

**Diseño de un Algoritmo de Secuenciación Aplicado a la Manufactura de  
Implantes para las Arterias Coronarias**

**Por  
Shirley Clavijo Mosquera  
Proyecto sometido en  
Cumplimiento parcial de los requisitos para  
el grado de**

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
en  
SISTEMAS GERENCIALES**

**UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO  
RECINTO UNIVERSITARIO DE  
MAYAGÜEZ  
2009**

**Aprobado por:**

----- <b>Héctor J. Carlo, Ph.D. Miembro, Comité Graduado</b>	----- <b>Fecha</b>
----- <b>Viviana I. Cesaní, Ph.D. Miembro, Comité Graduado</b>	----- <b>Fecha</b>
----- <b>Nazario D. Ramírez-Beltrán, Ph.D. Presidente, Comité Graduado</b>	----- <b>Fecha</b>
----- <b>Yolanda Ruiz-Vargas, Ph.D. Representante Estudios Graduados</b>	----- <b>Fecha</b>
----- <b>Agustín Rullán, Ph.D. Director de Departamento</b>	----- <b>Fecha</b>

## **DEDICATORIA**

**A mis dos grandes amores: Dios y mi esposo.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Inicialmente quisiera agradecer a Dios por darme la fortaleza, por acompañarme en cada paso en todo este recorrido, y por permitirme crecer en todas las áreas de mi vida. Quiero agradecer a mi esposo por apoyarme y ayudarme en todo este proceso, por tener siempre una palabra de aliento y por su disposición cuando más lo necesitaba. Gracias bebé.

Sin lugar a duda este proyecto no hubiera sido posible sin el creador de él, mi consejero y quien me apoyó justo antes de llegar de Colombia, quien desde un principio me brindó su mano y nunca la alejó de mí, doy gracias a Dios por haberlo puesto en mi camino, y por cada uno de los consejos que no sólo a nivel profesional hizo a mi vida, sino también a nivel personal, por cada uno de los viajes y los esfuerzos que por este proyecto realizó, el Dr. Nazario D. Ramírez-Beltrán, siempre estuvo allí dispuesto a aclarar cada duda que se presentaba en el camino y a brindar una mano amiga cuando más lo necesitaba, quien dispuso de su tiempo y quien brindó de sus conocimientos para ayudarme a caminar este trayecto, de verdad y de todo corazón, le doy profesor mis más sinceros agradecimientos.

Agradezco de igual manera a cada uno de los miembros de mi comité, a la Dra. Viviana Cesaní y al Dr. Héctor Carlo por su disposición, por su ayuda, por su tiempo, por sus recomendaciones y por brindarme su apoyo y aceptar ser parte de este, mi comité graduado.

Quisiera agradecer a alguien quien siempre me dio parte de su tiempo, de sus conocimientos, y quien se entregó a este proyecto en gran manera como si fuera propio, Harry Rodríguez, gracias por tus ideas y por tu dedicación.

Quiero agradecer a mi familia, a mis padres que desde Colombia siempre me han brindado su apoyo, quienes creyeron siempre en mí y que siempre me han demostrado su amor, y por quienes día a día agradezco a Dios, definitivamente no me pudo haber regalado mejor familia que la que tengo.

A mis hermanos, los que se encuentran lejos y los que se encuentran cerca, sin sus palabras esto hubiera sido más difícil, a mis sobrinos los de aquí y los de allá, ver cada fin de semana a Naim y Yucef, es sentir que en unos seres tan pequeños existe tanto y tanto amor y que los amo con toda mi alma. A Che, nunca se me olvidan cada uno de los viajes que por este proyecto tuvimos que hacer y también cuántos de ellos no fueron exitosos por una u otra razón.

A mi familia boricua, mis suegros, quienes han sido una bendición de Dios en mi vida, quienes también aportaron su granito de arena en todo este trabajo, sus oraciones, sus palabras, su apoyo y simplemente aceptarme y quererme como soy, Dios los bendiga grandemente.

A Joan Manuel Castro, a quien muchas veces estuve molestando para que me explicara una que otra formulita y quien sin negarme parte de su tiempo siempre estuvo dispuesto a ayudarme. Gracias Joan!!!.

A Karla Yasmét, mi amiguita y ex room-mate, tus palabras aun están en mi corazón, gracias por soportar cada una de mis locuras.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Planteamiento del Problema .....	3
1.2 Motivación .....	4
1.3 Revisión de Literatura .....	4
1.4 Objetivos .....	12
1.4.1 Objetivo General .....	12
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN .....	13
2.1 Justificación .....	14
3. MARCO TEÓRICO .....	17
4. METODOLOGÍA .....	21
5. FORMULACIÓN MATEMÁTICA .....	26
5.1 Programa de Asignación .....	26
5.2 Programa de Secuenciación .....	28
5.2.1. Secuencia Tecnológica .....	29
5.2.2. Activación de Secuencias .....	29
5.2.3. Variables Binarias .....	30
5.2.4 Restricción de no negatividad .....	30
6. FASES DE DESARROLLO DEL PROYECTO .....	31
6.1 Estrategia computacional .....	33
6.2 Ejercicios de Prueba para Comparar los Algoritmos. ....	34
6.3 Algoritmos Heurísticos estudiados. ....	37
6.3.1 Algoritmo de Desarrollo de Secuencia Parcial. ....	38
6.3.2 Comparación del algoritmo de secuencia parcial con el algoritmo de ordenamiento ascendente. ....	39
6.3.3 Comparación del algoritmo de secuencia parcial con el Algoritmo de Ordenamiento Descendente. ....	40
6.3.4 Análisis adicional .....	45
6.4 Comparación con algoritmos Heurísticos existentes en la literatura .....	47

6.3.1 Algoritmo de Gupta .....	49
6.3.2 Algoritmo de Palmer .....	52
6.3.3 Análisis Estadístico de los diferentes modelos estudiados .....	56
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	60
7.1 Conclusiones .....	60
7.2 Trabajo futuro .....	61
REFERENCIAS .....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 1</i> .....	35
Tabla 2. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 2</i> .....	35
Tabla 3 <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 3</i> .....	35
Tabla 4. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 4</i> .....	35
Tabla 5. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 5</i> .....	36
Tabla 6. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 6</i> .....	36
Tabla 7. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 7</i> .....	36
Tabla 8. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 8</i> .....	36
Tabla 9. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 9</i> .....	37
Tabla 10. <i>Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 10</i> .....	37
Tabla 11. <i>Tiempos de procesamiento de 6 productos en 4 máquinas.</i> .....	40
Tabla 12. <i>Resultados obtenidos con cada uno de los métodos heurísticos estudiados.</i>	41
Tabla 13. <i>Datos considerando tiempos de procesamiento más corto total</i> .....	46
Tabla 14. <i>Comparación de Heurísticos clásicos (Taillard 1989).</i> .....	48
Tabla 15. <i>Resultados obtenidos en comparación con el Algoritmo de Gupta.</i> .....	51
Tabla 16. <i>Resultados obtenidos en comparación con el Algoritmo de Palmer.</i> .....	54
Tabla 17. <i>Datos para diseño de experimentos.</i> .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Distribución de máquinas en el módulo de producción.</i> .....	13
Figura 2. <i>Eficiencia de la S-Partial vs. S-Total. Cruz-Chávez, y colaboradores (2007).</i> ..	18
Figura 3. <i>Diagrama de Flujo del proceso de formulación de los algoritmos de asignación y secuenciación.</i> .....	24
Figura 4. <i>Diagrama de Flujo del proceso de formulación del algoritmo heurístico.</i> .....	25
Figura 5. <i>Gráfica de estrategia computacional.</i> .....	33
Figura 6. <i>Resultados de corridas con el método exhaustivo (solución óptima)</i> .....	42
Figura 7. <i>Resultados de corridas con el método de Secuencia Parcial.</i> .....	42
Figura 8. <i>Secuencia parcial vs. Solución óptima</i> .....	43
Figura 9. <i>Resultados de corridas con el Método de ordenamiento Ascendente.</i> .....	43
Figura 10. <i>Resultados de corridas con el Método de ordenamiento descendente.</i> .....	44
Figura 11. <i>Comparación de los resultados obtenidos en cada una de las corridas por los diferentes métodos heurísticos estudiados.</i> .....	44
Figura 12. <i>Solución óptima vs. Método de Ordenamiento Ascendente y TPMC</i> .....	46
Figura 13. <i>Comparación del algoritmo de Secuencias Parciales vs. Algoritmo de Gupta</i> .....	51
Figura 14. <i>Comparación del algoritmo de Secuencias Parciales vs. Algoritmo de Palmer</i> .....	54
Figura 15. <i>Comparación de todos los algoritmos heurísticos vs. La solución óptima</i> .....	55
Figura 16. <i>Gráfica comparativa de los diferentes algoritmos estudiados.</i> .....	55
Figura 17. <i>Boxplot del tiempo total de procesamiento por método</i> .....	58
Figura 18. <i>Gráfica de los residuales de los heurísticos estudiados</i> .....	59

## LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A. <i>Resumen de la demanda semanal por módulo</i> .....	64
Apéndice B. <i>Resultados de asignación por semanas</i> .....	66
Apéndice C. <i>Ejemplo de aplicación</i> .....	78
Apéndice D. <i>Algoritmo de Asignación</i> .....	84
Apéndice E. <i>Algoritmo de Secuenciación</i> .....	86
Apéndice F. <i>Cálculos del Algoritmo de Gupta</i> .....	93
Apéndice G. <i>Cálculos con Algoritmo de Palmer</i> .....	98

## RESUMEN

Este estudio presenta primero un método para asignar un grupo de lotes a un conjunto de módulos de manufactura para maximizar la productividad, tomando en consideración las restricciones de capacidad, demanda, y además la distribución apropiada de lotes a través de los módulos. La segunda contribución de este estudio fue sugerir un método para determinar la secuencia de producción de los lotes en cada modulo para minimizar el tiempo total de manufactura, tomando en cuenta la secuencia tecnológica, y evitando interferencia así como también evitando los cambios bruscos de tamaño de producto.

Los problemas de asignación y secuenciación fueron exitosamente formulados y resueltos usando programación matemática. La formulación matemática fue diseñada usando los programas de MATLAB, EXCEL, y LINGO, de tal forma que esta sea fácil para ser implementada. Además, un algoritmo heurístico fue sugerido para facilitar la solución de problemas semejantes.

## **ABSTRACT**

This study presents first a method to assign a number of lots to a given set of manufacturing modules to maximize productivity, taking into account the constraints of production capacity, demand, and designing an appropriate distribution of lots throughout modules. The second contribution of this study was to suggest a method for determining the manufacturing sequence of lots in each module to minimize the makespan, taking into account the technological sequence, avoiding machine interference, and also avoiding abrupt product-size changes. .

The assigning and sequencing problems were successfully formulated and solved using mathematical programming. The mathematical formulation was designed using MATLAB, EXCEL, and LINGO computer programs, in a way that it can be easily implemented. A heuristic algorithm was also suggested to facilitate solving similar problems.

## 1. INTRODUCCIÓN

“La vida es toda una planificación” así lo señala Arjona (1979), y no se equivoca pues todo está precedido por un proceso de planificación. Tareas tan sencillas como ir de compras, programar el orden de las obligaciones a realizar en nuestra jornada laboral, todo sin excepción se planifica; si bien es cierto, algunos aspectos requieren una planificación un poco más compleja que otros, pero todos requieren que el proceso se lleve a cabo.

Al igual que en nuestro diario vivir, la producción no es la excepción en cuanto a planificación se refiere, y de esta fase depende en gran manera los resultados que se obtengan al final de la línea de producción. Por tal motivo resulta sumamente importante que desde el inicio la producción se visualice de una forma clara y ordenada para evitar contratiempos sin dejar de lado que lo más importante para la compañía es obtener un mayor margen de beneficios económicos.

Las empresas con altos niveles de producción a nivel mundial se caracterizan por tener una línea de manufactura ordenada, cuyo objetivo es maximizar ganancias y reducir costos operacionales sin dejar de lado la calidad del producto ni el buen servicio al cliente. El tiempo total de producción es una de las métricas mayormente usadas para medir la efectividad de las líneas de manufactura, lo que obliga entonces a buscar soluciones costo efectivas para tratar de disminuirlo y aumentar la productividad.

La manera como se encuentra físicamente distribuida la planta de producción resulta de suma importancia para determinar el tiempo total de producción de una línea en específico. Es necesario resaltar que este aspecto ocupa gran parte de la atención cuando la línea se compone de un solo producto, pero cuando en la línea se producen múltiples productos existen otros factores que toman igual importancia que el antes mencionado.

Reportar una mayor productividad en la línea va ligado a varios factores, dentro de los cuales se encuentra la secuencia de manufactura. Cuando se expone un caso como el antes mencionado, sin omitir las restricciones inherentes a la planta esta problemática toma gran valor.

Dentro de un proceso de producción con varias etapas, 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 los productos, tiempo de espera entre máquinas, tiempo de flujo dentro de la línea, atrasos, adelantos, inventarios, tiempos de preparación, 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. También determinará la cantidad de producto final obtenido, teniendo en cuenta que la secuencia con la que se inicie la producción es la misma a seguir a lo largo de todo el proceso.

Una compañía que cuenta con un sistema computacional especializado en la determinación de la secuencia de 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 compañía 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.

Un sistema incorrecto de secuenciación puede ocasionar atrasos en las entregas, situación que deja claramente insatisfechos a los clientes por la cual el mismo puede tomar la determinación de cambiar de proveedor. Es por esto que aunque parezca no

estar relacionada la secuenciación con la satisfacción del cliente, aquí visualizamos que estos términos están íntimamente relacionados, así que una cosa puede conducir a la otra.

Por lo establecido anteriormente, la secuencia de producción es un área importante dentro del estudio de toda la línea manufacturera. Constituye ganancia o pérdida para la compañía, 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 empresa en la cual se estará implementando el algoritmo y de la cual se extraerá toda la información necesaria, debido a que una vez se aplique el algoritmo ayudará a determinar la secuencia óptima de producción de una manera sencilla, rápida y confiable.

## **1.1 Planteamiento del Problema**

Una compañía local produce implantes para las arterias coronarias. Este implante es una estructura metálica con un medicamento para facilitar la circulación sanguínea en las arterias y evitar la re-estenosis. Debido a que los implantes son muy costosos se desea utilizar técnicas de programación lineal para resolver el problema de asignación de los productos a cada uno de los módulos de producción y la secuencia en que estos deben ser manufacturados una vez se asignen.

El problema de asignación es un problema trivial que ha sido resuelto y se presenta en la mayoría de los libros de texto de programación lineal. El problema de secuenciación consiste en determinar el orden en que se van a manufacturar  $n$  tareas en un conjunto de  $m$  máquinas. Si el número de máquinas es igual a uno entonces el problema de secuenciación se convierte en el problema del agente viajero. Si tenemos dos máquinas entonces el problema se puede resolver utilizando el algoritmo de Johnson (1954). Si el problema tiene  $m$  máquinas y  $n$  operaciones entonces se convierte en un problema de alta complejidad computacional que resulta intratable dependiendo de la magnitud de  $m$  y  $n$ . En la literatura se le conoce como un problema de NP-hard (NP-

complejo, o NP-difícil). Lo cual significa que el tiempo computacional crece de manera exagerada e impide obtener una solución óptima en un tiempo razonable. El problema de secuenciación de la compañía en cuestión consiste en  $m=4$  y  $n=5$ . Así que es un problema que se puede resolver en forma exacta en un tiempo razonable.

## 1.2 Motivación

La principal motivación de este trabajo fue la necesidad de diseñar una herramienta que ayude a la determinación rápida y sencilla de la asignación y secuenciación de diferentes productos en diversas máquinas y a su vez en diversos módulos de producción y que sobre todo fuera una herramienta de fácil manejo para todo el personal de la compañía. La herramienta debe ser práctica aún para aquellas personas que dentro de la empresa no cuentan con un manejo avanzado de los software de programación aquí empleados. Se debe tener en cuenta que dentro del proceso se presentan restricciones de capacidad de producción que tiene cada uno de los módulos, la necesidad de satisfacer la demanda, la restricción de evitar que todos los lotes de producto sean asignados a un mismo módulo de producción. Una vez asignados debe determinarse la secuencia en que van a ser manufacturados los lotes dentro de cada módulo de manera independiente. Las restricciones que rigen la secuencia son las de no permitir que la producción de los lotes sea interferida en ningún punto de la línea, además todos los lotes deben seguir un mismo flujo, es decir iniciar la producción en la máquina 1 hasta terminar en la máquina  $m$ . Finalmente se debe penalizar los cambios bruscos que se realicen al pasar de la producción de un trabajo  $i$  a un trabajo  $j$ .

## 1.3 Revisión de Literatura

La complejidad y cada uno de los aspectos que se deben tener en cuenta en la secuenciación de productos fueron descritos por Stoop y Wiers (1996), quienes

enmarcan claramente que cuando se presenta un problema de este tipo se suelen limitar a las siguientes restricciones:

- Capacidad finita de los recursos
- Relaciones de precedencia
- Fechas de inicio y entrega de los trabajos.

La secuenciación no sólo 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. Ninguno de los elementos anteriores deben estar separados el uno del otro, debido a que debe existir un complemento para tratar de resolver de manera óptima cada uno de los disturbios, interferencias o imprevistos que se presentan dentro de una línea de producción.

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

- Debido a la capacidad: Como daños en la máquina, ausencia de los operadores o falta de alguna herramienta.
- Relacionado a la cantidad de producción: Muchas órdenes de pedido por cumplir.
- 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 secuenciación 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 secuenciación 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 por que 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 secuenciación enfocado a la producción y específicamente a la minimización del tiempo total de producción considerando la inclusión de un conjunto de máquinas es el “*Shifting bottleneck heuristic*” (Pinedo, 2002). Este algoritmo modela una competencia de los productos por ser los primeros en procesarse en las máquinas disponibles en la línea, actuando así mismo como un cuello de botella. Si se analiza el algoritmo del cuello de botella como hemos decidido llamarlo para efectos de este proyecto no resulta ser útil cuando los productos deben ser procesados en un orden secuencial dentro un mismo grupo de máquinas.

El proceso de secuenciación no sólo 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. Este punto está expuesto de manera clara por Olson y Schniederjans (2000), donde realizan un análisis exhaustivo a una empresa fabricante de pinturas que tienen un sistema de fechas de entregas que deben cumplir y una calidad de producto que se debe cuidar para que no se contaminen entre sí.

Olson y Schniederjans (2000) establecen que un error en la determinación de la secuencia de producción en este caso puede llevar a la compañía de pinturas a tomar dos claras determinaciones:

- (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 EPA (Environmental Protection Agency), 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 bache 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.

Es importante analizar como la investigación antes expuesta guarda similitud con nuestro trabajo, debido a que el cambio abrupto de fabricación de un tamaño de producto a otro, trae consigo pérdidas cuantiosas expresadas en dinero y tiempo de preparación de las máquinas que posteriormente se ven reflejadas en la productividad de la línea.

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.

Portougal y Robb (2000) hicieron un 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 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 periodos 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 sólo 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).

Moss y sus colaboradores (2000), basaron sus investigaciones en la determinación del orden de producción de un sistema de partes usado en la línea de ensamblaje de productos intravenosos procesados en cuartos limpios. Históricamente en la compañía

donde se aplicó el estudio, la planificación de la producción era establecida basada en la experiencia de la alta gerencia, por lo tanto se quería implementar de una manera sencilla en un computador personal y que fuera fácil de manejar por cualquier persona con habilidades en las operaciones de producción un sistema para determinar la secuencia de producción.

Se implementó la programación matemática en tres fases:

1. En la primera estación se utilizó la programación lineal entera P-mediana.
2. Para determinar la secuencia entre el grupo de familias se usó el algoritmo del agente viajero.
3. 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), 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:

1. Ecuación del balance de producción
2. Ecuaciones de capacidad de inventario

3. Restricciones de no interferencia
4. 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.

Pero, ¿qué sucede con este tipo de modelaciones?, según señalan en su trabajo investigativo Srikar y Ghosh (1986) las investigaciones realizadas hasta el momento no han podido determinar un algoritmo o método de solución que a medida que aumente las cantidades de tareas no afecte significativamente el tiempo computacional, por lo que se hace necesario implementar equipos de alta tecnología para proporcionar un poco más de rapidez al proceso, o en su defecto agrupar los trabajos en familias teniendo en cuenta aquellos que tienen tiempos de procesamiento similares, para de esta manera reducir la complejidad del problema.

Algunas de las investigaciones con las cuales se han obtenido mejores resultados según reporta la literatura hasta el día de hoy, son las siguientes:

Srikar y Ghosh (1986), lograron resolver un máximo de 6 tareas y 6 máquinas en un tiempo aproximadamente de 22 minutos ejecutando el programa en una computadora Prime 550.

Los investigadores E.F. Stafford y Tseng (1990) utilizaron el software LINDO para resolver un problema donde se integraban 5 máquinas y 7 tareas en un tiempo aproximado de 6 horas corriéndolo en una computadora personal (PC). Otra investigación señalada en la literatura es la realizada por Taug y colaboradores (2004) donde tratan de resolver un sistema con  $m$  máquinas idénticas y  $n$  trabajos, cuyo objetivo principal es determinar la secuencia que minimice el tiempo completo de producción y maximice la utilización de las máquinas. En este problema los factores de mayor relevancia encontrados resultaron ser la secuencia de los trabajos en proceso y el tiempo total de procesamiento.

Son diversas las técnicas empleadas por cada investigador, pero, todos y cada uno de los modelos planteados contribuyen grandemente a la investigación que se pretende adelantar, pues nos ayuda a visualizar técnicas para el modelaje e implementación del algoritmo a plantear y donde se deben considerar una serie de restricciones que delimiten estratégicamente el área de estudio considerada.

Uno de los objetivos de este proyecto es desarrollar un modelo que integre 6 tareas con un grupo de 5 máquinas integrando los softwares MATLAB, LINGO y EXCEL. MATLAB será utilizado para determinar las permutaciones que se requieren para ejecutar el modelo, permitiendo así detallar cada una de las posibles secuencias que el algoritmo debe considerar según el número de trabajos que tenga cada corrida. LINGO será la plataforma principal en la cual se va a correr el algoritmo, pues el mismo nos permite resolver el problema de asignación y secuenciación a través de los métodos de programación lineal entera y mixta los cuales están disponibles en este sistema computacional.

La anterior revisión de literatura busca resaltar diferentes estudios realizados por investigadores con problemas realmente implementados y la contribución al área de optimización hecha por cada uno de ellos, además, busca resaltar que el modelo realizado en este proyecto puede ser aplicable no solo para una fábrica de un determinado sector económico sino que tendrá la facilidad de adaptarse a una compañía que tenga un problema semejante.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar un algoritmo de optimización para resolver los siguientes problemas:

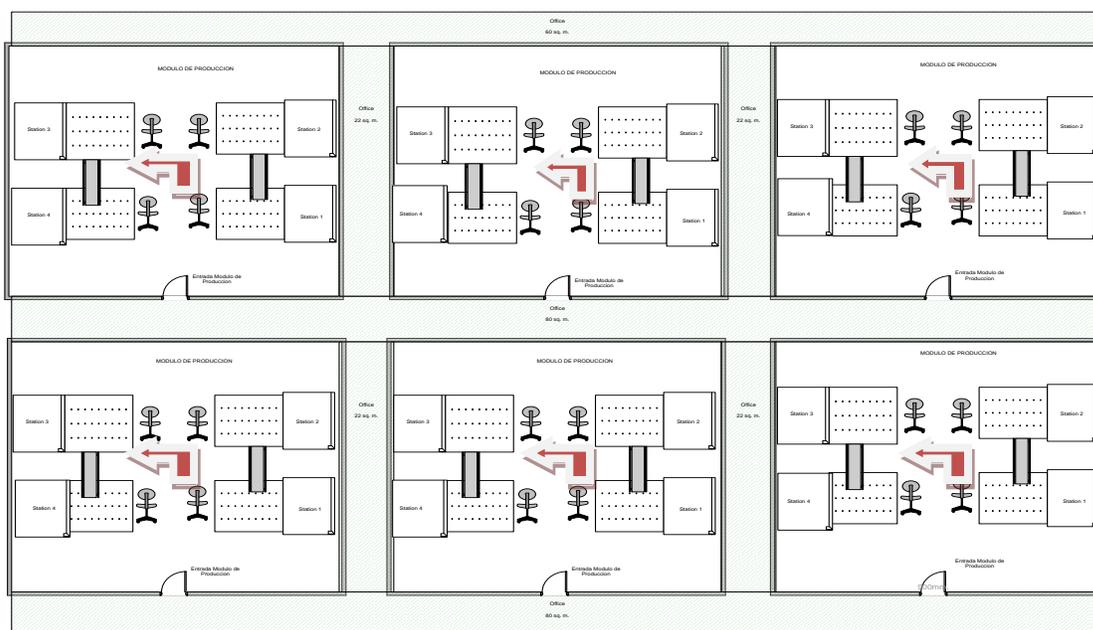
- Determinar el número de lotes en cada módulo de manufactura de tal manera que se maximice la productividad y se respeten las limitaciones de capacidad, demanda, y además los lotes se deben distribuir apropiadamente entre módulos.
- Determinar la secuencia de manufactura que minimice el tiempo total de producción (“makespan”). La secuencia debe cumplir con un orden tecnológico, evitar interferencia, y además evitar cambios bruscos en el tamaño del producto.
- Desarrollar la interface entre el optimizador LINGO y los programas de MATLAB y Excel para que el proceso de formulación y solución sea simple. De tal manera que una persona no entrenada en optimización resuelva el problema de asignación y secuenciación.
- El algoritmo debe ser lo suficientemente general para resolver problemas semejantes.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

La compañía objeto de estudio manufactura implantes para las arterias coronarias, con un alto nivel de demanda en toda la isla y en el territorio americano. La compañía produce doce tamaños diferentes de producto, los cuales serán nombrados con letras del alfabeto.

El proceso de producción se compone de cuatro etapas, las cuales deben ser visitadas en serie por cada uno de los implantes. En este proyecto cada una de las etapas será nombrada numéricamente para facilitar su representación.

El área de producción está subdividida en varios módulos, y el despliegue se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Distribución de máquinas en el módulo de producción.**

En cada módulo se encuentran cuatro máquinas y la secuencia es como señala la flecha.

Para la fabricación de cada tamaño de producto las máquinas tienen unas calibraciones que deben cumplir, las cuales son programadas electrónicamente, por lo que al cambiar de tamaño deben volverse a calibrar para arrancar nuevamente el lote de producción.

Cada módulo tiene una productividad (“yield”) la cual es diferente para cada tamaño de producto y es diferente dependiendo del modulo donde se manufactura, pues existen módulos que son más ágiles fabricando un tamaño específico de producto que otros.

## **2.1 Justificación**

El mundo globalizado en que nos encontramos hoy en día se rige en gran manera por el concepto de “*Justo a Tiempo*” desarrollado por los japoneses en la década de los 50 cuyo objetivo principal es tener los componentes necesarios para la producción justo en el momento preciso para iniciar la producción y para cumplir con las exigencias de los clientes, disminuyendo así el inventario y terminando la producción en el momento preciso de entrega. Este concepto, aunque fue creado hace un tiempo, permite que muchas compañías se mantengan en una buena posición con respecto a sus competidores pues así como la tecnología cada día evoluciona así también los clientes de dichas compañías. Cada día los clientes pautan sus especificaciones de manera más amplia, ya no son los mismos clientes de hace unos años atrás, para ellos resulta sumamente importante que los productos que adquieran además de tener una excelente calidad, sean entregados justo en el lugar y en el momento que los necesitan.

Actualmente, ya no resulta suficiente que los proveedores entreguen la materia prima a tiempo, de igual manera la satisfacción del cliente no es sólo parte del departamento de servicio al cliente, sino que también está ligado al proceso de producción. La

determinación de todo mecanismo que disminuya el tiempo total de producción, los desperdicios generados durante todo el proceso, el tiempo de preparación de las máquinas y que garanticen mantener la buena calidad del producto, resulta importante en la administración moderna.

Es entonces cuando se palpa la necesidad de implementar un algoritmo que se convierta en una herramienta fácil de manejar en una compañía dedicada a la fabricación de productos médicos. La línea de producción principal, la cual representa el 80% de los ingresos totales de la compañía, se compone por un producto que se produce en doce tamaños diferentes, que son fabricados en celdas de producción con un mismo grupo de máquinas, por lo que las mismas requieren un tiempo de preparación que se incluye en el tiempo de producción total. Conocido esto se debe tratar de minimizar el tiempo de completar todos los trabajos (makespan) y de esta manera lograr tener el producto final en el menor tiempo posible, con el mínimo tiempo de preparación de las máquinas entre un producto de tamaño específico y otro.

Es necesario determinar la asignación y la secuencia de producción correcta que permita alcanzar el objetivo propuesto en el menor tiempo posible y teniendo en cuenta las restricciones asociadas al área de producción (cuartos limpios).

Además la anterior debe ajustarse fácilmente a cualquier cambio inesperado que pueda surgir dentro de la línea. Estos cambios deben ser manipulados de forma sencilla por la persona encargada de la producción.

El desarrollo del algoritmo de asignación y secuenciación es necesario porque contribuye a:

- Determinar la asignación óptima de los productos a los cuartos limpios que garanticen la máxima productividad. Dentro de la compañía existe un total de trece cuartos limpios, de los cuales cuatro están siendo usados para producir el producto en estudio y doce tamaños de productos, y cada cuarto es manejado

como uno independiente del otro, es decir, la producción de cada uno de ellos no depende de la producción en el siguiente.

- Determinar la secuencia de producción óptima que minimice el tiempo total de producción. En la determinación de la secuencia se tomará en cuenta las restricciones asociadas al proceso que nos permitirán modelar cualquier cambio inoportuno que se presente en la producción.

### 3. MARCO TEÓRICO

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  $o$  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 requisiciones, largas rutinas de producción son complejas e incluye las siguientes restricciones:

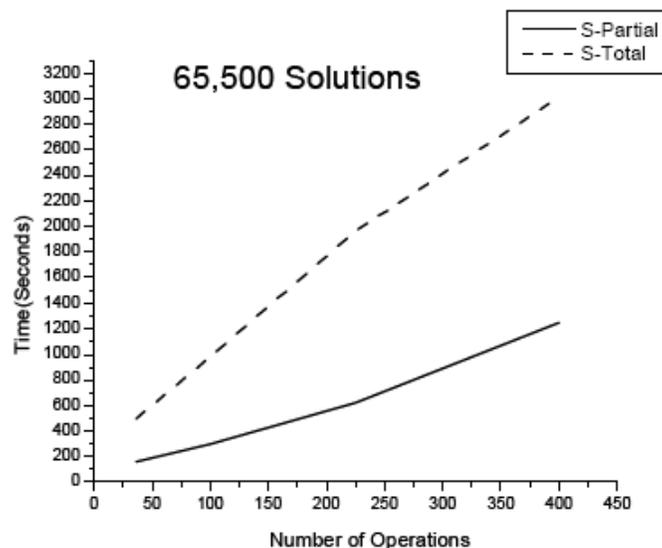
1. Una máquina no puede realizar más de una operación a la vez.
2. El orden de ejecución de la operación es respetado en cada trabajo.

En el trabajo investigativo realizado por Cruz y colaboradores (2007), se logró desarrollar un algoritmo que ayudaba a determinar la secuencia de producción óptima de un arreglo de 3 productos con 3 máquinas. Dentro del método de solución los investigadores diseñaron un algoritmo restringido por la capacidad de recursos disponibles y la precedencia que cada una de las operaciones, teniendo en cuenta cual de los nodos de la red tenía un valor mayor.

Para llegar a la solución óptima se requirió de varias corridas iniciales, que les permitía a los investigadores ir obteniendo soluciones parciales sobre las cuales iban alterando el orden de las operaciones hasta lograr acercarse a la óptima.

Dentro del proceso de solución se utilizaron dos estrategias del sistema de secuenciación tal como la estrategia de “*S-total*” y la segunda estrategia “*S-partial*”, ambas conocidas así por sus nombres en inglés; mientras la primera realiza el clásico estudio en todas las operaciones involucradas en el problema de secuenciación, la segunda sólo realiza un estudio parcial de las operaciones, lo que permite obtener una re-secuenciación sólo en una parte de las operaciones asociadas al proceso.

Al realizar ambas operaciones se determinó que realizar un estudio parcial resulta más factible que realizar un estudio total, resultando según se muestra en la *Figura 2*.



**Figura 2. Eficiencia de la S-Partial vs. S-Total. Cruz-Chávez, y colaboradores (2007)**

Pinedo (2002), otro de los autores del tema de programación de la producción, integra de igual manera la programación disyuntiva para solucionar problemas de “*Job Shop*”. La programación disyuntiva de Pinedo está muy relacionada a la representación gráfica disyuntiva del flujo del trabajo. En su programación Pinedo plantea las siguientes variables:  $Y_{ij}$  que denota el tiempo de inicio de operación  $(i,j)$ . Se conoce como  $N$  el conjunto de todas las operaciones  $(i,j)$  y  $A$  como el conjunto de todas las restricciones de ruta  $(i,j) \rightarrow (k,j)$  que son requeridas para el trabajo  $j$  para ser procesado en la máquina  $i$  antes de procesarse en la máquina  $k$ .

La siguiente programación matemática minimiza el tiempo total de procesamiento.

*Minimizar Cmax*

Sujeto a:

$$\begin{array}{ll}
 Y_{kj} - Y_{ij} \geq P_{ij} & \text{Para todo } (i, j) \rightarrow (k, j) \in A \\
 Cmax - Y_{ij} \geq P_{ij} & \text{Para todo } (i, j) \in N \\
 Y_{i,j} - Y_{il} \geq P_{il} \text{ o } Y_{il} - Y_{i,j} \geq P_{ij} & \text{Para todo } (i, l) \text{ y } (i, j), i = 1, \dots, m \\
 Y_{i,j} \geq 0 & \text{Para todo } (i, j) \in N
 \end{array}$$

Donde:

*Cmax*: Tiempo en que el último trabajo abandona el sistema (“makespan”)

*N*: Conjunto de todas las operaciones  $(i, j)$

*A*: Rutas de los trabajos

*P*: Tiempo de procesamiento de cada producto en cada máquina.

*M*: Número de máquinas.

Si se define a  $j$  como el trabajo que debe ser procesado en las máquinas  $i$  y  $k$ , se observa que el primer conjunto de restricciones plantea que la operación  $(k, j)$  no se puede empezar antes que la operación  $(i, j)$ . La segunda restricción plantea que la resta del tiempo total de procesamiento (makespan) menos el tiempo en el que empieza a procesarse la operación  $(i, j)$ , debe sobrepasar o por lo menos igualar el tiempo de procesamiento del trabajo  $j$  en la máquina  $i$ . El tercer conjunto de restricciones se conocen como las restricciones disyuntivas; estas plantean que algunas operaciones de diferentes trabajos deben ser procesados en una misma máquina, como se puede observar los trabajos  $j$  y  $l$  deben ser procesados ambos en la máquina  $i$ .

Al final se plantea la restricción de no negatividad.

Otra de las técnicas que plantea Pinedo y por medio de la cual se han obtenido resultados satisfactorios es “Active schedules” un algoritmo que incluye tres pasos fundamentales, en este modelo  $\Omega$  denota el conjunto de todas las operaciones de todos los predecesores que ya se han programado, visualizándose de la siguiente manera :

*Paso 1. (Condiciones iniciales)  $\Omega$  contiene las primeras operaciones de cada trabajo;  $r_{ij}$  que es el tiempo en el cual cada trabajo llega al sistema es igual a 0 (cero), para todo  $(i,j) \in \Omega$ .*

*Paso 2. (Selección de máquina) Calcula para la actual programación parcial*

$$t(\Omega) = \min_{(i,j) \in \Omega} \{r_{i,j} + P_{i,j}\}$$

*Como todos los trabajos tienen asignados un tiempo de llegada al sistema de cero,  $t(\Omega)$  representa el mínimo de la suma de los tiempos de llegada de cada uno de los trabajos al sistema más el tiempo de procesamiento de la operación  $(i,j)$*

*Se utiliza  $i^*$  para indicar las máquinas en las cuales el mínimo es alcanzado.*

*Paso 3. (Branching) Toma  $\Omega'$  como el conjunto de todas las operaciones  $(i^*, j)$  en la máquina  $i^*$  en la cual*

$$r_{i^*,j} < t(\Omega).$$

*Para cada operación en  $\Omega'$ , considera una extensión de la programación parcial con la operación siguiente en la máquina  $i^*$ . Para cada programación parcial extendida, se elimina la operación de  $\Omega$ , incluido su predecesor inmediato en  $\Omega$ , y retorna al paso 2.*

*Este procedimiento se repite hasta que todas las operaciones sean procesadas. Una vez verificado lo anterior se determina si todas las posibles selecciones fueron consideradas lo que conlleva a concluir que todos los "Active schedules" fueron generados.*

## 4. METODOLOGÍA

Este proyecto ha sido motivado por un problema de la vida real. La metodología consiste en desarrollar un algoritmo que permita resolver un problema de asignación y secuenciación de un número de trabajo  $n$  a ser procesados en un conjunto máquinas  $m$  en diferentes módulos de manufactura. La estrategia de solución consiste en dividir el problema en dos fases: asignación y secuenciación. El problema de asignación consiste en determinar la cantidad de lotes a producir en un conjunto de celdas de manufactura (cuarto limpio o módulo) de tal manera que se maximice la productividad sin exceder las limitaciones de capacidad de cada celda. El problema de secuenciación consiste en asignar el orden en que deben ser procesados los lotes en cada celda de tal manera que se reduzca el tiempo total de procesamiento. Este problema resulta interesante ya que toma en cuenta la secuencia tecnológica, evita la interferencia de máquinas en cada celda, toma en cuenta el tamaño de los lotes, el tamaño del producto y además toma en cuenta la disponibilidad de recursos para procesar los lotes. Primero se resolverá el problema de asignación y los resultados de este problema serán utilizados para resolver el problema de secuenciación.

### 4.1 Asignación de producción a las celdas de manufactura

La formulación matemática del problema de asignación se describe a continuación:

- **Función objetivo:** Maximizar el rendimiento tomando como base el porcentaje de productividad de un producto en un módulo en específico (celda de manufactura) y el número de lotes de cierto producto que se asigna a un módulo en una semana.

- **Restricciones:**

- Capacidad de producción de cada módulo: La capacidad está basada en el tiempo promedio de ciclo para producir un producto determinado en un módulo y las horas disponibles en los módulos para cada semana.
- Capacidad de demanda: las cantidades producidas en los módulos deben ser suficiente para suplir la demanda de la semana.
- Limitación de lotes por módulo: Hay que tomar en cuenta que el número de lotes que se asignen a cada módulo, ya que este no debe sobrepasar el máximo número de lotes de un determinado tamaño en un módulo en específico.
- Los lotes deben ser asignados a los módulos tomando en cuenta los tamaños de los productos. Hay que disminuir el cambio drástico de tamaño dentro de los trabajos asignados a un modulo en lo particular. Debido a que los cambios drásticos de tamaño afectan el tiempo de preparación de los módulos.

Los productos resultantes para ser manufacturados en cada módulo del algoritmo de asignación constituyen el inicio del algoritmo de secuenciación, en otras palabras, el resultado de la primera parte será la entrada de la segunda.

#### 4.2 Secuenciación

- **Función objetivo:** Determinar el orden en que cada lote debe ser procesado en cada uno de los módulos, de tal manera que el procesamiento de todos los lotes sea realizado en el menor tiempo posible. Además hay que disminuir el cambio drástico de tamaño dentro de los trabajos asignados a un módulo en lo particular.

- **Restricciones:**

- Secuencia Tecnológica: Se utilizará programación mixta para determinar la secuencia tecnológica o el orden en que deben ser usadas las máquinas por producto. Las variables binarias se utilizarán para activar o desactivar las

restricciones asociadas a una secuencia tecnológica. La lógica binaria se utilizará para definir la secuencia tecnológica (Ramírez - Beltrán, 2000).

- Secuencia de producto: Nuevamente se utilizará programación mixta para determinar el orden en que se deben procesar los productos de una máquina en lo particular, de tal manera que se evite la interferencia (Ramírez - Beltrán, 2000). El algoritmo seleccionará solamente una de las posibles secuencias de producción, por lo que se modelará con variables binarias, donde la suma total de ellas debe ser igual a 1, lo que ayudará a visualizar de manera clara al final de la corrida la secuencia que según el algoritmo es considerada la óptima.
- Status del tamaño de producto: Al iniciar cada corrida de producción se debe tener en cuenta el tamaño del último producto manufacturado, para programar la producción de la semana presente, si no existiese historial del último material manufacturado entonces se inicia la producción ignorando la restricción de tamaño. Los tamaños de producto será controlado mediante un peso que se asignará a las secuencias en la función objetivo de tal manera que garantice el cambio mínimo en tamaño de una corrida a la próxima. En las Figuras 3 y 4 se pueden apreciar los diagramas de flujo de la metodología utilizada para la realización de este proyecto.

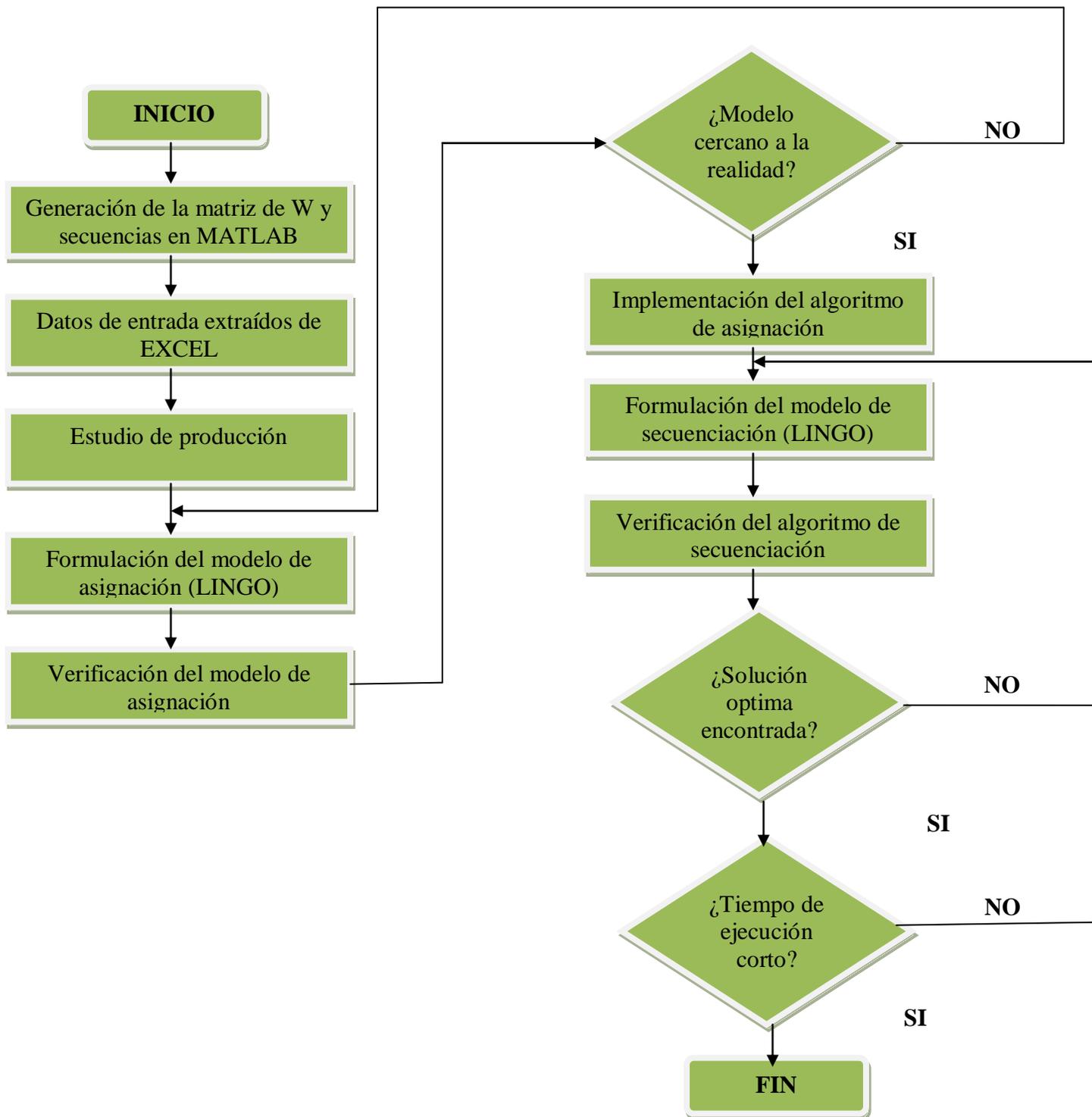


Figura 3. Diagrama de Flujo del proceso de formulación de los algoritmos de asignación y secuenciación.

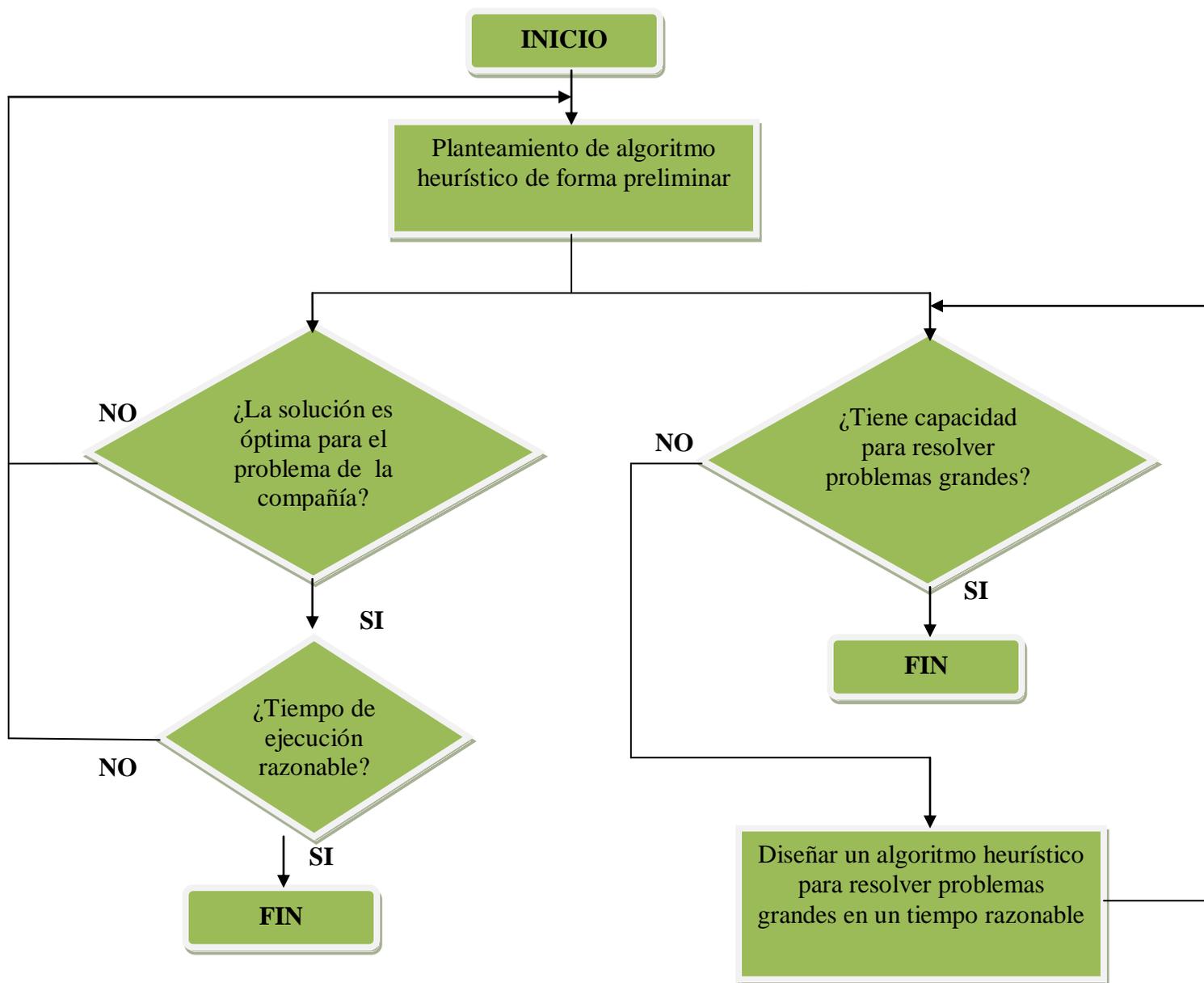


Figura 4. Diagrama de Flujo del proceso de formulación del algoritmo heurístico.

## 5. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La compañía tiene una política operacional de trabajar durante los tres turnos, y cada corrida de producción es realizada semanalmente. Cada uno de los módulos tiene diferentes capacidades, esto debido a que el sistema de operación de las máquinas es semiautomático, pues la calibración de las mismas se realiza manualmente. El sistema de producción aquí descrito les permite cumplir con la demanda semanal establecida. Una vez los lotes de producto son asignados a los diferentes módulos de manufactura se debe determinar entonces el orden en que van a ser corridos en las diferentes máquinas involucradas en el proceso, sin dejar de lado que todos los productos deben visitar todas las máquinas en un mismo orden y que además no debe interrumpirse el flujo de producción en ningún momento a lo largo de la línea y deben penalizarse los cambios bruscos que ocurran entre productos. Teniendo en cuenta cada una de las restricciones del proceso, se plantean las siguientes formulaciones.

### 5.1 Programa de Asignación

Definición de Variables:

$x_{ij}$ : Cantidad de producto  $i$  asignado al módulo  $j$

$Cap_j$ : Capacidad del módulo  $j$

$Dem_i$ : Demanda del producto  $i$

$Rend_{ij}$ : Productividad (yield) del producto  $i$  en el módulo  $j$

$A$ : Variable Binaria (0,1)

$$A = 1, \quad Dem_i > 1$$

$$A = 0, \quad Dem_i \leq 1$$

$M$ : Constante

$n$ : Número de lotes

$m$ : Número de módulos

✓ Función Objetivo:

$$Max Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Rend_{ij} * x_{ij}$$

✓ Restricciones:

1. Capacidad del módulo: el número total de lotes asignados al modulo j no debe exceder la capacidad del módulo.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq Cap_j \quad \text{para } j=1, \dots, m$$

2. Demanda: la cantidad de lotes a producirse en los diferentes módulos debe ser igual a la demanda.

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq Dem_i \quad \text{para } i=1, \dots, n$$

3. Asignación de cada producto en cada módulo: Si la demanda del lote i es mayor que 1, la cantidad de lotes que se asigna a ese modulo debe ser menor que la demanda menos 1. Esto asegura que productos del mismo tamaño sean asignados a dos módulos diferentes.

$$x_{ij} < Dem_i - 1 + [1 - A_i] * M \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ y } j = 1, \dots, m$$

$$A_i = 1, \quad Dem_i > 1$$

$$A_i = 0, \quad Dem_i \leq 1$$

## 5.2 Programa de Secuenciación

### Definición de variables:

$y_{ij}$ : Tiempo de inicio del producto  $i$  en la máquina  $j$

$t_{ij}$ : Tiempo de procesamiento del producto  $i$  en cada máquina  $j$

$d_k$ : Variable binaria,  $d_k$

= 1 si la secuencia  $k$  es seleccionada y cero en caso contrario

$S$  = Número total de secuencias =  $n!$

$n$  = Número total de productos

$m$  = Número total de máquinas

$w_k$  = Penalidad por cambio de tamaño al implementar la secuencia  $k$

$R$ : Constante

Los valores de  $\delta_{i,j}$  son las penalidades por cambio de tamaño del producto  $i$  al producto  $j$ . Costo de preparación de las máquinas (setup)

$J_k$  = es la secuencia de sub-índices de los productos incluidos en la secuencia  $k$ .

### Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n Y_{i,m} + \sum_{k=1}^S W_k d_k$$

$$W_k = \sum_{i,j \in J_k} \delta_{i,j}$$

Por ejemplo. Suponer que hay 4 productos: A, B, C, y D. La matriz de penalidades por cambio de tamaño sería así:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{1,1} & \delta_{1,2} & \delta_{1,3} & \delta_{1,4} \\ \delta_{2,1} & \delta_{2,2} & \delta_{2,3} & \delta_{2,4} \\ \delta_{3,1} & \delta_{3,2} & \delta_{3,3} & \delta_{3,4} \\ \delta_{4,1} & \delta_{4,2} & \delta_{4,3} & \delta_{4,4} \end{bmatrix}$$

Por ejemplo: suponer que  $k=1$ , y la secuencia es: ABCD. Así la secuencia de sub-índices es:  $J_1=\{(1,2), (2,3), (3,4)\}$ . Note que los números representan el orden dado por las letras.  $A=1, B=2$ , etc.

$$W_1 = \delta_{1,2} + \delta_{2,3} + \delta_{3,4}$$

Suponer que  $k=2$ , y además suponer que la secuencia es: BCAD. Así la secuencia de sub-índices es:  $J_2=\{(2,3), (3,1), (1,4)\}$ .

$$W_2 = \delta_{2,3} + \delta_{3,1} + \delta_{1,4}$$

✓ Restricciones:

5.2.1. Secuencia Tecnológica

$$Y_{i1} + T_{i1} \leq Y_{i2} \quad \text{Para } i = 1, \dots, n$$

$$Y_{i2} + T_{i2} \leq Y_{i3} \quad \text{Para } i = 1, \dots, n$$

$$\begin{array}{ccc} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$Y_{i(m-1)} + T_{i(m-1)} \leq Y_{im} \quad \text{Para } i = 1, \dots, n$$

5.2.2. Activación de Secuencias: (para simplificar notación suponer que  $n=3, S=6$ )

Secuencia 1:  $k=1, i=1,2,3$

$$Y_{1j} + T_{1j} \leq Y_{2j} + (1 - d_1)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

$$Y_{2j} + T_{2j} \leq Y_{3j} + (1 - d_1)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

Segunda secuencia:  $k=2, i=1,3,2$

$$Y_{1j} + T_{1j} \leq Y_{3j} + (1 - d_2)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

$$Y_{3j} + T_{3j} \leq Y_{2j} + (1 - d_2)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

⋮

Última secuencia:  $k=6, i=3,2,1$

$$Y_{3j} + T_{3j} \leq Y_{2j} + (1 - d_6)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

$$Y_{2j} + T_{2j} \leq Y_{1j} + (1 - d_6)R \quad \text{Para } j = 1, \dots, m$$

## 5.2.3. Variables Binarias:

$$d_1 + d_2 + \dots + d_s = 1$$

## 5.2.4 Restricción de no negatividad:

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \text{Para } i = 1, \dots, n$$

$$\text{Para } j = 1, \dots, m$$

## 6. FASES DE DESARROLLO DEL PROYECTO

Para la realización del presente proyecto de investigación se llevaron a cabo las siguientes fases:

- Fase 1: Estudio de la Producción:

Esta fase consiste en la recopilación de datos históricos de la producción que la compañía ha presentado de cada uno de los productos durante aproximadamente 26 semanas. Los datos de producción de algunas de las semanas estudiadas se muestran en el Apéndice A. Este apéndice también ilustra la forma real en que fueron asignados cada uno de los productos a cada uno de los módulos. El estudio de producción ayuda a visualizar de manera resumida, la cantidad de cada tipo de producto que es manufacturado, dividido según cada semana del año en estudio. Esta recopilación se convierte en los datos de entrada del algoritmo de asignación.

Es importante resaltar que en cuanto a producción se refiere los implantes no son manufacturados para mantener en almacenamiento, sino que son producidos guiados por órdenes de pedidos sometidas por los diferentes clientes de la compañía. Cada lote de producción se compone de 600 implantes, y la producción se corre semanalmente. Una vez los lotes empiezan a producirse no pueden interrumpir el proceso hasta terminarlo completamente, debido a que puede sufrir algún tipo de alteración en su composición el medicamento que es aplicada durante el proceso en el producto.

- Fase 2: Algoritmo de Asignación:

En el presente proyecto de investigación, una vez los datos de la demanda estén claramente agrupados, el algoritmo procesa los datos de la cantidad de material solicitado; este permitirá asignar a cada módulo la cantidad de producto que maximice la función objetivo planteada.

El resultado del estudio de la demanda semanal permite obtener los lotes totales que se fabricarán en una semana en específica, señalando el módulo en que los mismos son fabricados y las cantidades totales resultantes de la corrida de producción.

Las tablas de datos y resultados de los diferentes estudios de demanda pueden visualizarse ampliamente en el *Apéndice B*.

Fase 3: Algoritmo de Secuenciación:

Los datos resultantes del algoritmo de asignación se convierten en los datos de entrada del algoritmo de secuenciación. Una vez cada producto es asignado a cada módulo específico en el área de producción, éste determina la secuencia en que un conjunto de productos deben ser procesados teniendo en cuenta las siguientes restricciones:

- El tamaño de los productos
- Una máquina sólo puede procesar un lote de un producto a la vez.
- Todos los lotes deben ser procesados en el mismo orden en todas las máquinas de un módulo en particular.
- Sólo una secuencia de todas las posibles puede activarse.
- La elección de la secuencia óptima va a ser modelada por medio de variables binarias.
- Todas las variables deben cumplir la restricción de no negatividad.

### 6.1 Estrategia computacional

Matlab es usado para generar las todas las secuencias posibles y las penalidades asociadas a los cambios de tamaño (setup costs). EXCEL es usado para entrar los tiempos de procesamiento y para obtener la respuesta en un formato que sea fácil de interpretarse. LINGO se usa para formular y resolver el problema. La ejecución del optimizador se logra mediante la interface con EXCEL. La Figura 5 muestra la interacción de los programas utilizados en este proyecto.

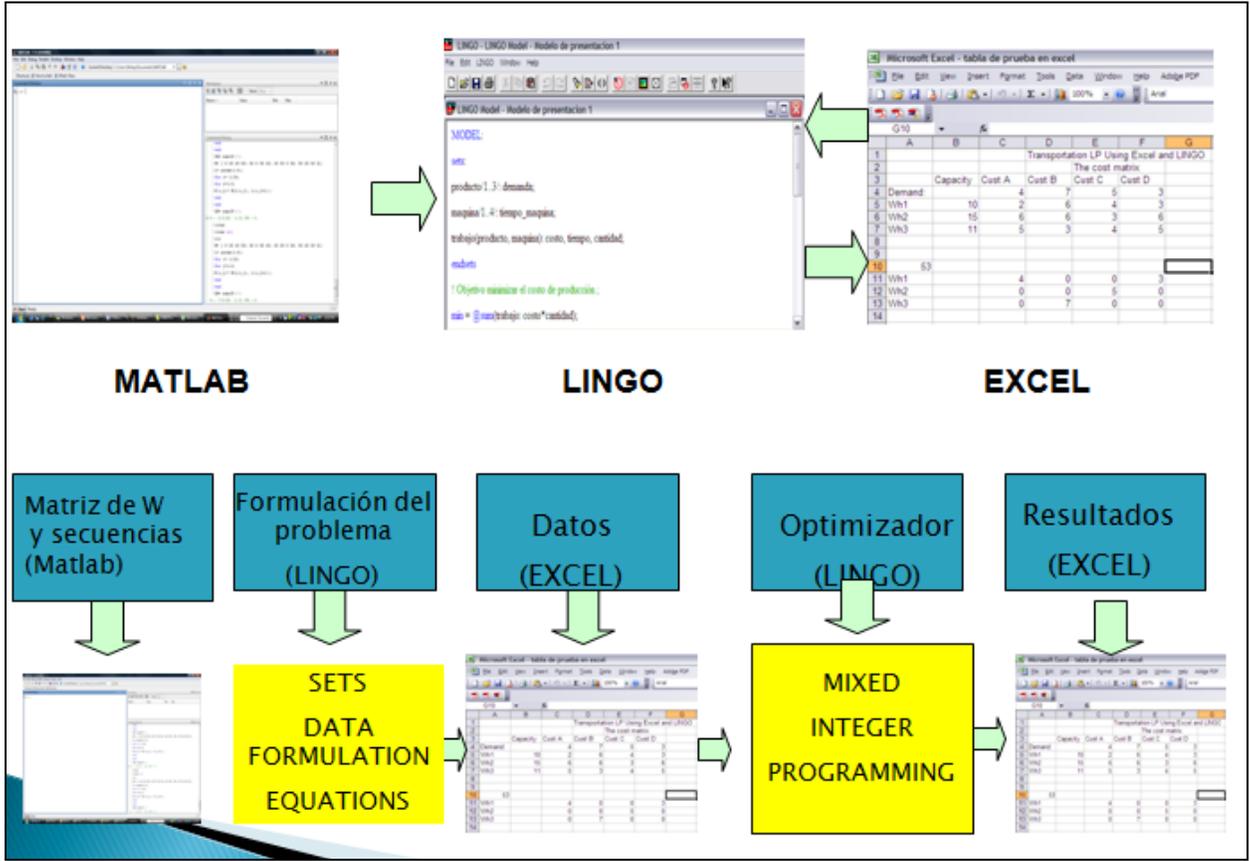


Figura 5. Gráfica de estrategia computacional

- El algoritmo de secuenciación determina la secuencia óptima a ser corrida en la línea de producción, tomando como base los tiempos de procesamiento de un conjunto de productos que serán procesados en un grupo de máquinas.

- El algoritmo de secuenciación considera dentro de la función objetivo un peso que es asignado a cada una de las secuencias estudiadas, el cual es estimado basándose en el tiempo de calibración, el cual es aproximadamente un 10% del tiempo total de manufactura, determinado según la experiencia de las personas encargadas de la línea de producción.
- EXCEL hace la función de intérprete. El software nos permitirá extraer de LINGO los resultados proporcionados al final de la corrida, para ser interpretados de una manera más sencilla, representado en gráficas, tablas, y hojas de trabajo que cualquier persona en la empresa puede interpretar aun sin tener conocimiento alguno en programación u optimización.

El tiempo computacional aumenta exponencialmente cuando el número de productos aumenta por lo tanto, se requiere la formulación de un algoritmo heurístico que resulte en una solución cercana a la óptima, y que ayude a disminuir el tiempo computacional . Para comprobar si el algoritmo propuesto es factible, se realiza una comparación con algoritmos planteados anteriormente por un grupo de autores, quienes proponen diferentes métodos de solución a problemas similares a los que se trabaja en este proyecto. En la sección 8.1 se presenta un resumen de los métodos heurísticos planteados para la solución del problema.

## **6.2 Ejercicios de Prueba para Comparar los Algoritmos.**

Cada una de las Tablas de la 1 a la 10 contiene los datos que se utilizaron para realizar las diferentes corridas de los modelos heurísticos propuestos. Los tiempos de procesamiento que aquí se señalan fueron generados mediante la técnica de simulación Monte Carlo utilizando una distribución uniforme con valores que fluctuaban entre 10 a 200 unidades de tiempo, para lograr un tiempo de variación amplio.

Los datos históricos recopilados en la compañía, presentaban una variación mínima entre ellos, por lo que no se justificaba modelar los datos de experimentación basándose en estos. Además se quiere probar el funcionamiento

del algoritmo de secuencia parcial sometiendo el programa a grandes variaciones de tiempos de procesamiento entre un cambio de un producto a otro. Esto permitirá verificar el funcionamiento de la herramienta de manera efectiva, y ayudara a obtener resultados confiables en comparación a la solución óptima al correr todas las posibles secuencias que se pueden estudiar.

**Tabla 1. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 1**

		<b>Productos</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Máquinas</b>	<b>1</b>	112	87	175	12	83
	<b>2</b>	21	140	85	88	181
	<b>3</b>	132	164	130	10	112
	<b>4</b>	101	136	44	19	59

**Tabla 2. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 2**

		<b>Productos</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Máquinas</b>	<b>1</b>	57	107	165	188	13
	<b>2</b>	174	123	54	200	125
	<b>3</b>	56	11	169	136	69
	<b>4</b>	189	71	132	53	50

**Tabla 3 Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 3**

		<b>Productos</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>Máquinas</b>	<b>1</b>	26	178	105	189	83
	<b>2</b>	197	177	68	86	47
	<b>3</b>	114	65	71	106	64
	<b>4</b>	59	51	174	129	116

**Tabla 4. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 4**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<b>1</b>	37	84	22	40	125
	<b>2</b>	57	169	39	115	15
	<b>3</b>	161	183	173	67	137
	<b>4</b>	91	31	135	56	192

**Tabla 5. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 5**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<b>1</b>	126	85	138	118	51
	<b>2</b>	41	70	64	80	126
	<b>3</b>	44	90	57	142	84
	<b>4</b>	200	66	50	12	138

**Tabla 6. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 6**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<b>1</b>	12	90	165	38	193
	<b>2</b>	31	68	50	167	105
	<b>3</b>	52	75	11	61	150
	<b>4</b>	155	198	119	63	140

**Tabla 7. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 7**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<b>1</b>	16	183	103	13	22
	<b>2</b>	159	124	109	89	17
	<b>3</b>	85	121	181	131	21
	<b>4</b>	96	123	73	139	23

**Tabla 8. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 8**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<i>1</i>	104	149	146	185	172
	<i>2</i>	188	121	77	173	41
	<i>3</i>	45	18	71	183	91
	<i>4</i>	196	123	20	168	90

**Tabla 9. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 9**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<i>1</i>	32	91	131	102	112
	<i>2</i>	178	53	112	185	138
	<i>3</i>	133	68	73	156	14
	<i>4</i>	64	27	41	70	83

**Tabla 10. Tiempos de procesamiento en horas/lote corrida 10**

		<i>Productos</i>				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Máquinas</i>	<i>1</i>	94	97	75	83	26
	<i>2</i>	145	106	13	197	158
	<i>3</i>	99	192	49	33	10
	<i>4</i>	172	29	87	161	192

### **6.3 Algoritmos Heurísticos estudiados.**

Se estudiaron cinco métodos heurísticos para el desarrollo del problema, uno de ellos es el propuesto en este trabajo denominado como el algoritmo de secuencia parcial, dos de ellos triviales, de ordenamiento ascendente y descendente de los productos según los tiempos de procesamiento. Los algoritmos triviales son apoyados en la aplicación de los conceptos de secuenciación del tiempo de procesamiento más corto y más largo. El algoritmo propuesto se compara con dos algoritmos reconocidos en la literatura y dos algoritmos triviales, los cuales han sido aplicados con éxito a problemas de secuenciación (Gupta 1971; y Palmer 1965).

### **.6.3.1 Algoritmo de Desarrollo de Secuencia Parcial.**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el tiempo computacional se ve afectado a medida que el conjunto de productos aumenta, por lo que es necesario el planteamiento de un algoritmo heurístico que ayude a determinar una solución rápida y cercana a la solución óptima.

El algoritmo que se propone en este proyecto le llamamos el *algoritmo de secuencia parcial*, el cual consiste en la eliminación de uno de los productos, permitiendo correr el algoritmo original sólo con  $n-1$  productos, donde  $n$  es el número total de productos. Una vez que cada una de las posibles secuencias son estudiadas, teniendo en cuenta que el algoritmo sólo va a analizar  $n-1$  productos, se seleccionan las cinco secuencias que tengan el menor tiempo de procesamiento. El número cinco fue obtenido a base de prueba y error.

A estas cinco mejores secuencias posteriormente se le añade el producto que fue eliminado inicialmente, lo que reduce de manera sustancial el número de posibles secuencias a ser estudiadas por el algoritmo, ayudando esto a minimizar el tiempo computacional y logrando obtener una solución cercana a la óptima. Para ilustrar el desempeño de los algoritmos se diseña un problema de secuenciación que contiene 5 productos y 3 máquinas. En un arreglo de 5 productos que van a ser procesados en 3 máquinas, el algoritmo tendría que

estudiar 120 posibles secuencias, lo cual produce un tiempo computacional de aproximadamente 13 minutos, en una laptop HP Pavilion dv6700 Notebook PC, con un procesador Turion 64 X2 2.00 Ghz y 3.0 GB de memoria RAM.

Al aplicar el algoritmo de secuencia parcial, la corrida inicial estaría representada por 5 productos, de los cuales debe eliminarse uno de ellos, el que contenga el mayor tiempo de procesamiento, para correr el algoritmo con  $n-1$  productos. La corrida computacional se llevaría a cabo sólo con 24 secuencias y no 120. De estas 24 secuencias estudiadas, con 4 productos, se deben de escoger 5 secuencias, siendo aquellas las que presenten los menores tiempos de proceso. A las 5 secuencias escogidas se le agrega entonces el producto que fue eliminado preliminarmente, resultando así una disminución de 120 posibles secuencias a sólo 25. La comparación del algoritmo heurístico propuesto con los existentes se realiza en la sección 7.2.

### ***6.3.2 Comparación del algoritmo de secuencia parcial con el algoritmo de ordenamiento ascendente.***

En este proyecto se define como algoritmos triviales: el algoritmo de ordenamiento ascendente y el algoritmo de ordenamiento descendente.

El algoritmo de ordenamiento ascendente consiste en la ordenación ascendente de los tiempos de procesamiento de cada producto en cada máquina. Para realizar la selección de los trabajos que van a ocupar cada posición dentro de la secuencia, se realiza un estudio de los tiempos totales de procesamiento de todos los productos en todas las máquinas. Una vez algún producto es seleccionado para ocupar una posición específica, se realiza el mismo análisis con los productos restantes hasta lograr ubicar todos los productos dentro de la secuencia de producción. Para ilustrar la aplicación de este algoritmo trivial se utiliza el siguiente ejemplo, el cual incluye 6 productos a ser procesados en 4 máquinas. Los tiempos de procesamiento en minutos se muestran en la Tabla 11:

**Tabla 11. Tiempos de procesamiento de 6 productos en 4 máquinas.**

		<i>Productos</i>					
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<i>Máquinas</i>	<b>1</b>	100	225	227	156	96	125
	<b>2</b>	76	356	200	198	200	186
	<b>3</b>	221	228	300	297	342	235
	<b>4</b>	125	125	267	102	300	100
	<b>Total</b>	<b>522</b>	<b>934</b>	<b>994</b>	<b>753</b>	<b>938</b>	<b>646</b>

Al realizar el análisis de los tiempos de procesamiento de cada uno de los trabajos que serán procesados en cada una de las máquinas, se puede visualizar que la secuencia a estudiar según este método, sería la de procesar los trabajos en el siguiente orden: *AEFDCB*, teniendo en cuenta que el trabajo A posee el tiempo de procesamiento más bajo (76 min), siguiéndole E (96 min) y así sucesivamente hasta completarse toda la secuencia.

La formulación de este algoritmo se basa en el concepto de “*Tiempo de procesamiento más corto*” o “*Shortest process time*” como se conoce en inglés, donde se ordenan de forma creciente cada uno de los trabajos que van a ser procesados en la línea de manufactura. Este concepto establece la minimización del tiempo total de flujo en la línea, el número de trabajos existentes en el sistema, el tiempo de espera antes de cada máquina y las tardanzas que se pueden producir en el proceso.

### **6.3.3 Comparación del algoritmo de secuencia parcial con el Algoritmo de Ordenamiento Descendente.**

Este algoritmo contempla la formulación de la secuencia a estudiar, de manera contrario al planteado anteriormente. Es decir, en este, los trabajos van a ser ordenados en orden descendente según el tiempo de procesamiento de cada uno de ellos de manera general.

El algoritmo del “*tiempo de procesamiento descendente*” o “Longest processing time” como se conoce en inglés plantea el ordenamiento decreciente de los tiempos de procesamiento, contemplando de esta manera que el primer trabajo a ser procesado es aquel que posee el tiempo de procesamiento más grande.

En la Tabla 12 se presenta de manera resumida cada uno de los valores de la función objetivo, medida como el tiempo de procesamiento total de los productos en los módulos.

En cada una de las columnas se registran los datos resultantes al aplicar cada uno de los métodos.

**Tabla 12. Resultados obtenidos con cada uno de los métodos heurísticos estudiados.**

<b>Corrida</b>	<b>Método exhaustivo (solución óptima) (tiempo total de manufactura) Hrs</b>	<b>Algoritmo de Secuencia parcial (tiempo total de manufactura) Hrs</b>	<b>Secuencia seleccionada por método exhaustivo y por el de secuencia parcial</b>	<b>Algoritmo de secuencia Ascendente (Tiempo total de manufactura) Hrs</b>	<b>Secuencia seleccionada con el algoritmo de secuencia Ascendente</b>	<b>Algoritmo de secuencia Descendente (Tiempo total de manufactura) Hrs</b>	<b>Secuencia seleccionada con el algoritmo de secuencia Descendente</b>
1	2567	2567	DABCE	2747	DACEB	3515	ECBAD
2	2766	2766	EBACD	3458	BEDCA	4177	DACEB
3	2835	2835	ECABD	2957	AEB CD	3267	ADBCE
4	2695	2695	CDEBA	3308	ECBAD	3743	EBCAD
5	2494	2494	EDCBA	3058	DACEB	2903	ADECB
6	2207	2207	ADCBE	2695	CADBE	3300	BEDCA
7	2145	2145	EDCAB	2650	DAECB	3770	BCADE
8	3488	3488	ACBED	3569	BCEAD	4016	ADEBC
9	2829	2829	ABCED	3120	EBACD	3667	DAECB
10	2606	2606	ECABD	2615	ECBDA	3615	DEBAC

Los resultados de los heurísticos estudiados pueden ser ampliamente visualizados en las Figuras 6 hasta la 10, en las cuales se representan cada una de las corridas, realizadas con los diferentes métodos, y la *Figura 11* muestra la comparación entre los métodos.

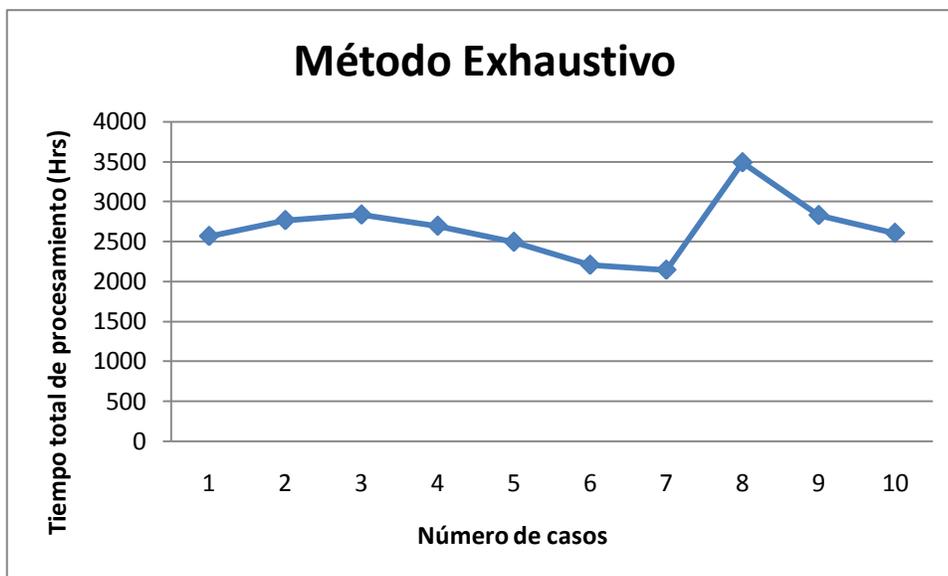


Figura 6. Resultados de corridas con el método exhaustivo (solución óptima)

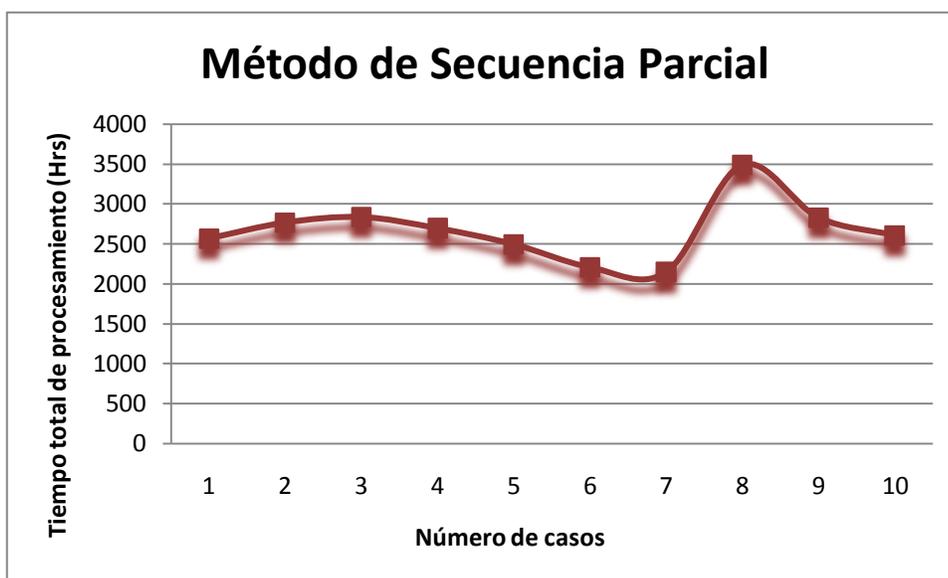


Figura 7. Resultados de corridas con el método de Secuencia Parcial.

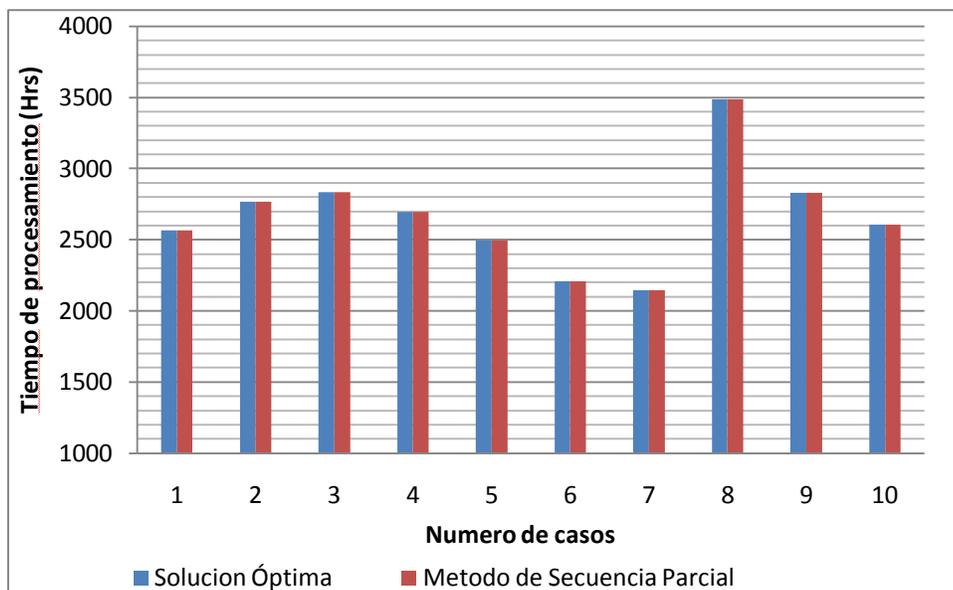


Figura 8. *Secuencia parcial vs. Solución óptima*

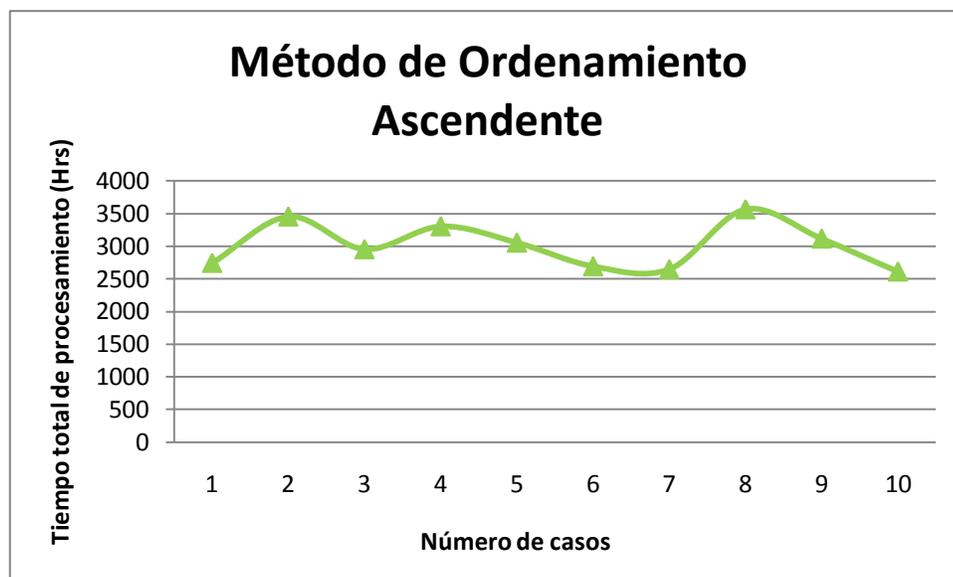


Figura 9. *Resultados de corridas con el Método de ordenamiento Ascendente.*

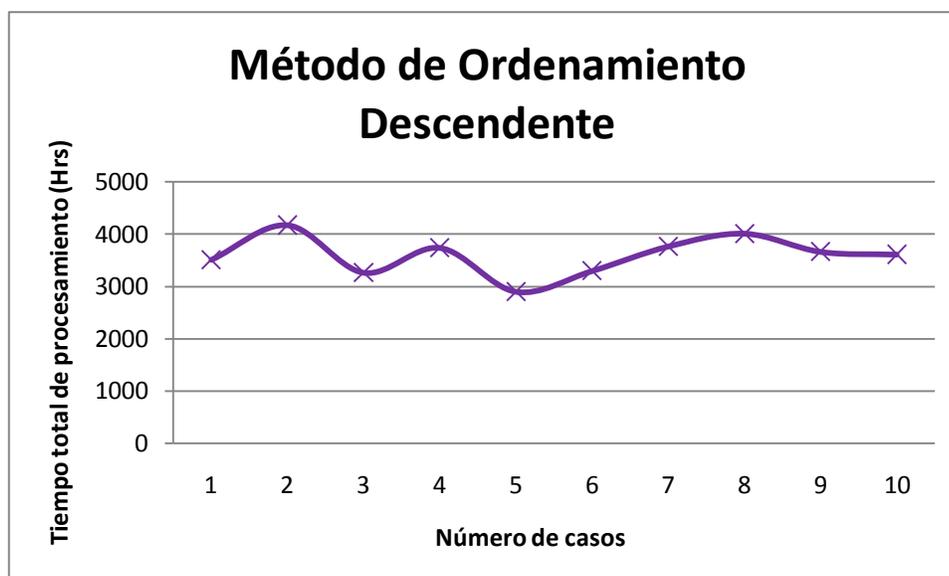


Figura 10. Resultados de corridas con el Método de ordenamiento descendente.

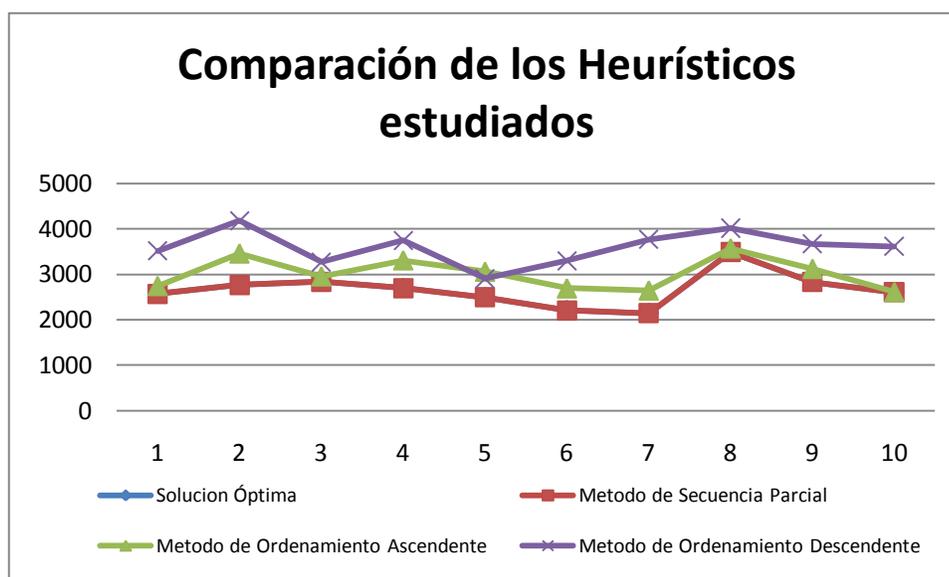


Figura 11. Comparación de los resultados obtenidos en cada una de las corridas por los diferentes métodos heurísticos estudiados.

Es fácil notar que en las 10 corridas de pruebas que se realizaron el algoritmo de secuenciación parcial coincidió con la óptima, permitiendo esto llegar a la toma de decisiones confiadamente,. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede notar

que el método de secuencial parcial coincide con la solución óptima pero está restringido a que el número de productos sea menor a 7, por la limitación de tiempo computacional. Si el número de artículos es mayor que 6 se puede utilizar el método de secuencia ascendente, aunque las restricciones establecidas en relación a este método solo aplican cuando se maneja un solo grupo de máquinas.

Se puede observar que los resultados obtenidos en la función objetivo de cada caso (*Tabla 12*), que el ahorro en tiempo de procesamiento total es significativo, permitiendo que este tiempo sobrante que puede ser usado en la producción de nuevos productos o en la disminución de tiempo extra, el cual resulta ser muy costoso para la compañía.

#### **6.3.4 Análisis adicional**

Se quiso comprobar cómo difieren los resultados obtenidos al desarrollar un ejercicio adicional con el método del tiempo de procesamiento más corto. Considerando el orden a establecerse en la secuencia de producción determinado por el tiempo total de procesamiento de cada producto en todas las máquinas. Es decir, la secuencia la determinará el tiempo total de procesamiento de los productos no analizados de manera independiente en cada máquina, sino considerando el arreglo como una sola máquina.

Luego de realizar las diez corridas de prueba los resultados se depositaron en la *Tabla 13* y la *Figura 12* muestra en forma gráfica las diferencias existentes entre un método y otro.

Tabla 13. Datos considerando tiempos de procesamiento más corto total

Corrida	Método exhaustivo (solución óptima) (tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada por método exhaustivo y por el de secuencia parcial	Algoritmo de secuencia Ascendente (Tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada con el algoritmo de secuencia Ascendente	Método del tiempo de procesamiento más corto total	Secuencia seleccionada con el método del tiempo de procesamiento más corto total
1	2567	DABCE	2747	DACEB	2747	DACEB
2	2766	EBACD	3458	BEDCA	2786	EBACD
3	2835	ECABD	2957	AEB CD	2896	EACBD
4	2695	CDEBA	3308	ECBAD	3066	DACBE
5	2494	EDCBA	3058	DACEB	2917	CBDEA
6	2207	ADCBE	2695	CADBE	2207	ADCBE
7	2145	EDCAB	2650	DAECB	2390	EADCB
8	3488	ACBED	3569	BCEAD	3593	CEBAD
9	2829	ABCED	3120	EBACD	3129	BECAD
10	2606	ECABD	2615	ECBDA	2664	CEBDA

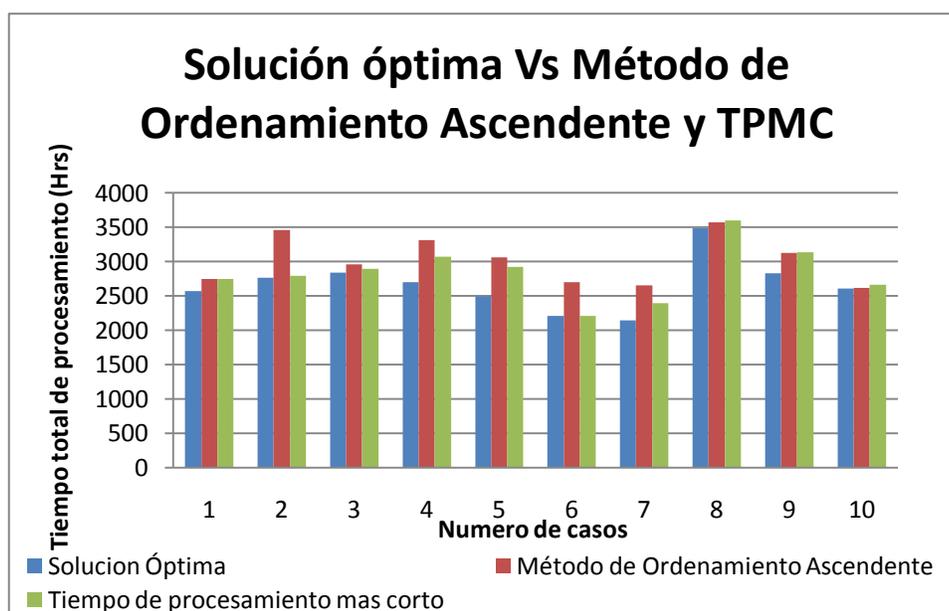


Figura 12. Solución óptima vs. Método de Ordenamiento Ascendente y TPMC

Luego de realizar el análisis para determinar si el hecho de considerar el ordenamiento de los productos teniendo en cuenta los tiempos de procesamiento individuales variaba en gran manera al ordenarlos considerando la sumatoria de los tiempos de procesamiento de cada producto en todas las máquinas. Se puede notar que las diferencias en el tiempo total de producción no son muy marcadas. En algunas de las corridas resultaron obtenerse por el primer método trivial (Método de ordenamiento Ascendente) mejores resultados mientras que en otras corridas resultó lo contrario. Existe un 40% de los casos que con el primer método obtuvo soluciones más cercanas a la óptima versus en un 60% de los casos el segundo método analizado resultó con soluciones más cercana de la óptima. Se puede notar que el método de procesamiento más corto tuvo un mejor desempeño. Aunque sería deseable realizar un estudio con un tamaño de muestra mayor para poder emitir una conclusión más certera.

#### **6.4 Comparación con algoritmos Heurísticos existentes en la literatura**

Taillard (1989) realizó un análisis investigativo tratando de determinar aquellos algoritmos heurísticos aplicados a la secuenciación de la producción con los cuales se lograba obtener una mejor solución en problemas. Los datos de experimentación fueron generados de manera aleatoria siguiendo una distribución uniforme con valores enteros entre 1 a 100.

Mediante la comparación de los mejores métodos heurísticos conocidos en la literatura, obtuvo lo que se presenta en la *Tabla 14*.

**Tabla 14. Comparación de Heurísticos clásicos (Taillard 1989).**

	Complexity	Quality					
Problems	-	500(*)	100	100	100	50	50
Jobs	n	9	10	20	20	40	50
Machines	m	10	10	10	20	10	10
Gupta	$n \log(n) + nm$	13.4	12.8	19.6	18.8	18.9	17.1
Johnson	$n \log(n) + nm$	10.9	11.8	16.7	16.8	17.3	16.3
RA	$n \log(n) + nm$	8.5	9.1	12.5	13.4	13.5	11.2
Palmer	$n \log(n) + nm$	8.3	9.0	13.3	12.5	10.9	10.7
CDS	$nm^2 + mn \log(n)$	4.5	5.2	9.7	8.6	9.9	9.3
NEH	$n^2m$	2.1	2.2	3.9	3.8	2.6	2.1

En la tabla se visualizan cada uno de los métodos heurísticos estudiados por el autor, representando la calidad de los algoritmos como un porcentaje superior al promedio del tiempo total de procesamiento después de haber realizado 1000 iteraciones. En la segunda columna de la Tabla 14 se visualiza la complejidad computacional que tiene cada uno de los heurísticos analizados, permitiendo de esta manera observar que los algoritmos de Gupta, Johnson, RA y Palmer presentan complejidad semejante.

Si el problema planteado en este proyecto se trabajara solo con una máquina, podría ser fácilmente modelado mediante la adaptación del algoritmo del agente viajero; donde el número de ciudades estaría representado por los trabajos a manufacturarse en la corrida de producción. Si el número de maquinarias fueran dos, entonces el algoritmo de Johnson sería aplicado con éxito, pero cuando el número de trabajos y maquinaria aumenta en el proceso, los algoritmos tradicionales no pueden determinar la solución óptima en un tiempo computacional razonable, por lo cual resulta necesaria la aplicación de un método heurístico.

Basándose en lo anterior y en el análisis en diferentes artículos publicados en revistas de reconocimiento investigativo se escogieron los algoritmos de Gupta y Palmer para comparar el algoritmo de secuencia parcial propuesto en este proyecto. No se escogió el algoritmo de Johnson por la limitación que tiene al trabajar con sólo 2 máquinas, y aunque en el trabajo investigativo analizado se experimentó con más de dos máquinas este presenta una extensión cuya programación resulta altamente compleja. Por su parte el heurístico RA no fue seleccionado porque la calidad resultante difiere de Palmer en solo 0.2%, lo que no justifica la implementación de programación altamente compleja considerando que este algoritmo hace parte de un estudio preliminar.

### **6.3.1 Algoritmo de Gupta**

En su trabajo investigativo Gupta (1971) planteó un algoritmo heurístico para ayudar a resolver un arreglo de un grupo de productos que son procesados en más de una máquina, lo que se conoce en inglés como un “Scheduling jobs in flexible flow shops”.

El algoritmo de *Gupta* contempla un arreglo de un conjunto de productos con un grupo de máquinas mayor a 2 unidades. Arrojando como resultado final una programación con una complejidad mínima.

Los pasos planteados por *Gupta*, para la solución del problema se describen a continuación:

- Paso 1: Formar grupos de máquinas en pares, de tal manera que cada par ordenado pueda ser manejado como un problema de flujo de trabajo simple.
- Paso 2: Asignación de los grupos de trabajo a los pares de máquinas, seleccionando un orden descendente según el tiempo de procesamiento de cada uno de los productos. Si existe el caso en que 2 productos tengan un mismo tiempo de procesamiento, se selecciona uno de manera arbitrariamente.

Se debe encontrar el arreglo que tenga el menor tiempo de flujo, para lograrlo se debe calcular un índice de ordenamiento de la siguiente manera:

$$SI_i = \frac{e_i}{\min_{1 \leq k \leq m-1} \{t_{i,k} + t_{i,k+1}\}}$$

Donde:  $e_i = 1$  si  $T_{ik} < T_{im}$

$-1$  si  $T_{ik} \geq T_{im}$

Despues los trabajos se deben ordenar  $SI_{[1]} \geq SI_{[2]} \geq \dots SI_{[n]}$

Tomando en cuenta los tiempos de procesamiento de la *Tabla 1* a la *Tabla 10*, se realizaron las siguientes corridas que ayudarán a determinar la secuencia que según el método de Gupta se debe implementar en la producción. El cálculo se ilustra con una corrida y los cálculos asociados a las otras corridas se muestran en el *Apéndice F*.

*Corrida 1:*

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{112 + 21, 21 + 132, 132 + 101\}} = -\frac{1}{133} = -0.0075$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{87 + 140, 140 + 164, 164 + 136\}} = \frac{1}{227} = 0.0044$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{175 + 85, 85 + 130, 130 + 44\}} = \frac{-1}{174} = -0.0557$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{12 + 88, 88 + 10, 10 + 19\}} = \frac{1}{29} = 0.0344$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{83 + 181, 181 + 112, 112 + 59\}} = \frac{-1}{171} = -0.0058$$

$$0.0344 > 0.0044 > -0.0057 > -0.0058 > -0.0075$$

$$SI_4 > SI_2 > SI_3 > SI_5 > SI_1$$

Los resultados obtenidos en cada una de las corridas se resumen en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Resultados obtenidos en comparación con el Algoritmo de Gupta.

Número de casos	Algoritmo de secuencia parcial (Tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada con el algoritmo de secuencia parcial	Algoritmo de Gupta (Tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada con el algoritmo de Gupta	Diferencia entre el algoritmo de secuencia parcial y Gupta (Tiempo de manufactura) Hrs
1	2567	DABCE	2780	DBCEA	213
2	2766	EBACD	2993	EACDB	227
3	2835	ECABD	2854	ECADB	19
4	2695	CDEBA	2795	CADEB	100
5	2494	EDCBA	2786	AEBDC	292
6	2207	ADCBE	2349	ADBEC	142
7	2145	EDCAB	2202	EDABC	57
8	3488	ACBED	4069	ADBEC	581
9	2829	ABCED	3239	ADCEB	410
10	2606	ECABD	2744	CEDAB	138

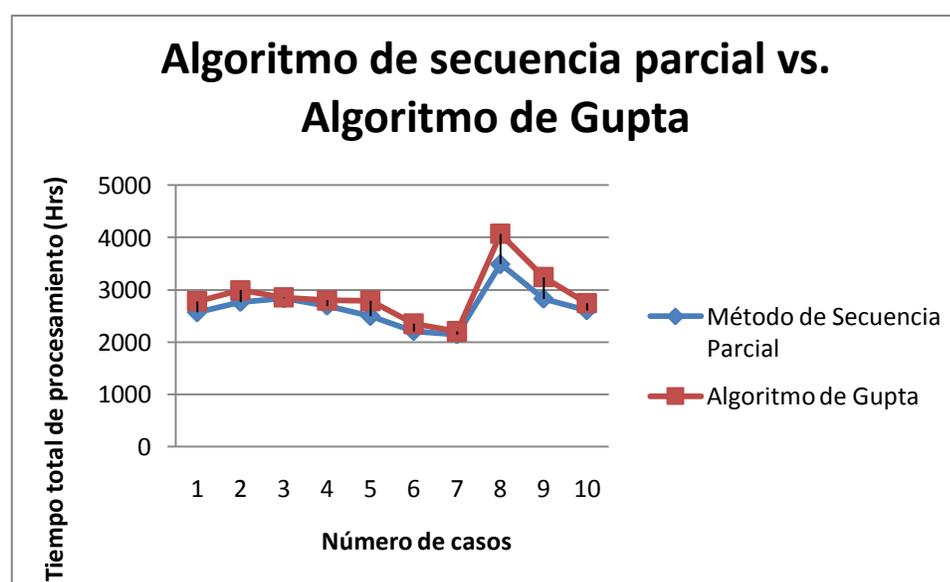


Figura 13. Comparación del algoritmo de Secuencias Parciales vs. Algoritmo de Gupta

### 6.3.2 Algoritmo de Palmer

Al igual que el algoritmo de Gupta, Palmer plantea en su modelo heurístico, el cálculo de un índice de pendiente o “slope index” por su nombre en inglés que ayude a determinar la secuencia de producción que debe correrse en la línea.

La secuencia se construye al ordenar descendientemente cada uno de los índices de pendiente obtenidos. Mientras muchos otros autores planteaban diferentes formas de implementar este método, Palmer propuso un índice de ordenamiento para cada trabajo  $i$ , tal como sigue:

$$SI_i = - \sum_{j=1}^m [m - (2j - 1)] t_{ij} / 2$$

Donde  $t_{ij}$ : Es el tiempo de procesamiento del trabajo  $i$  en la máquina  $j$

$m$ : Número de máquinas

Posteriormente la secuencia se determina mediante el ordenamiento de los índices tal cual sigue:

$$SI_{[1]} \geq SI_{[2]} \geq \dots \geq SI_{[n]}$$

El cálculo se ilustra con datos de una corrida y resultados de las corridas restantes se muestran en el *Apéndice G*.

*Corrida 1:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 112/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 21/2] + \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 132/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 101/2] = 39$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 87/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 140/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 164/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 136/2] = 85.5$$

$$SI_3 = -[4 - (2 * 1 - 1)] * 175/2 + [4 - (2 * 2 - 1)] * 85/2 \\ + [4 - (2 * 3 - 1)] * 130/2 + [4 - (2 * 4 - 1)] * 44/2 = -174$$

$$SI_4 = -[4 - (2 * 1 - 1)] * 12/2 + [4 - (2 * 2 - 1)] * 88/2 \\ + [4 - (2 * 3 - 1)] * 10/2 + [4 - (2 * 4 - 1)] * 19/2 = -28.5$$

$$SI_5 = -[4 - (2 * 1 - 1)] * 83/2 + [4 - (2 * 2 - 1)] * 181/2 \\ + [4 - (2 * 3 - 1)] * 112/2 + [4 - (2 * 4 - 1)] * 59/2 = -70.5$$

$$SI_2 \geq SI_1 \geq SI_4 \geq SI_5 \geq SI_3$$

Los resultados se presentan de manera resumida en la *Tabla 16*, donde se puede visualizar los valores de las funciones objetivos resultantes al evaluar ambos algoritmos, las secuencias seleccionadas al correr los algoritmos y la diferencia expresada en unidades de tiempo.

Tabla 16. Resultados obtenidos en comparación con el Algoritmo de Palmer

Número de casos	Algoritmo de secuencia parcial (Tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada con el algoritmo de secuencia parcial	Algoritmo de Palmer (Tiempo total de manufactura) Hrs	Secuencia seleccionada con el algoritmo de Palmer	Diferencia entre el algoritmo de secuencia parcial y Palmer (tiempo total de manufactura) Hrs
1	2567	DABCE	3218	BADEC	651
2	2766	EBACD	3242	AECBD	476
3	2835	ECABD	3013	CEADB	178
4	2695	CDEBA	2934	CEADB	239
5	2494	EDCBA	2786	AEBDC	292
6	2207	ADCBE	2337	ABDEC	130
7	2145	EDCAB	2650	DAECB	505
8	3488	ACBED	4069	ADBEC	581
9	2829	ABCED	3234	ADBEC	405
10	2606	ECABD	3047	EACDB	441

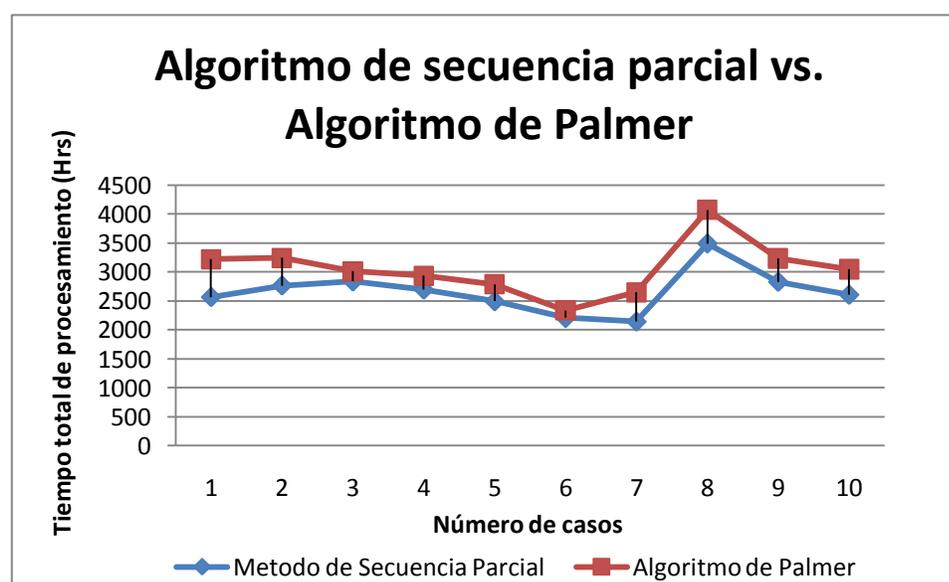


Figura 14. Comparación del algoritmo de Secuencias Parciales vs. Algoritmo de Palmer

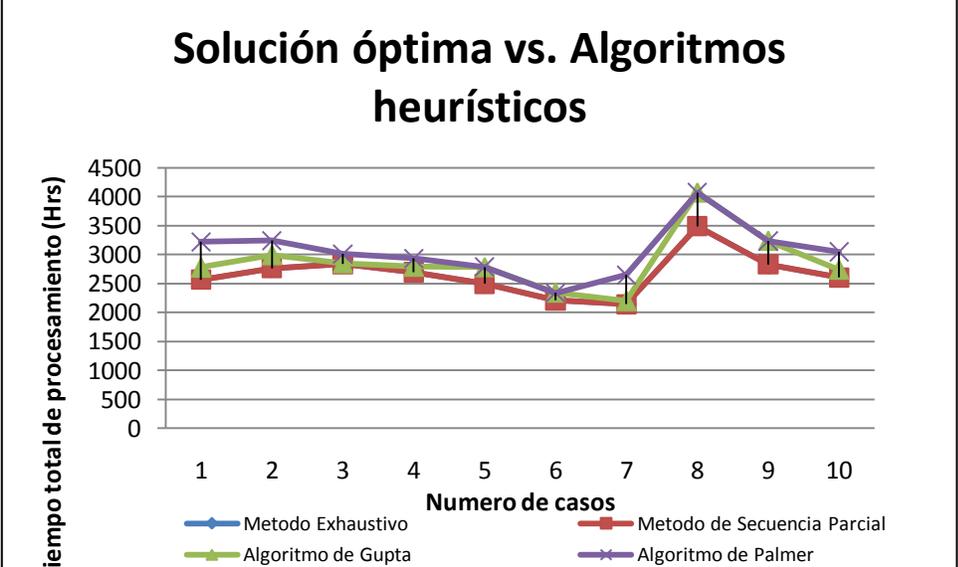


Figura 15. Comparación de todos los algoritmos heurísticos vs. La solución óptima

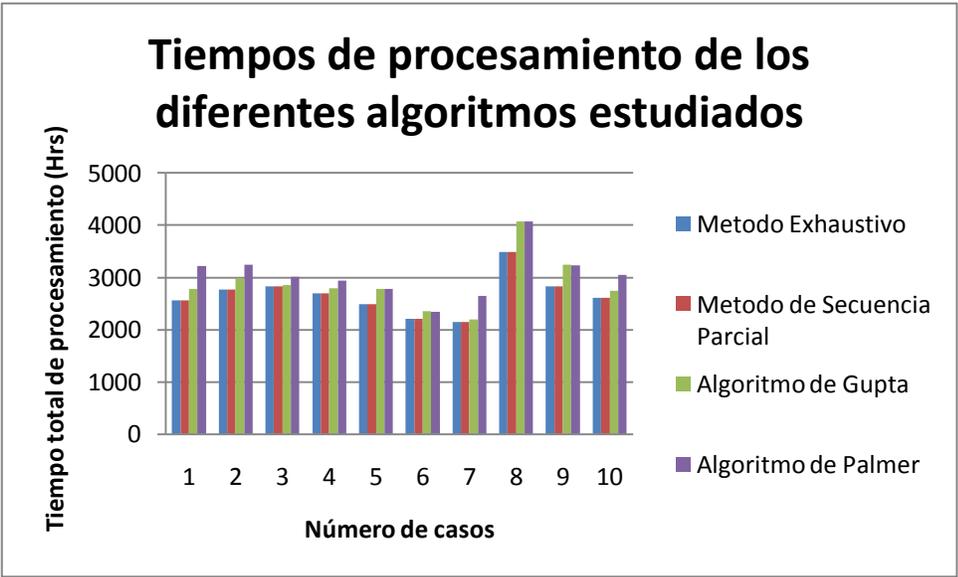


Figura 16. Gráfica comparativa de los diferentes algoritmos estudiados.

### 6.3.3 Análisis Estadístico de los diferentes modelos estudiados

Luego de realizar cada uno de los ejercicios que nos llevarían al análisis de los diferentes métodos utilizados y de la comparación con los algoritmos heurísticos ya existentes en la literatura que prueban ser de gran eficiencia en la aplicación de problemas similares al que se plantea en este proyecto, se presenta en esta sección un análisis estadístico de un solo factor y una comparación de Dunnett. Ambas pruebas permiten determinar que existen diferencias significativas entre cada uno de los métodos analizados.

El modelo estadístico que mide si los métodos son iguales o diferentes es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = *Tiempo total de procesamiento*

$\mu$  = *Promedio del tiempo de procesamiento*

$\tau_i$  = *Efecto del tipo de método*

$\epsilon_{ij}$  = *Error aleatorio*

**Hipótesis planteadas:**

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0$$

**Datos:**

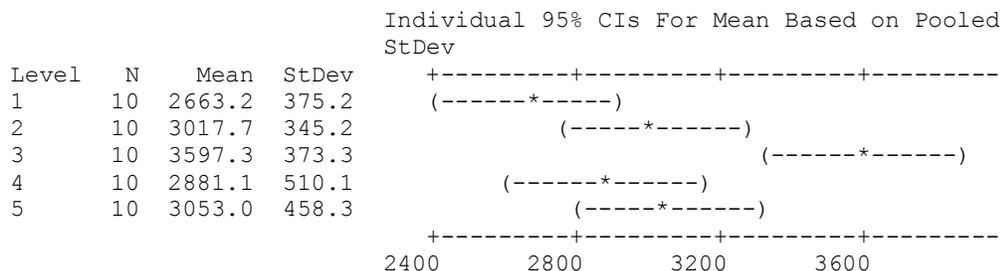
**Tabla 17. Datos para diseño de experimentos**

<b>Replicas</b>	<b>Secuencia Parcial</b>	<b>Ascendente</b>	<b>Descendente</b>	<b>Gupta</b>	<b>Palmer</b>
1	2567	2747	3515	2780	3218
2	2766	3458	4177	2993	3242
3	2835	2957	3267	2854	3013
4	2695	3308	3743	2795	2934
5	2494	3058	2903	2786	2786
6	2207	2695	3300	2349	2337
7	2145	2650	3770	2202	2650
8	3488	3569	4016	4069	4069
9	2829	3120	3667	3239	3234
10	2606	2615	3615	2744	3047

### One-way ANOVA: Tiempo total de procesamiento versus Métodos

Source	DF	SS	MS	F	P
Métodos	4	4784468	1196117	6.88	0.000
Error	45	7825561	173901		
Total	49	12610028			

S = 417.0    R-Sq = 37.94%    R-Sq(adj) = 32.43%



Pooled StDev = 417.0

Los cálculos estadísticos se realizaron mediante el uso de Minitab. El análisis de varianza indica que hay una diferencia significativa entre los métodos analizados. Además se realizó el análisis de comparación entre promedios. Observando los intervalos de confianza que se presentan en el análisis estadístico se puede apreciar en forma clara que el primer método que registra los datos del algoritmo de secuencia parcial presenta los menores tiempos de procesamiento pero el intervalo de confianza de este se superpone con los intervalos de confianza de los métodos dos, cuatro y cinco que corresponden a los algoritmos de ordenamiento ascendente, Gupta y Palmer respectivamente. Lo que lleva a concluir que no existen diferencias significativas entre los algoritmos de secuencia parcial, de ordenamiento ascendente, Gupta y Palmer, pero en cambio existe una diferencia considerable entre el algoritmo de secuencia parcial y el método de ordenamiento descendente. Esta conclusión se puede confirmar con la figura 17.

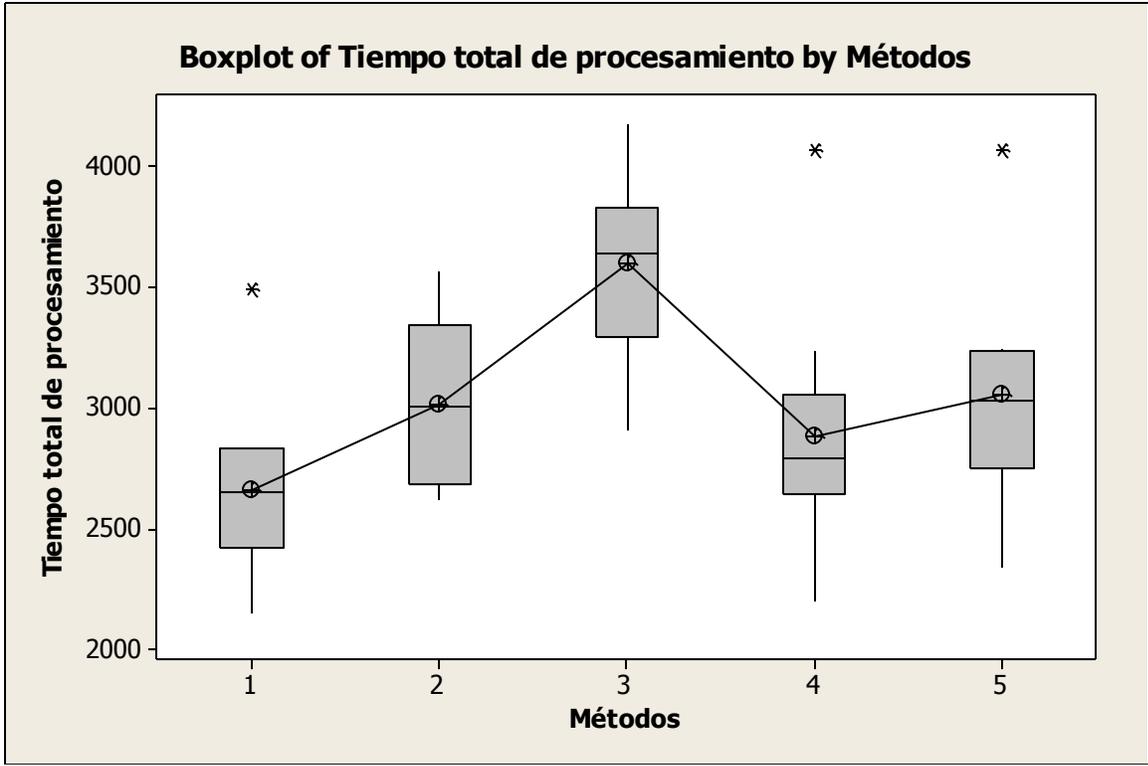
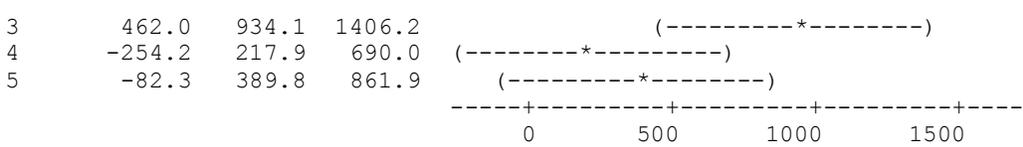


Figura 17. Boxplot del tiempo total de procesamiento por método

La prueba estadística de Dunnett, permite realizar una comparación pareada entre el método de secuencia parcial y cada uno de los métodos, permitiendo analizar la diferencia marcada que existe entre el primer algoritmo (secuencia parcial) y el tercero (ordenamiento descendente), lo que se puede observar claramente a través del intervalo de confianza que representa a este par, el cual no contiene al cero a diferencia de los otros intervalos pareados. Este resultado confirma la conclusión anterior.

```
Dunnett's comparisons with a control
Family error rate = 0.05
Individual error rate = 0.0149
Critical value = 2.53
Control = level (1) of Métodos
Intervals for treatment mean minus control mean
Level  Lower  Center  Upper  -----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
2      -117.6  354.5   826.6  (-----*-----)
```



La Figura 18 muestra el análisis de residuales permitiendo observar que el experimento realizado tiene validez. Además observando los datos en la gráfica inicial, se puede determinar que los residuales siguen una distribución normal, aunque existen unos datos específicos, principalmente los últimos, que se desvían de la línea central. El histograma revela en forma más clara la tendencia de los datos y la distribución que estos siguen. La gráfica de los residuales contra los valores estimados indica que la varianza en los residuales es estable. El orden de observaciones por su parte muestra que los residuales son independientes. Todo lo anterior conlleva a concluir que el experimento realizado fue totalmente efectivo y determina una vez más que existen diferencias significativas entre los métodos estudiados.

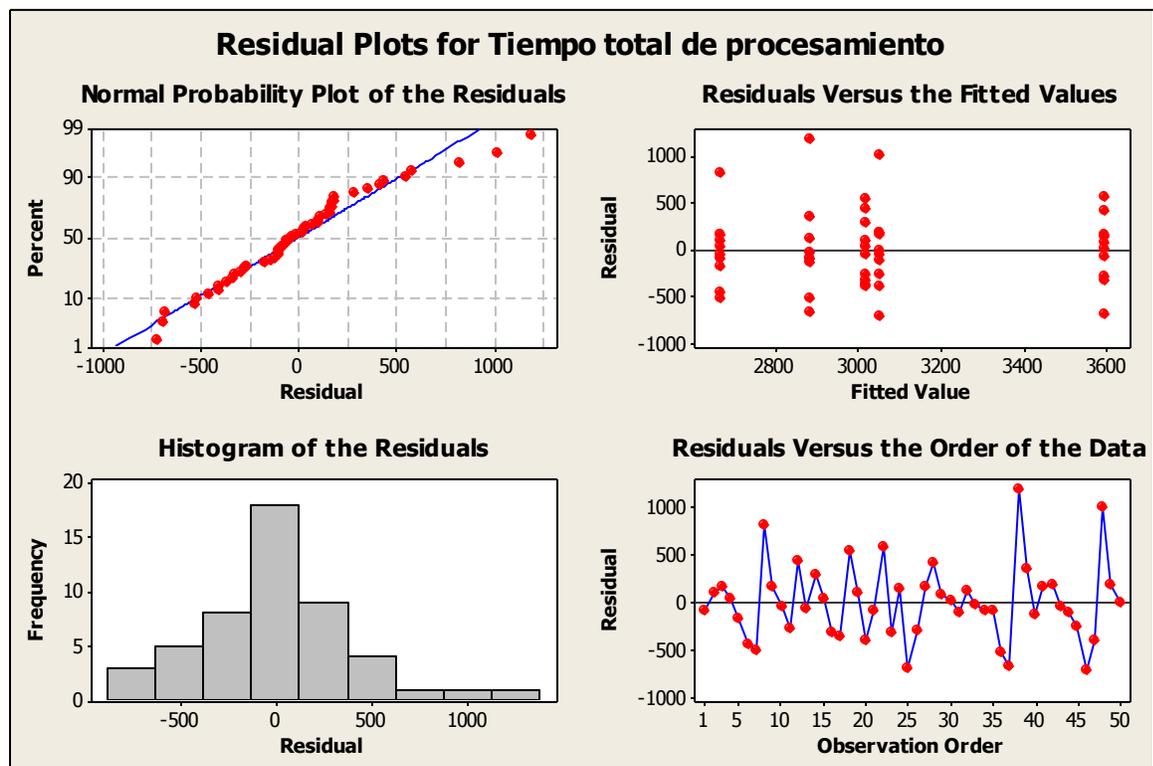


Figura 18. Gráfica de los residuales de los heurísticos estudiados

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 7.1 Conclusiones

Los problemas de asignación y secuenciación de la compañía fueron formulados y resueltos satisfactoriamente, permitiendo encontrar la solución óptima para el problema específico de la compañía. El algoritmo de asignación fue implementado por el personal de la compañía; sin embargo el algoritmo de secuenciación no fue implementado dado que el volumen de producción de la compañía disminuyó considerablemente.

Se logró desarrollar la programación en Matlab para generar las secuencias de manufactura y las penalidades por cambio de tamaño. A su vez se logró la interface entre EXCEL y LINGO para resolver el problema de manera simple y facilitar la interpretación de resultados.

Debido a que a medida que aumenta el número de recursos en el sistema el tiempo computacional aumenta desproporcionadamente se planteó el desarrollo preliminar de un algoritmo heurístico con el propósito de resolver problemas más grandes. En esta línea se creó el algoritmo de secuencia parcial para resolver problemas que tienen  $n-1$  productos para ser procesados en 4 máquinas.

Luego de realizar las diferentes pruebas los resultados de validación muestran que el algoritmo de secuencia parcial coincide con la solución óptima y es superior a los algoritmos de Gupta y Palmer. Sin embargo el algoritmo de secuencia parcial no resuelve problemas de tamaño moderado. Así que en un futuro cercano se intentará desarrollar un algoritmo heurístico que resuelva este tipo de problemas. Se resalta que el algoritmo de Gupta resulta ser de gran utilidad en este tipo de

problemas, permitiendo obtener una solución cercana a la óptima en un tiempo razonable.

Una de las contribuciones importantes de este proyecto es que se ha formulado y resuelto un problema de la vida real. El problema identificado involucra un máximo de 6 productos por módulo, lo cual implica que el algoritmo propuesto de secuencia parcial es una herramienta viable para este caso.

En conclusión este proyecto revela que las técnicas de programación lineal son útiles para resolver problemas de la vida real. Lamentablemente estas técnicas se usan con poca frecuencia, tal vez por la dificultad que esta involucra en el proceso de formulación e implementación de la solución.

## **7.2 Trabajo futuro**

Se plantea como trabajo futuro el desarrollo de un algoritmo heurístico que pueda ser aplicado a secuencias individuales con múltiples productos y múltiples máquinas, que pueda ser modelado mediante la integración de todas las rutinas de programación dentro de LINGO, debido a que MATLAB no trabaja con programación entera. También se puede estudiar la solución de problemas complejos, mediante la modelación de algoritmos meta heurísticos.

En investigaciones recientes Lee y Shaw (2000), mostraron que las redes neuronales artificiales pueden ser utilizadas para desarrollar un algoritmo de aprendizaje que determine en tiempo real diferentes secuencias de manufactura, las cuales finalmente conduzcan a obtener una solución satisfactoria en un tiempo razonable. El estudio preliminar de secuencia parcial tal vez sea de utilidad para entrenar una red neuronal e identificar reglas de secuencias parciales que conduzcan a reducir el tiempo total de manufactura.

## REFERENCIAS

- [1] Alarcón F., García J., Ortiz A. y Alemany M., **Modelo de programación/ secuenciación de producción para un sistema de taller de flujo con diferentes requerimientos según etapas**, *Universidad Politécnica de Valencia, IV Congreso de Ingeniería de Organización CIO, 2001.*
- [2] Arjona A., **Principios de control de producción**, *Ediciones Deusto*, 136 p, 1979.
- [3] Cruz M., Martínez M., Hernández J., Zavala J. y Díaz O., **Scheduling Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem.**, *IEEE*, 336-341, 2007.
- [4] E.F Stafford y F.T Seng. **On the Srikar-Ghosh MILP model for the  $N \times M$  SDST flowshop problem.** *International Journal of Production Research*, 28 (10): 1817- 1830, 1990.
- [5] E. Taillard. **Some Efficient Heuristic Methods for the Flow Shop Sequencing Problem.** *European Journal of Operational Research*, 47: 65- 74, 1989.
- [6] Gupta, J.N.D., **A functional heuristic algorithm for the flow-shop scheduling problem.** *Oper. Res.*, 22, 39-47, 1971.
- [7] Moss S., Dale C. y Brame G., **Sequence-Dependent Scheduling at Baxter International**, *Interfaces*, 30:2 p. 70-80, 2000.
- [8] Oliff M. y Burch E., **Multiproduct Production Scheduling at Owens-Corning Fiberglass**, *Interfaces*. 15 (15), p. 25-34, 1985.

- [9] Olson, J. y Schiniederjaus, M., **A Heuristic Scheduling System for ceramic industrial coating**, *Interfaces*, p.16-22, 2000.
- [10] Palmer, D.S, **Sequencing jobs through a multistage process in the minimum total time: a quick method of obtaining a near optimum**. *Oper. Rese. Quart.*,16, 101- 107, 1965.
- [11] Pinedo M., **Scheduling: Theory, Algorithms and Systems**, *Ediciones Prentice Hall*, segunda edición, 2002.
- [12] Portugal V. y Robb D., **Production Scheduling Theory: Just where is it applicable**, *Interfaces*, 30 (6), pp 64-76, 2000.
- [13] Ramirez-Beltran, N.D., **Application of Mixed Integer Programming to Cellular Manufacturing**, *Engineering Valuation and Cost Analysis*, 2, 373-386, 2000.
- [14] Srikar B. and Ghosh, **A MILP model for the n-job, M'stage flowshop with sequence dependent set-up times**, *International Journal of Production Research*, 24 (6), 1459-1474, 1986.
- [15] Stoop P. and Wiers V., **The Complexity of Scheduling in Practice**, *International Journal of Operations & Production Management*, 16 (10), pp 37-53, 1996.
- [16] Taug, S., Mawchwn, R. and Min Y., **Using Genetic Algorithm to Solve Sequence Dependent Setup Time Jobs Scheduling Problem**, *International Computer Symposium*, Dec 15-17 2004, Taipen Taiwan, 2004.

## APÉNDICES

## Apéndice A. Resumen de la producción semanal por módulo

Producción semana 2

		Módulos				
		6	7	8	9	
<b>B</b>		1	1	1	0	3
		0	1	1	0	2
		0	1	0	1	2
		0	0	0	0	0
		1	0	1	1	3
		0	0	0	0	0
		0	0	0	1	1
		1	0	0	0	1
		0	0	0	1	1
		1	0	1	0	2
		0	1	0	0	1
		0	0	0	0	0
	<b>16</b>					
		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	

Producción semana 3

		Módulos				
		6	7	8	9	
<b>A</b>		0	0	0	0	0
<b>B</b>		0	5	0	1	6
<b>C</b>		1	0	1	0	2
<b>D</b>		0	0	2	0	2
<b>E</b>		0	0	1	0	1
<b>F</b>		0	0	0	2	2
<b>G</b>		1	0	0	0	1
<b>H</b>		1	0	0	0	1
<b>I</b>		1	0	0	0	1
<b>J</b>		1	0	0	0	1
<b>K</b>		0	0	1	0	1
<b>L</b>		0	0	0	0	0
<b>18</b>						
		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	

Producción semana 4

		Módulos				
		6	7	8	9	
<b>A</b>		0	0	2	0	2
<b>B</b>		0	0	1	0	1
<b>C</b>		0	0	1	1	2
<b>D</b>		0	0	0	0	0
<b>E</b>		0	0	0	0	0
<b>F</b>		2	0	0	0	2
<b>G</b>		0	0	1	0	1
<b>H</b>		0	0	0	2	2
<b>I</b>		2	0	0	0	2
<b>J</b>		0	1	0	0	1
<b>K</b>		0	3	0	0	3
<b>L</b>		0	0	0	2	2
<b>18</b>						
		<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	

Producción semana 5

		Módulos				
		6	7	8	9	
<b>A</b>		0	0	3	1	4
<b>B</b>		0	0	3	0	3
<b>C</b>		2	0	0	1	3
<b>D</b>		0	2	0	0	2
<b>E</b>		0	1	0	0	1
<b>F</b>		1	0	0	0	1
<b>G</b>		0	0	0	0	0
<b>H</b>		0	0	0	2	2
<b>I</b>		2	0	0	0	2
<b>J</b>		0	1	0	0	1
<b>K</b>		0	1	0	0	1
<b>L</b>		0	0	0	2	2
<b>22</b>						
		<b>5</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	



## Apéndice B. Resultados de asignación por semanas

### Resultados Semana 2

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	1	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	6
8	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	6
9	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	4
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	7,183
-------------------------	-------

### Resultados Semana 3

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	5
8	0	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,161
-------------------------	-------

**Resultados Semana 4**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3
7	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	3
8	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	6
9	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,229
-------------------------	-------

**Resultados Semana 5**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	4
7	3	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	6
8	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6
9	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,874
-------------------------	-------

**Resultados Semana 6**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
7	1	2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	6
8	0	3	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	6
9	0	0	2	1	0	0	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,443
-------------------------	-------

**Resultados Semana 7**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	1	3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	6
8	0	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	6
9	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,515
-------------------------	-------

**Resultados Semana 8**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
7	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	4
8	1	0	2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	6
9	0	0	3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,038
-------------------------	-------

**Resultados Semana 9**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
7	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	6
8	0	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	6
9	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,689
-------------------------	-------

**Resultados Semana 10**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
7	3	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6
8	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	6
9	0	0	3	0	0	0	2	0	1	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,692
-------------------------	-------

**Resultados Semana 11**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	6
8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	4
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	7,355
-------------------------	-------

**Resultados Semana 13**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	4
7	1	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	5
8	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	6
9	0	0	3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,473
-------------------------	-------

**Resultados Semana 14**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
7	1	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	6
8	0	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	6
9	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,043
-------------------------	-------

**Resultados Semana 15**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
7	2	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	6
8	0	3	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	6
9	1	0	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,619
-------------------------	-------

**Resultados Semana 16**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
7	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	6
8	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	6
9	0	0	3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,215
-------------------------	-------

**Resultados Semana 17**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3
7	2	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	6
8	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	6
9	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,642
-------------------------	-------

**Resultados Semana 18**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2
7	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	6
8	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	6
9	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,080
-------------------------	-------

**Resultados Semana 19**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
7	2	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	6
8	1	1	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	2	0	0	2	1	0	1	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,145
-------------------------	-------

**Resultados Semana 20**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4
7	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
8	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	6
9	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,286
-------------------------	-------

**Resultados Semana 21**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
7	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	6
8	1	3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6
9	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	9,005
-------------------------	-------

**Resultados Semana 22**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	3	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	6
8	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	4
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	7,627
-------------------------	-------

**Resultados Semana 23**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	5
7	1	1	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	6
8	0	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	10,344
-------------------------	--------

**Resultados Semana 24**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	5
7	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	6
8	1	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	10,214
-------------------------	--------

**Resultados Semana 25**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	6
7	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	5
8	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	2	0	0	0	1	0	3	0	0	0	6
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	10,360
-------------------------	--------

**Resultados Semana 26**

<b>Módulo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>	<b>Lotes Totales</b>
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	3	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	6
8	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	6
9	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	5
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>Unidades Totales</b>	8,323
-------------------------	-------

### Apéndice C. Ejemplo de aplicación

- Tenemos 3 lotes de productos que van a ser procesados en el modulo j:  $L1j=A$ ,  $L2j=B$ ,  $L3j=C$ .
- Los lotes serán procesados en 4 maquinas: M1, M2, M3, M4.
- Todos los lotes serán procesados en las cuatro maquinas en el siguiente orden: M1, M2, M3 y finalmente M4.
- Considerando los siguientes tiempos de procesamiento se plantea la solución tal como sigue:

Maquinas/Productos (Hrs/lote)	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>M1</b>	61	134	22
<b>M2</b>	154	152	46
<b>M3</b>	117	125	91
<b>M4</b>	68	181	47

$$W = \begin{matrix} & \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \mathbf{A} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$W(ABC) = 1 + 2 = 3$$

$$W(ACB) = 2 + 1 = 3$$

$$W(BAC) = 1 + 1 = 2$$

$$W(BCA) = 1 + 1 = 2$$

$$W(CAB) = 2 + 1 = 3$$

$$W(CBA) = 1 + 2 = 3$$

- Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = X_{A4} + X_{B4} + X_{C4} + 3f_1 + 3f_2 + 2f_3 + 2f_4 + 3f_5 + 3f_6$$

- Restricciones:

$$X_{A1} + a_1 \leq X_{A2}$$

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{A3}$$

$$X_{A3} + a_3 \leq X_{A4}$$

$$X_{B1} + b_1 \leq X_{B2}$$

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{B3}$$

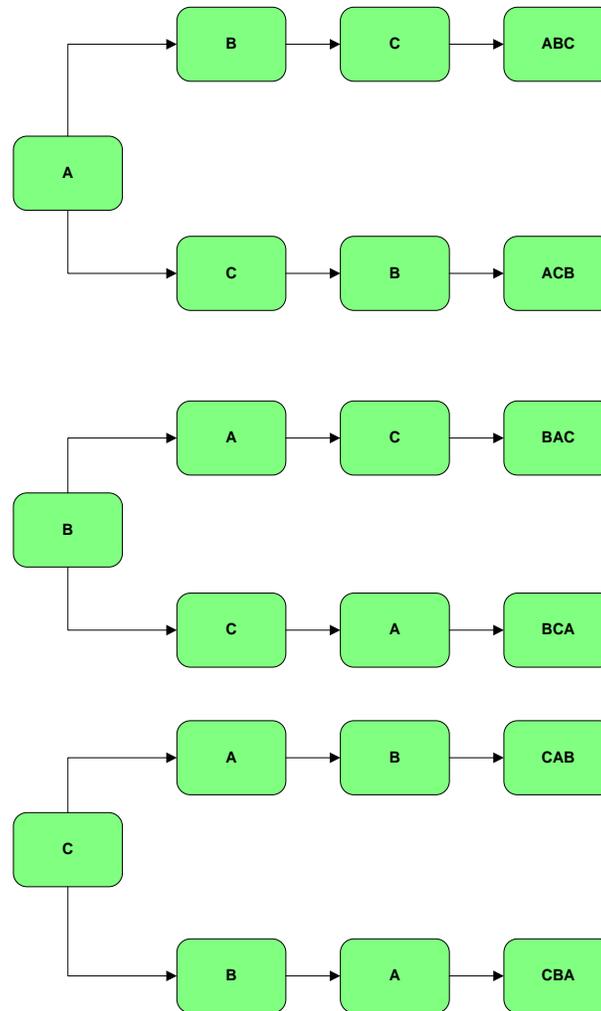
$$X_{B3} + b_3 \leq X_{B4}$$

$$X_{C1} + C_1 \leq X_{C2}$$

$$X_{C2} + C_2 \leq X_{C3}$$

$$X_{C3} + C_3 \leq X_{c4}$$

- Las posibles secuencias a considerarse se muestran en la siguiente gráfica.



- Secuencias en cada máquina

- Máquina 1 Secuencia ABC

$$X_{A1} + a_1 \leq X_{B1} + (1 - f_{1,1}) * R$$

$$X_{B1} + b_1 \leq X_{C1} + (1 - f_{1,1}) * R$$

- Máquina 1 Secuencia ACB

$$X_{A1} + a_1 \leq X_{C1} + (1 - f_{2,1}) * R$$

$$X_{C1} + c_1 \leq X_{B1} + (1 - f_{2,1}) * R$$

- Máquina 1 Secuencia BAC

$$X_{B1} + b_1 \leq X_{A1} + (1 - f_{3,1}) * R$$

$$X_{A1} + a_1 \leq X_{C1} + (1 - f_{3,1}) * R$$

- Máquina 1 Secuencia BCA

$$X_{B1} + b_1 \leq X_{C1} + (1 - f_{4,1}) * R$$

$$X_{C1} + c_1 \leq X_{A1} + (1 - f_{4,1}) * R$$

- Máquina 1 Secuencia CAB

$$X_{C1} + c_1 \leq X_{A1} + (1 - f_{5,1}) * R$$

$$X_{A1} + a_1 \leq X_{B1} + (1 - f_{5,1}) * R$$

- Máquina 1 Secuencia CBA

$$X_{C1} + c_1 \leq X_{B1} + (1 - f_{6,1}) * R$$

$$X_{B1} + b_1 \leq X_{A1} + (1 - f_{6,1}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia ABC

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{B2} + (1 - f_{1,2}) * R$$

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{C2} + (1 - f_{1,2}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia ACB

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{C2} + (1 - f_{2,2}) * R$$

$$X_{C2} + c_2 \leq X_{B2} + (1 - f_{2,2}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia BAC

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{A2} + (1 - f_{3,2}) * R$$

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{C2} + (1 - f_{3,2}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia BCA

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{C2} + (1 - f_{4,2}) * R$$

$$X_{C2} + c_2 \leq X_{A2} + (1 - f_{4,2}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia CAB

$$X_{C2} + c_2 \leq X_{A2} + (1 - f_{5,2}) * R$$

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{B2} + (1 - f_{5,2}) * R$$

- Máquina 2 Secuencia CBA

$$X_{C2} + c_2 \leq X_{B2} + (1 - f_{6,2}) * R$$

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{A2} + (1 - f_{6,2}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia ABC

$$X_{A3} + a_3 \leq X_{B3} + (1 - f_{1,3}) * R$$

$$X_{B3} + b_3 \leq X_{C3} + (1 - f_{1,3}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia ACB

$$X_{A3} + a_3 \leq X_{C3} + (1 - f_{2,3}) * R$$

$$X_{C3} + c_3 \leq X_{B3} + (1 - f_{2,3}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia BAC

$$X_{B2} + b_2 \leq X_{A2} + (1 - f_{3,3}) * R$$

$$X_{A2} + a_2 \leq X_{C2} + (1 - f_{3,3}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia BCA

$$X_{B3} + b_3 \leq X_{C3} + (1 - f_{4,3}) * R$$

$$X_{C3} + c_3 \leq X_{A3} + (1 - f_{4,3}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia CAB

$$X_{C3} + c_3 \leq X_{A3} + (1 - f_{5,3}) * R$$

$$X_{A3} + a_3 \leq X_{B3} + (1 - f_{5,3}) * R$$

- Máquina 3 Secuencia CBA

$$X_{C3} + c \leq X_{B3} + (1 - f_{6,3}) * R$$

$$X_{B3} + b_3 \leq X_{A3} + (1 - f_{6,3}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia ABC

$$X_{A4} + a_4 \leq X_{B4} + (1 - f_{1,4}) * R$$

$$X_{B4} + b_4 \leq X_{C4} + (1 - f_{1,4}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia ACB

$$X_{A4} + a_4 \leq X_{C4} + (1 - f_{2,4}) * R$$

$$X_{C4} + c_4 \leq X_{B4} + (1 - f_{2,4}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia BAC

$$X_{B4} + b_4 \leq X_{A4} + (1 - f_{3,4}) * R$$

$$X_{A4} + a_4 \leq X_{C4} + (1 - f_{3,4}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia BCA

$$X_{B4} + b_4 \leq X_{C4} + (1 - f_{4,4}) * R$$

$$X_{C4} + c_4 \leq X_{A4} + (1 - f_{4,4}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia CAB

$$X_{C4} + c_4 \leq X_{A4} + (1 - f_{5,4}) * R$$

$$X_{A4} + a_4 \leq X_{B4} + (1 - f_{5,4}) * R$$

- Máquina 4 Secuencia CBA

$$X_{C4} + c_4 \leq X_{B4} + (1 - f_{6,4}) * R$$

$$X_{B4} + b_4 \leq X_{A4} + (1 - f_{6,4}) * R$$

$$f_{1,1} + f_{2,1} + f_{3,1} + f_{4,1} + f_{5,1} + f_{6,1} + \dots + f_{6,4} = 1$$

## Apéndice D. Algoritmo de Asignación.

!Tabla de datos en Excel que alimentan el algoritmo de asignación.

**Datos:**

Modulo	Capacidad del Modulo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	6	63.8	66.7	70.8	76.7	79.6	82.7	64.0	69.3	71.5	77.9	80.3	84.8
7	6	66.8	69.9	70.9	75.3	86.8	85.7	44.6	70.2	54.6	42.0	69.6	44.5
8	6	66.7	70.7	73.6	80.2	82.1	85.9	66.9	70.1	74.0	78.2	81.0	84.6
9	6	66.2	68.4	73.3	77.9	80.7	85.3	68.9	68.4	76.0	79.5	80.5	83.7
10	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Demanda	4	1	2	5	3	1	0	0	0	0	1	0	1

Demanda Total
18

SETS:

MOD: CAP;

APT: DEM, A;

MXP(MOD,APT): COST, X;

ENDSETS

DATA:

!Datos para la ubicacion de los datos que alimentan el programa;

```

MOD= @ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx');
!Modulos;
APT = @ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx');
!Productos;
COST= @ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx');
!Tiempos de procesamiento de cada producto en cada modulo;
DEM = @ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx');
!Demanda;
CAP = @ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx');
!Capacidad de los modulos;
ENDDATA

```

! Función Objetivo;

MAX = TOT\_COST;

TOT\_COST = @SUM(MXP: 6 \* COST \* X);

```

! Restricciones;
!La cantidad de lotes asignado a cada modulo no debe exceder la capacidad del
modulo;
@FOR( MOD( I):@SUM( APT( J): X( I, J) ) <= CAP( I););

!La sumatoria de las cantidades de producto asignadas a cada modulo debe ser
igual a la demanda total;
@FOR( APT( J): @SUM( MOD( I): X( I, J) ) = DEM( J););

!Todos los lotes no deben ser procesados en un mismo modulo;

@FOR(APT(J):A(J)=@IF(DEM(J)#GT# 1, 1, 0););

@FOR(MXP(I,J):X(I,J)<((DEM(J))-1+(1-A(J))*1000000););

DATA:
! Estos comandos son para arrojar en el archivo de Excel los resultados
obtenidos del programa;

@ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx') = X;
@ole('C:\Users\Shirley\Desktop\Thesis\Datos para asignación.xlsx') =
TOT_COST;

ENDDATA

END
GO
QUIT

```

### Apéndice E. Algoritmo de Secuenciación.

La rutina de Matlab que permite determinar los pesos asignados a cada una de las secuencias se describe a continuación.

```
>> M= [ 0 50 60 90; 50 0 50 60; 60 50 0 50; 90 60 50 0];
L= perms(1:4);
for i= 1:24;
for j=1:3;
N(i,j)= M(L(i,j), L(i,j+1));
end
end
SN= sum(N)';
```

Los datos extraídos desde la hoja de cálculo en Excel señalada dentro de la programación de Lingo son los que siguen:

```
T= @ole ('C:\Users\Shirley\Desktop\Project\Datos para ejercicio
final.xlsx');
```

<b>Tiempos de Procesamiento</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
<b>S1</b>	104	149	146	185	172
<b>S2</b>	188	121	77	173	41
<b>S3</b>	45	18	71	183	91
<b>S4</b>	196	123	20	168	90

```
W= @ole ('C:\Users\Shirley\Desktop\Project\Datos para ejercicio final.xlsx');
```

## Pesos de cada Secuencia

*W generados en Matlab*

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
	200	210	220	220	240	250	220	250	260	250
<b>S1</b>	50	52.5	55	55	60	62.5	55	62.5	65	62.5
<b>S2</b>	50	52.5	55	55	60	62.5	55	62.5	65	62.5
<b>S3</b>	50	52.5	55	55	60	62.5	55	62.5	65	62.5
<b>S4</b>	50	52.5	55	55	60	62.5	55	62.5	65	62.5

<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
230	270	280	290	260	300	280	250	290	290
57.5	67.5	70	72.5	65	75	70	62.5	72.5	72.5
57.5	67.5	70	72.5	65	75	70	62.5	72.5	72.5
57.5	67.5	70	72.5	65	75	70	62.5	72.5	72.5
57.5	67.5	70	72.5	65	75	70	62.5	72.5	72.5

<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
270	280	320	310	210	220	250	250	270	280
67.5	70	80	77.5	52.5	55	62.5	62.5	67.5	70
67.5	70	80	77.5	52.5	55	62.5	62.5	67.5	70
67.5	70	80	77.5	52.5	55	62.5	62.5	67.5	70
67.5	70	80	77.5	52.5	55	62.5	62.5	67.5	70

<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
250	280	310	270	250	320	290	290	270	330
62.5	70	77.5	67.5	62.5	80	72.5	72.5	67.5	82.5
62.5	70	77.5	67.5	62.5	80	72.5	72.5	67.5	82.5
62.5	70	77.5	67.5	62.5	80	72.5	72.5	67.5	82.5
62.5	70	77.5	67.5	62.5	80	72.5	72.5	67.5	82.5

<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
290	230	290	300	250	290	350	320	240	270
72.5	57.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80	60	67.5
72.5	57.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80	60	67.5
72.5	57.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80	60	67.5
72.5	57.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80	60	67.5

<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>60</b>
320	280	280	350	220	250	300	290	290	330
80	70	70	87.5	55	62.5	75	72.5	72.5	82.5
80	70	70	87.5	55	62.5	75	72.5	72.5	82.5
80	70	70	87.5	55	62.5	75	72.5	72.5	82.5
80	70	70	87.5	55	62.5	75	72.5	72.5	82.5

<b>61</b>	<b>62</b>	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>65</b>	<b>66</b>	<b>67</b>	<b>68</b>	<b>69</b>	<b>70</b>
280	350	280	320	240	270	330	290	250	220
70	87.5	70	80	60	67.5	82.5	72.5	62.5	55
70	87.5	70	80	60	67.5	82.5	72.5	62.5	55
70	87.5	70	80	60	67.5	82.5	72.5	62.5	55
70	87.5	70	80	60	67.5	82.5	72.5	62.5	55

<b>71</b>	<b>72</b>	<b>73</b>	<b>74</b>	<b>75</b>	<b>76</b>	<b>77</b>	<b>78</b>	<b>79</b>	<b>80</b>
300	290	290	290	230	290	330	270	270	310
75	72.5	72.5	72.5	57.5	72.5	82.5	67.5	67.5	77.5
75	72.5	72.5	72.5	57.5	72.5	82.5	67.5	67.5	77.5
75	72.5	72.5	72.5	57.5	72.5	82.5	67.5	67.5	77.5
75	72.5	72.5	72.5	57.5	72.5	82.5	67.5	67.5	77.5

<b>81</b>	<b>82</b>	<b>83</b>	<b>84</b>	<b>85</b>	<b>86</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>89</b>	<b>90</b>
250	320	280	250	290	300	250	290	350	320
62.5	80	70	62.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80
62.5	80	70	62.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80
62.5	80	70	62.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80
62.5	80	70	62.5	72.5	75	62.5	72.5	87.5	80

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
220	210	280	270	250	250	280	290	260	300
55	52.5	70	67.5	62.5	62.5	70	72.5	65	75
55	52.5	70	67.5	62.5	62.5	70	72.5	65	75
55	52.5	70	67.5	62.5	62.5	70	72.5	65	75
55	52.5	70	67.5	62.5	62.5	70	72.5	65	75

101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
280	250	260	250	220	250	270	230	200	210
70	62.5	65	62.5	55	62.5	67.5	57.5	50	52.5
70	62.5	65	62.5	55	62.5	67.5	57.5	50	52.5
70	62.5	65	62.5	55	62.5	67.5	57.5	50	52.5
70	62.5	65	62.5	55	62.5	67.5	57.5	50	52.5

111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
220	220	240	250	290	290	310	320	280	270
55	55	60	62.5	72.5	72.5	77.5	80	70	67.5
55	55	60	62.5	72.5	72.5	77.5	80	70	67.5
55	55	60	62.5	72.5	72.5	77.5	80	70	67.5
55	55	60	62.5	72.5	72.5	77.5	80	70	67.5

```
!Number of stages : 4
!Number of products: 5;
```

Model:

sets:

```
Products/A B C D E/; !Number of products;
```

```
Stages/S1 S2 S3 S4/; !Number of stations;
```

```
SXP(Stages, Products): X,T; !Attributes of stages and products;
```

```
contador/1..120/; !Counter;
```

```
PQ(Products,Products,Products,Products, Products,contador); !Relation of
products, counter and weight;
```

```
SQ(Stages,contador):STQ, W; !Relation of stations,counter and weight of each
sequence;
```

endsets

Data:

```
T= @ole ('C:\Users\Shirley\Desktop\Project\Datos para ejercicio final.xlsx');
```

```
!Processing time of each product in each station;
```

```
W= @ole ('C:\Users\Shirley\Desktop\Project\Datos para ejercicio final.xlsx');
```

```
!Weight of each sequence;
```

PQ=

E, D, C, B, A, 1  
E, D, C, A, B, 2  
E, D, B, C, A, 3  
E, D, B, A, C, 4  
E, D, A, B, C, 5  
E, D, A, C, B, 6  
E, C, D, B, A, 7  
E, C, D, A, B, 8  
E, C, B, D, A, 9  
E, C, B, A, D, 10  
E, C, A, B, D, 11  
E, C, A, D, B, 12  
E, B, C, D, A, 13  
E, B, C, A, D, 14  
E, B, D, C, A, 15  
E, B, D, A, C, 16  
E, B, A, D, C, 17  
E, B, A, C, D, 18  
E, A, C, B, D, 19  
E, A, C, D, B, 20  
E, A, B, C, D, 21  
E, A, B, D, C, 22  
E, A, D, B, C, 23  
E, A, D, C, B, 24  
D, E, C, B, A, 25  
D, E, C, A, B, 26  
D, E, B, C, A, 27  
D, E, B, A, C, 28  
D, E, A, B, C, 29  
D, E, A, C, B, 30  
D, C, E, B, A, 31  
D, C, E, A, B, 32  
D, C, B, E, A, 33  
D, C, B, A, E, 34  
D, C, A, B, E, 35  
D, C, A, E, B, 36  
D, B, C, E, A, 37  
D, B, C, A, E, 38  
D, B, E, C, A, 39  
D, B, E, A, C, 40  
D, B, A, E, C, 41  
D, B, A, C, E, 42  
D, A, C, B, E, 43  
D, A, C, E, B, 44  
D, A, B, C, E, 45  
D, A, B, E, C, 46  
D, A, E, B, C, 47  
D, A, E, C, B, 48  
C, D, E, B, A, 49  
C, D, E, A, B, 50  
C, D, B, E, A, 51  
C, D, B, A, E, 52  
C, D, A, B, E, 53  
C, D, A, E, B, 54  
C, E, D, B, A, 55

C, E, D, A, B, 56  
C, E, B, D, A, 57  
C, E, B, A, D, 58  
C, E, A, B, D, 59  
C, E, A, D, B, 60  
C, B, E, D, A, 61  
C, B, E, A, D, 62  
C, B, D, E, A, 63  
C, B, D, A, E, 64  
C, B, A, D, E, 65  
C, B, A, E, D, 66  
C, A, E, B, D, 67  
C, A, E, D, B, 68  
C, A, B, E, D, 69  
C, A, B, D, E, 70  
C, A, D, B, E, 71  
C, A, D, E, B, 72  
B, D, C, E, A, 73  
B, D, C, A, E, 74  
B, D, E, C, A, 75  
B, D, E, A, C, 76  
B, D, A, E, C, 77  
B, D, A, C, E, 78  
B, C, D, E, A, 79  
B, C, D, A, E, 80  
B, C, E, D, A, 81  
B, C, E, A, D, 82  
B, C, A, E, D, 83  
B, C, A, D, E, 84  
B, E, C, D, A, 85  
B, E, C, A, D, 86  
B, E, D, C, A, 87  
B, E, D, A, C, 88  
B, E, A, D, C, 89  
B, E, A, C, D, 90  
B, A, C, E, D, 91  
B, A, C, D, E, 92  
B, A, E, C, D, 93  
B, A, E, D, C, 94  
B, A, D, E, C, 95  
B, A, D, C, E, 96  
A, D, C, B, E, 97  
A, D, C, E, B, 98  
A, D, B, C, E, 99  
A, D, B, E, C, 100  
A, D, E, B, C, 101  
A, D, E, C, B, 102  
A, C, D, B, E, 103  
A, C, D, E, B, 104  
A, C, B, D, E, 105  
A, C, B, E, D, 106  
A, C, E, B, D, 107  
A, C, E, D, B, 108  
A, B, C, D, E, 109  
A, B, C, E, D, 110  
A, B, D, C, E, 111  
A, B, D, E, C, 112

```

A,B,E,D,C,113
A,B,E,C,D,114
A,E,C,B,D,115
A,E,C,D,B,116
A,E,B,C,D,117
A,E,B,D,C,118
A,E,D,B,C,119
A,E,D,C,B,120;

```

```

Enddata

```

```

!Objective Function;

```

```

MIN= PR_1;

```

```

PR_1=@sum(SxP(J,I)|J#EQ#4:X(J,I))+ @sum(SQ(J,N):W(J,N)*STQ(J,N));

```

```

!Constraints

```

```

1. No interference constraint: ;

```

```

@for(Stages(J):@for(PQ(K,L,M,O,H,N):X(J,K)+T(J,K)<= X(J,L)+(1-
STQ(J,N))*10000;

```

```

X(J,L)+T(J,L)<= X(J,M)+(1-

```

```

STQ(J,N))*10000;

```

```

X(J,M)+T(J,M)<= X(J,O)+(1-

```

```

STQ(J,N))*10000;

```

```

X(J,O)+T(J,O)<= X(J,H)+(1-

```

```

STQ(J,N))*10000;););

```

```

!2. Sequence constraint;

```

```

@for(SxP(J,I)|J#LE#3:X(J,I)+T(J,I)-(X(J+1,I))<=0);

```

```

!3. Binary Variables;

```

```

@for(SQ(J,N):@bin(STQ(J,N)));

```

```

!4. Only 1 sequence can be active;

```

```

@for(Stages(J):@sum(contador(N):(STQ(J,N))=1);

```

```

End

```

## Apéndice F. Cálculos del Algoritmo de Gupta

Corrida 2:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{57 + 174, 174 + 56, 56 + 189\}} = \frac{1}{230} = 0.0043$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{107 + 123, 123 + 11, 11 + 71\}} = \frac{-1}{82} = -0.0121$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{165 + 54, 54 + 169, 169 + 132\}} = \frac{-1}{219} = -0.0045$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{188 + 200, 200 + 136, 136 + 53\}} = \frac{-1}{189} = -0.0052$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{13 + 125, 125 + 69, 69 + 50\}} = \frac{1}{119} = 0.0084$$

$$0.0084 > 0.0043 > -0.0045 > -0.0052 > -0.0121$$

$$SI_5 > SI_1 > SI_3 > SI_4 > SI_2$$

Corrida 3:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{26 + 197, 197 + 114, 114 + 59\}} = \frac{1}{173} = 0.0057$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{178 + 177, 177 + 65, 65 + 51\}} = \frac{-1}{116} = -0.0086$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{105 + 68, 68 + 71, 71 + 174\}} = \frac{1}{139} = 0.0071$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{189 + 86, 86 + 106, 106 + 129\}} = \frac{-1}{192} = -0.0052$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{83 + 47, 47 + 64, 64 + 116\}} = \frac{1}{111} = 0.0090$$

$$0.0090 > 0.0071 > 0.0057 > -0.0052 > -0.0086$$

$$SI_5 > SI_3 > SI_1 > SI_4 > SI_2$$

Corrida 4:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{37 + 57, 57 + 161, 161 + 91\}} = \frac{1}{94} = 0.0106$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{84 + 169, 169 + 183, 183 + 31\}} = \frac{-1}{214} = -0.0046$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{22 + 39, 39 + 173, 173 + 135\}} = \frac{1}{61} = 0.0163$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{40 + 115, 115 + 67, 67 + 56\}} = \frac{1}{123} = 0.0081$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{125 + 15, 15 + 137, 137 + 192\}} = \frac{1}{140} = 0.0071$$

$$0.0163 > 0.0106 > 0.0081 > 0.0071 > -0.0046$$

$$SI_3 > SI_1 > SI_4 > SI_5 > SI_2$$

Corrida 5:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{126 + 41, 41 + 44, 44 + 200\}} = \frac{1}{85} = 0.0117$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{85 + 70, 70 + 90, 90 + 66\}} = \frac{-1}{155} = -0.0064$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{138 + 64, 64 + 57, 57 + 50\}} = \frac{-1}{107} = -0.0093$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{118 + 80, 80 + 142, 142 + 12\}} = \frac{-1}{154} = -0.0064$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{51 + 126, 126 + 84, 84 + 138\}} = \frac{1}{177} = 0.0056$$

$$0.0117 > 0.0056 > -0.0064 > -0.0064 > -0.0093$$

$$SI_1 > SI_5 > SI_2 > SI_4 > SI_3$$

Corrida 6:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{12 + 31, 31 + 52, 52 + 155\}} = \frac{1}{43} = 0.0232$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{90 + 68, 68 + 75, 75 + 198\}} = \frac{1}{143} = 0.0069$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{165 + 50, 50 + 11, 11 + 119\}} = \frac{-1}{61} = -0.0163$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{38 + 167, 167 + 61, 61 + 63\}} = \frac{1}{124} = 0.0080$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{193 + 105, 105 + 150, 150 + 140\}} = \frac{-1}{255} = -0.0039$$

$$0.0232 > 0.0080 > 0.0069 > -0.0039 > -0.0163$$

$$SI_1 > SI_4 > SI_2 > SI_5 > SI_3$$

Corrida 7:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{16 + 159, 159 + 85, 85 + 96\}} = \frac{1}{175} = 0.0057$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{183 + 124, 124 + 121, 121 + 123\}} = \frac{-1}{244} = -0.0040$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{103 + 109, 109 + 181, 181 + 73\}} = \frac{-1}{212} = -0.0047$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{13 + 89, 89 + 131, 131 + 139\}} = \frac{1}{102} = 0.0098$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{22 + 17, 17 + 21, 21 + 23\}} = \frac{1}{17} = 0.0263$$

$$0.0263 > 0.0098 > 0.0057 > -0.0040 > -0.0047$$

$$SI_5 > SI_4 > SI_1 > SI_2 > SI_3$$

Corrida 8:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{104 + 188, 188 + 45, 45 + 196\}} = \frac{1}{233} = 0.0042$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{149 + 121, 121 + 18, 18 + 123\}} = \frac{-1}{139} = -0.0071$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{146 + 77, 77 + 71, 71 + 20\}} = \frac{-1}{91} = -0.0109$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{185 + 173, 173 + 183, 183 + 168\}} = \frac{-1}{351} = -0.0028$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{172 + 41, 41 + 91, 91 + 90\}} = \frac{-1}{132} = -0.0075$$

$$0.0042 > -0.0028 > -0.0071 > -0.0075 > -0.0109$$

$$SI_1 > SI_4 > SI_2 > SI_5 > SI_3$$

Corrida 9:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{32 + 178, 178 + 133, 133 + 64\}} = \frac{1}{197} = 0.0050$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{91 + 53, 53 + 68, 68 + 27\}} = \frac{-1}{95} = -0.0105$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{131 + 112, 112 + 73, 73 + 41\}} = \frac{-1}{114} = -0.0087$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{102 + 185, 185 + 156, 156 + 70\}} = \frac{-1}{226} = -0.0044$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{112 + 138, 138 + 14, 14 + 83\}} = \frac{-1}{14} = -0.0103$$

$$0.0050 > -0.0044 > -0.0087 > -0.0103 > -0.0105$$

$$SI_1 > SI_4 > SI_3 > SI_5 > SI_2$$

Corrida 10:

$$SI_1 = \frac{e_1}{\text{Min}\{94 + 145, 145 + 99, 99 + 172\}} = \frac{1}{239} = 0.0041$$

$$SI_2 = \frac{e_2}{\text{Min}\{97 + 106, 106 + 192, 192 + 29\}} = \frac{-1}{203} = -0.0049$$

$$SI_3 = \frac{e_3}{\text{Min}\{75 + 13, 13 + 49, 49 + 87\}} = \frac{1}{62} = 0.0161$$

$$SI_4 = \frac{e_4}{\text{Min}\{83 + 197, 197 + 33, 33 + 161\}} = \frac{1}{194} = 0.0051$$

$$SI_5 = \frac{e_5}{\text{Min}\{26 + 158, 158 + 10, 10 + 192\}} = \frac{1}{168} = 0.0059$$

$$0.0161 > 0.0059 > 0.0051 > 0.0041 > -0.0049$$

$$SI_3 > SI_5 > SI_4 > SI_1 > SI_2$$

### Apéndice G. Cálculos con Algoritmo de Palmer

Corrida 2:

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 57/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 174/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 56/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 189/2] = 139$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 107/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 123/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 11/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 71/2] = -110$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 165/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 54/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 169/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 132/2] = 8$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 188/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 200/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 136/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 53/2] = -234.5$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 13/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 125/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 69/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 50/2] = 27.5$$

$$SI_1 \geq SI_5 \geq SI_3 \geq SI_2 \geq SI_4$$

Corrida 3:

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 26/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 197/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 114/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 59/2] = 8$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 178/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 177/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 65/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 51/2] = -246.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 105/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 68/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 71/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 174/2] = 105$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 189/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 86/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 106/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 129/2] = -80$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 83/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 47/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 64/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 116/2] = 58$$

$$SI_3 \geq SI_5 \geq SI_1 \geq SI_4 \geq SI_2$$

*Corrida 4:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 37/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 57/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 161/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 91/2] = 133$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 84/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 169/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 183/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 31/2] = -72.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 22/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 39/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 173/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 135/2] = 236.5$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 40/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 115/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 67/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 56/2] = 0$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 125/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 15/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 137/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 192/2] = 161.5$$

$$SI_3 \geq SI_5 \geq SI_1 \geq SI_4 \geq SI_2$$

*Corrida 5:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 126/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 41/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 44/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 200/2] = 112.5$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 85/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 70/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 90/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 66/2] = -18.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 138/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 64/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 57/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 50/2] = -135.5$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 118/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 80/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 142/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 12/2] = -128$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 51/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 126/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 84/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 138/2] = 109.5$$

$$SI_1 \geq SI_5 \geq SI_2 \geq SI_4 \geq SI_3$$

*Corrida 6:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 12/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 31/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 52/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 155/2] = 225$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 90/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 68/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 75/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 198/2] = 165.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 165/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 50/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 11/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 119/2] = -88.5$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 38/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 167/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 61/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 63/2] = -15.5$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 193/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 105/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 150/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 140/2] = -57$$

$$SI_1 \geq SI_2 \geq SI_4 \geq SI_5 \geq SI_3$$

*Corrida 7:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 16/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 159/2] + [[4 - \\ (2 * 3 - 1)] * 85/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 96/2] = 83$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 183/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 124/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 121/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 123/2] = -91.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 103/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 109/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 181/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 73/2] = -9$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 13/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 89/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 131/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 139/2] = 210$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 22/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 17/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 21/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 23/2] = 3.5$$

$$SI_4 \geq SI_1 \geq SI_5 \geq SI_3 \geq SI_2$$

*Corrida 8:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 104/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 188/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 45/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 196/2] = 66.5$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 149/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 121/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 18/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 123/2] = -90.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 146/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 77/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 71/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 20/2] = -192$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 185/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 173/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 183/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 168/2] = -20.5$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 172/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 41/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 91/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 90/2] = -98$$

$$SI_1 \geq SI_4 \geq SI_2 \geq SI_5 \geq SI_3$$

*Corrida 9:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 32/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 178/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 133/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 64/2] = 25.5$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 91/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 53/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 68/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 27/2] = -88.5$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 131/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 112/2] + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 73/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 41/2] = -154.5$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 102/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 185/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 156/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 70/2] = -62.5$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 112/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 138/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 14/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 83/2] = -105.5$$

$$SI_1 \geq SI_4 \geq SI_2 \geq SI_5 \geq SI_3$$

*Corrida 10:*

$$SI_1 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 94/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 145/2] + [[4 - \\ (2 * 3 - 1)] * 99/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 172/2] = 94$$

$$SI_2 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 97/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 106/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 192/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 29/2] = -59$$

$$SI_3 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 75/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 13/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 49/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 87/2] = 36$$

$$SI_4 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 83/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 197/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 33/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 161/2] = 35$$

$$SI_5 = -[[4 - (2 * 1 - 1)] * 26/2] + [[4 - (2 * 2 - 1)] * 158/2] \\ + [[4 - (2 * 3 - 1)] * 10/2] + [[4 - (2 * 4 - 1)] * 192/2] = 175$$

$$SI_5 \geq SI_1 \geq SI_3 \geq SI_4 \geq SI_2$$