	COMBATRANSL	4920.000
DACOCIDA4D	506.000	DUALGOLD	800.000
ECUAMINA720	4410.000	ESTRIBOLS	4920.000
FUEGO500	5000.000	GESAPAX500FW	1600.000
GAMIT	5200.000	IGRAN500FW	1600.000
MACHETE600	1600.000	PANTERA	5200.000
PANTHER	5200.000	PASTAR360SL	300.000
PENDIMETALIN40	1600.000	RANGER480	8000.000
AVANTI2	253.000	NUVAN100EC	8000.000

Tabla 4.2: Solución de cantidad a fraccionar

4.2. Solución de la heurística

Para calcular el tiempo total del fraccionamiento en la heurística, al momento de asignar los productos a las máquinas, esto no se tomó como una restricción del problema, si no que se dió una penalización para cada vez que se irrespete que un producto no se pueda realizar en una máquina.

Debido a que la heurística tiene valores aleatorios en la mayoría de las funciones para generar la solución inicial y también al momento de realizar el algoritmo de

la Búsqueda Tabú, se ha decidido observar el promedio de 100 observaciones de los resultados arrojados por la heurística.

Primero se realizó una Búsqueda Tabú con una lista Tabú de tamaño 2. En la figura 4.1 se observará el gráfico de los resultados reflejados en cada iteración.

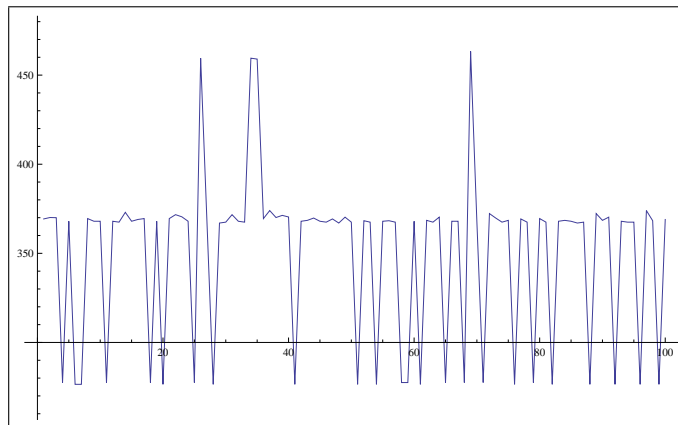


Figura 4.1: Resultados con Tenure Time=2

Y debido a la inestabilidad de las respuestas en cada iteración, se trabajó con un lista tabú de tamaño 7. De la cual se observaron los siguientes resultados a continuación en la figura 4.2.

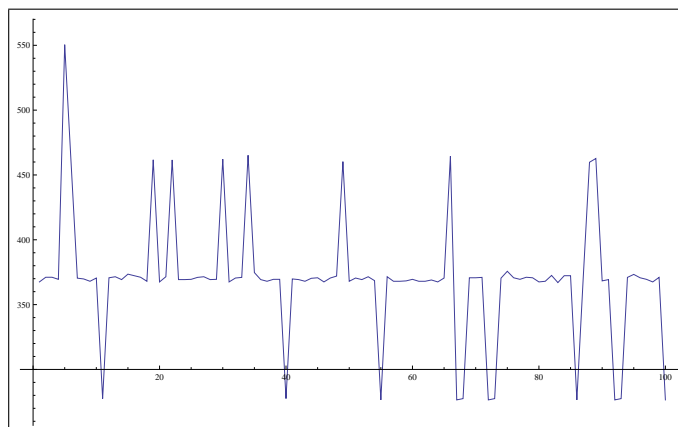


Figura 4.2: Resultados con Tenure Time=7

De las soluciones capturadas en la figura 4.2, se tuvo que el tiempo promedio de fraccionamiento es de 350.475 horas, en total 44 días de producción, lo que significa que la producción durará 20 días más comparados con el resultado del modelo matemático. Cabe recalcar que existe un costo de penalización que implica 100 unidades de tiempo adicionales cada vez que un producto se asigna a una máquina en la que este no se puede realizar, por lo que el tiempo promedio de fraccionamiento de la respuesta obtenida en la heurística se torna mayor que la solución del modelo matemático .

El hecho de que no exista una restricción para la asignación de productos a las máquinas es lo que ocasiona la variabilidad en las respuestas, y que el tiempo de terminación de los productos también luzca demasiado alto.

El tiempo al que más convergieron los resultados, luego de haber realizado el proceso de corrida del programa, la solución fue de 276.5 horas, un total de 34 días para terminar los productos y satisfacer la demanda.

Y la solución es la que se muestra en la tabla 4.3.

MÁQUINAS	ORDEN DE PRODUCCIÓN
Insect10:	LYNX24 ⇒ SCORE250EC ⇒ SULFOLAC58SC ⇒ ALTO100SL ⇒ TOPAS100 ⇒ KASUMIN
EMSA:	MERTECT500SC ⇒ SULFOLAC58SC ⇒ SIGANEX ⇒ PRIORI25 ⇒ INTERCEPTBIOFUNG ⇒ PHYTON24
MANUAL:	DACOCIDA4D ⇒ IGRAN500FW ⇒ AMINAPOT720 ⇒ GESAPAX500FW ⇒ PENDIMETALIN40 ⇒ ECUAMINA720 ⇒ ESTRIBOLS ⇒ PASTAR360SL ⇒ DACONIL720FW ⇒ DUALGOLD ⇒ AVANTI2 ⇒ FUEGO500 ⇒ RANGER480 ⇒ TILT250EC
LPGT6:	PANTERA ⇒ COMBATRANSL ⇒ CERILLO24 ⇒ PANTHER ⇒ GAMIT
N3:	NUVAN100EC

Tabla 4.3: Solución de la heurística

Capítulo 5

CONCLUSIONES

1. El problema de la calendarización para el fraccionamiento de productos para la empresa fue analizado, formulado y resuelto de manera satisfactoria, otorgándonos una buena solución, la cual se ajusta a los requerimientos de la empresa.
2. Se logró desarrollar la formulación matemática del problema y el diseño de la heurística, para luego realizar la programación en GAMS y Wolfram Mathematica respectivamente, con los cuales se obtuvo la sucesión de productos de la empresa que van a ser particionados según el requerimiento de producción, el cual depende de la demanda.
3. Se efectuó la comparación entre la solución obtenida en base al modelo matemático y en base a la heurística, ambas respuestas tuvieron resultados asonantes, teniendo en cuenta que la respuesta del modelo matemático es la solución óptima, y la solución obtenida por medio de la heurística resultó una buena solución.

4. La heurística diseñada atribuye la posibilidad de trabajar con un número mayor de productos y también con un superior número de máquinas, mientras que no podemos decir lo mismo del modelo matemático, ya que éste tiene una limitación de recursos en cuanto al número de máquinas y productos, y esto es debido a la complejidad del problema que da como consecuencia una extensa prolongación en los tiempos de resolución del mismo.
5. La validación de la heurística fue propinada con ayuda de la formulación del modelo matemático, que fue de gran utilidad al momento de comprobar la efectividad de la respuesta obtenida por medio de la heurística.
6. Este proyecto revela que las técnicas de programación lineal y el diseño de heurísticas son útiles para resolver problemas de la vida real. Lamentablemente estas técnicas se usan con poca frecuencia, tal vez por la dificultad que ésta involucra en el proceso de formulación, diseño e implementación de la solución. Para problemas de calendarización grandes el tiempo de ejecución puede incrementarse a valores no aceptables, es por esto que la aleatorización para diseñar la búsqueda tabú podría ya sustituirse por algún método sistemático o por otra parte es posible generar soluciones no tan buenas mediante el uso de la programación lineal con restricciones relajadas.

7. La utilización de métodos exactos y de heurísticas para la resolución de problemas de calendarización, dan a relucir cómo las herramientas de análisis logístico son de alto beneficio para quienes decidan aplicarlas a las operaciones de una empresa.

Capítulo 6

RECOMENDACIONES

1. En esta implementación del *Modelo Matemático* y de la *Heurística* se considera un número de restricciones de acuerdo a lo que se deseaba determinar pueden ampliarse. Por ejemplo, una restricción que no fue tomada en cuenta fue la consideración de toda la mano de obra al máximo. Esto influiría a la hora de la determinación del fraccionamiento haciendo más producción en menos tiempo.
2. La optimización de la programación de la actividad de fraccionamiento de la empresa, debería ser considerada con mayor énfasis por las instancias respectivas, al ser un conjunto de acciones que definitivamente disminuye las horas de trabajo, maximiza la producción y como reduce los gastos que podría demandar una planificación elemental de los recursos.
3. Tener un control de trabajo asignado al fraccionamiento de los productos a través de una adecuada planificación y control de las máquinas y del personal utilizado. Se debe saber cuándo debe iniciar y terminar cada orden

de trabajo en cada máquina, para poder aceptar nuevos pedidos y cuándo se entregarán al cliente.

4. Se requiere la generación de nuevos documentos que especifiquen la ruta de proceso y las características especiales del producto, como lo son: tiempos por proceso, herramientas, maquinaria y ajustes de máquina requerido para el debido fraccionamiento del producto.
5. Entablar una conversación con el personal de la empresa para analizar las fallas que presenta el sistema de producción a fin de iniciar el estudio de las posibles soluciones para adecuar el antiguo sistema de fraccionamiento de los productos a los requerimientos actuales obtenidos mediante una programación.

Bibliografía

- [1] Román Companys Pascual, Johan B. Fonollosa i Guardiet *Nuevas técnicas de gestión de stocks: MRP Y JIT*.
- [2] Michael L. Pinedo. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Third Edition*.
- [3] Beatriz Pérez Rojas María Auxilio Osorio Lama
Análisis Comparativo de Heurísticas para el Problema de Calendarización de Trabajos con Transferencia Cero. Departamento de Sistemas y Computación Instituto Tecnológico de Puebla Facultad de Ciencias de la Computación Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- [4] Teofilo Gonzalez and Sartaj Sahni *Flowshop and Jopshop Schedules: Complexity and Approximation*.
- [5] Kobayashi, S., Ono, I., Yamamura, M. *An Efficient Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling Problems*.
- [6] Joseph Y-T. Leung (2004). *HANDBOOK OF SCHEDULING: ALGORITHMS, MODELS, AND PERFORMANCE ANALYSIS*.
- [7] Lance Chambers (2000). *The Practical Handbook of Genetic Algorithms Applications, Second Edition*
- [8] Wayne L Winston, Jeffrey B Goldberg (2004). *Investigación de operaciones : aplicaciones y algoritmos, Cuarta Edición*
- [9] David Ray Anderson, Dennis Sweeney, Thomas Arthur Williams. *Métodos Cuantitativos para los negocios, Novena Edición*
- [10] Barry Render *Principios de Administración de Operaciones, Quinta Edición*
- [11] M.D.Oliff and E.E.Burch (1985) *Multiproduct Production Scheduling at Owens- Corning Fiberglas, Vol. 15, Nº 5*
- [12] John R.Olson and Marc J.Schniederjans (1999) *Advanced Topics in Just - in Time Management*
- [13] Blas Pelegrín Pelegrín (2004) *Avances de Localización de Servicios y sus Aplicaciones*
- [14] Alicia Cirila Riojas Cañar (2005) *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N -Reinas*