

Análisis del impacto en costos y tiempo, de diferentes políticas de tamaño de lote de proceso y transferencia en un sistema productivo tipo “Job Shop”

Deyvis Duvan Andres Ortiz Alviades

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Industrial

Director

Myriam Leonor Niño López

Doctora en Dirección y Administración de Empresas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería físico mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2020

### **Agradecimientos**

A Dios, porque a pesar de todos los inconvenientes que la vida nos tiene preparados, siempre ha estado a mi lado acompañándome y bendiciéndome.

A la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales junto con todos sus docentes, por años de excelente formación académica, profesional y personal.

De igual manera, deseo expresar mi profundo agradecimiento, a la profesora Myriam Leonor Niño López por haber confiado en mí dándome la oportunidad de participar en esta investigación; sin su apoyo, asesoría, confianza y paciencia este proyecto no tendría los resultados obtenidos.

Por último, quiero manifestar mi sincera gratitud hacia mi madre y mis hermanas, por su constante acompañamiento, confianza y afecto a lo largo de mi carrera profesional y personal; son ellas el motor de mi vida.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Generalidades del proyecto .....	15
1.1. Descripción y formulación del problema .....	15
1.2. Justificación de la investigación .....	18
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1. Objetivo general .....	19
1.3.2. Objetivos específicos.....	19
2. Fundamentación teórica.....	20
2.1. Sistemas de producción .....	20
2.1.1. Clasificación de los sistemas productivos .....	21
2.1.2. Decisiones en los sistemas de producción.....	22
2.2. Programación de operaciones.....	23
2.2.1. Estructura y notación de los problemas de programación de operaciones .....	23
2.3. Decisiones de dimensionamiento de lotes .....	27
2.3.1. Lotes de proceso .....	27
2.3.2. Lotes de transferencia.....	29
3. Estado del arte .....	30
4. Diseño de la investigación.....	37
4.1. Diseño experimental.....	37

4.1.1. Identificación y caracterización del problema de investigación.....	40
4.1.2. Elección de los factores y sus niveles.....	42
4.1.3. Selección de variables de respuesta.....	47
4.1.4. Elección del diseño experimental.....	53
4.2. Realización del experimento .....	55
4.2.1. Modelización del sistema productivo objeto de estudio.....	57
4.2.2. Parametrización del modelo .....	60
4.2.3. Procesamiento de los casos planteados .....	67
4.2.4. Resultados obtenidos.....	67
5. Análisis estadístico de los resultados .....	70
5.1. Análisis estadístico de la variable “mean flow time”.....	70
5.1.1. Análisis descriptivo .....	71
5.1.2. Análisis de varianza.....	79
5.1.3. Efectos simples y comparaciones múltiples .....	85
5.2. Análisis estadístico de la variables “costos totales” .....	93
5.2.1. Análisis descriptivo .....	94
5.2.2. Análisis de varianza.....	100
5.2.3. Efectos simples y comparaciones múltiples .....	105
6. Conclusiones.....	114
7. Recomendaciones .....	117
Referencias bibliográficas.....	119

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Cumplimiento de Objetivos</i> .....	14
Tabla 2. <i>Niveles política lote de proceso</i> .....	43
Tabla 3. <i>Niveles política lote de transferencia</i> .....	44
Tabla 4. <i>Niveles Demanda</i> .....	45
Tabla 5. <i>Niveles Factor Orden de productos</i> .....	46
Tabla 6. <i>Códigos variables de respuesta</i> .....	52
Tabla 7. <i>Nombre de los trabajos dentro del sistema productivo</i> .....	56
Tabla 8. <i>Nombre de las operaciones dentro del sistema productivo</i> .....	56
Tabla 9. <i>Nombre de las máquinas dentro del sistema productivo</i> .....	57
Tabla 10. <i>Coefficientes de los cuatro criterios de costos</i> .....	62
Tabla 11. <i>Parámetro de número de lote de proceso</i> .....	64
Tabla 12. <i>Respuesta obtenida – Tiempos promedio de flujo</i> .....	70
Tabla 13. <i>Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda básica</i> .....	77
Tabla 14. <i>Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda Básica x 100</i> .....	77
Tabla 15. <i>Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda Básica x 1000</i> .....	77
Tabla 16. <i>Análisis de Varianza – Mean Flow Time – Demanda Básica x 1000</i> .....	81
Tabla 17. <i>Análisis de efectos simples – Mean Flow Time: Loteproceso/Demanda</i> .....	86
Tabla 18. <i>Análisis de efectos simples – Mean Flow Time: Lotetransferencia/Demanda</i> .....	86

Tabla 19. <i>Comparaciones múltiples – Mean Flow Time: Loteprocreso/Demanda</i> .....	87
Tabla 20. <i>Comparaciones Múltiples – Mean Flow Time: Lotetransferencia/Demanda</i> .....	90
Tabla 21. <i>Intervalos de confianza – Mean Flow Time</i> .....	92
Tabla 22. <i>Resultados – Costos Totales promedio por unidad</i> .....	94
Tabla 23. <i>Estadístico descriptivos – Costo Total por unidad – Demanda básica</i> .....	96
Tabla 24. <i>Estadístico descriptivos Costo Total por unidad – Demanda básica x100</i> .....	97
Tabla 25. <i>Estadístico descriptivos Costo Total por unidad – Demanda básica x 1000</i> .....	97
Tabla 26. <i>Análisis de Varianza – Costo Total por unidad</i> .....	101
Tabla 27. <i>Análisis de efectos simples Costo Total por unidad: Loteprocreso/Demanda</i> .....	106
Tabla 28. <i>Análisis efectos simples Costo Total por unidad Loteprocreso/transferencia</i> .....	106
Tabla 29. <i>Comparaciones múltiples Costos Totales: Lote proceso /Demanda</i> .....	108
Tabla 30. <i>Comparaciones múltiples Costos Totales: Lote proceso /transferencia</i> .....	109
Tabla 31. <i>Intervalos de confianza Reducción de Costos Totales</i> .....	111

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Pautas generales para diseñar un experimento. ....	38
<i>Figura 2.</i> Configuración Productiva de análisis. ....	42
<i>Figura 3.</i> Modelo general del diseño experimental .....	53
<i>Figura 4.</i> Descripción del cálculo del parámetro TT para cada política de lote de transferencia. 62	
<i>Figura 5.</i> Gráfico de línea MFT Vs Lote de Transferencia – Demanda Básica.....	71
<i>Figura 6.</i> Gráfica línea MFT Vs Lote de Transferencia Demanda Básica x 100.....	72
<i>Figura 7.</i> Gráfica línea MFT Vs Lote de Transferencia Demanda Básica x 1000.....	72
<i>Figura 8.</i> Gráfica línea MFT Vs Política Lote de Proceso – Demanda Básica.....	74
<i>Figura 9.</i> Gráfica Línea MFT Vs Lote de Proceso – Demanda Básica x 100.....	75
<i>Figura 10.</i> Gráfica línea MFT Vs Lote de Proceso – Demanda Básica x 1000 .....	75
<i>Figura 11.</i> Gráfico de perfil – MFT: Lote de proceso/Demanda .....	83
<i>Figura 12.</i> Gráfico de perfil – MFT: Lote de transferencia/Demanda .....	84
<i>Figura 13.</i> Gráfico de línea Costo Total Vs lote de transferencia Demanda Básica.....	95
<i>Figura 14.</i> Gráfico de línea Costo Total Política lote de transferencia Demanda Básica x100 ..	95
<i>Figura 15.</i> Gráfico de línea Costo Total Política lote de transferencia Demanda Básica x1000 .	95
<i>Figura 16.</i> Gráfico de perfil Costo Total Promedio: Lote de proceso/Demanda .....	103
<i>Figura 17.</i> Gráfico de perfil Costo Total Promedio: Lote de proceso/Lote de transferencia ....	104

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Modelización de la secuenciación de operaciones en un sistema productivo por medio de la Programación Lineal Entera Mixta

Apéndice B. Modelización del problema en GAMS/Cplex

Apéndice C. Parámetro PL para cada uno de los 108 casos de estudio de cada variable de respuesta

Apéndice D. Parámetro TT para cada uno de los 108 casos de estudio

Apéndice E. Parámetros relacionados con los costos de transporte para uno de los 108 casos de estudio relacionados con la variable costos

Apéndice F. Ejemplo del informe de salida de GAMS/Cplex correspondientes a los casos A-2-1-1-01 y A-1-2-4-1-1

Apéndice G. Resultados obtenidos para cada una de las variables de estudio

Apéndice H. Pruebas de la interacción entre el factor mezcla y los factores principales para el “mean flow time”

Apéndice I. Verificación de los supuestos del análisis de varianza para el “mean flow time”

Apéndice J. Comparaciones múltiples con las pruebas Bonferroni y LSD para el “mean flow time”

Apéndice K. Pruebas de la interacción entre el factor mezcla y los factores principales para el “Costos Totales”

Apéndice L. Verificación de los supuestos del análisis de varianza para el “Costos Totales”

Apéndice M. Comparaciones múltiples con las pruebas Bonferroni y LSD para el “Costos Totales”

## Resumen

**Título:** Análisis del impacto en costos y tiempo, de diferentes políticas de tamaño de lote de proceso y transferencia en un sistema productivo tipo “job shop”\*

**Autor:** Deyvis Duvan Andres Ortiz Alviades\*\*

**Palabras Clave:** Lote de proceso, lotes de transferencia, costos, mean flow time, job shop, programación lineal entera mixta

**Descripción:** La presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto en términos de costos y tiempo de un sistema productivo tipo “job shop” cuando se utilizan tres políticas diferentes de lote de proceso en función de la demanda del sistema (igual a la demanda, igual a la mitad de la demanda e igual a la tercera parte de la demanda) y cuatro políticas diferentes de lote de transferencia (igual a lote de proceso, igual al lote de proceso adelantando el alistamiento en la máquina siguiente, igual a la mitad de lote de proceso y una política de lote de transferencia unitario).

Con el objetivo de entender el impacto de la estrategia de división de lotes en el sistema productivo, se utilizó un diseño experimental factorial con bloques; utilizando como factores la política de lote de proceso, la política de lote de transferencia y por último la demanda a la que estaba expuesto el sistema productivo. Adicional, se consideró como factor bloque la mezcla de productos dentro del proceso. Este diseño generó 208 situaciones de análisis diferentes, las cuales se formularon a través de un modelo de programación lineal entera mixta, llevados al lenguaje GAMS para utilizar como optimizador CPLEX y lograr la combinación factible óptima en cada situación.

Después del análisis de resultados, se concluyó que una estrategia adecuada de fraccionamiento de lotes tanto en los lotes de proceso como en los lotes de transferencia logra eficiencias en las variables de desempeño tanto de tiempo como de costos en los que incurre el sistema productivo. Sin embargo, la estrategia óptima estará en función del tamaño de la demanda a la que está expuesto el sistema y a la medida de eficiencia que se busca optimizar.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Myriam Leonor Niño López, Doctora en Dirección y Administración de Empresas

### Abstract

**Title:** impact analysis in terms of cost and time of different process and transfer batches policies in a "job shop" system production \*

**Author:** Deyvis Duvan Andres Ortiz Alviades \*\*

**Key Words:** Process batches, transfer batches, costs, mean flow time, job shop, mixed integer programming

**Description:** The objective of this research is to evaluate the impact in terms of costs and time of a Job shop productive system when three different process lot policies are used depending on the demand of the system (equal to the demand, equal to the half the demand and equal to a third of the demand) and four different transfer batch policies (equal to process batch, equal to process batch advancing enlistment on the next machine, equal to half process batch and a unit transfer lot policy).

In order to understand the impact of the batch splitting strategy on the production system, an experimental factorial block design was used; using as factors the process batch policy, the transfer batch policy and finally the demand to which the production system was exposed. Additionally, the product mix within the process was considered as a blocking factor. This design generated 208 different analysis situations, which were formulated through a mixed integer linear programming model, brought to the GAMS language to be used as a CPLEX optimizer and achieve the optimal feasible combination in each situation.

After analyzing the results, it was concluded that an adequate batch fractionation strategy in both the process batches and the transfer batches achieves efficiencies in the performance variables of both time and costs that the production system incurs. However, the optimal strategy will depend on the size of the demand to which the system is exposed and the efficiency measure that is sought to be optimized.

---

\* Degree Work

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. School of Industrial and Business studies. Industrial Engineering; Director: Myriam Leonor Niño López, PhD in Business Management and Administration

## **Introducción**

Las exigencias del mercado actual han obligado a las organizaciones a mejorar los niveles de productividad en todas las áreas de la organización, a fin de obtener estándares de desempeño superiores en términos de calidad, costos, cumplimiento de metas, rapidez en la entrega de productos o servicios y otras dimensiones competitivas que llevan a garantizar la satisfacción de los clientes. Bajo este contexto, la optimización de operaciones ha cobrado relevancia como un área fundamental para desempeñar una función eficiente dentro de las compañías; ya que esta se encarga del diseño, operación y optimización de cualquier proceso que genere y entregan valor a la empresa.

Las decisiones que se estudian dentro de la optimización de operaciones de una empresa, se pueden dividir como: Decisiones estratégicas, tácticas u operativas. Dentro de estas últimas decisiones encontramos decisiones que usualmente tienen impacto inminente en los procesos de cualquier empresa; y es la programación de operaciones, el área que se encarga de estudiar la asignación eficiente de recursos en cualquier sistema productivo.

Analizar y evaluar estrategias que permitan el diseño óptimo y eficiente sistemas productivos, es un reto vigente para cualquier tipo de empresa así como un objeto de investigación para la comunidad académica. Dentro de dichas estrategias para procesos productivos, se encuentra la opción de ajustar el tamaño de los lotes de proceso y de

transferencia en aras del lograr reducciones y eficiencias tanto en tiempos como costos de producción.

La presente investigación tiene como objetivo analizar el impacto en términos de costos y tiempos que ocasiona la utilización de políticas diferentes de tamaño de lote de proceso en función de la demanda (Igual a la demanda, igual a la mitad de la demanda e igual a la tercera parte de la demanda) y políticas diferentes de lote de transferencia (Igual al lote de proceso, igual al lote de proceso adelantando los tiempos de preparación, igual a la mitad del lote de proceso y unitario), sobre un sistema productivo tipo “Job Shop”. Adicional a las políticas de lote de proceso y lote de transferencia, se consideraron otras variables que impactan en el proceso como lo son: los tiempos de preparación en las máquinas y tamaños de la demanda (Demanda básica, demanda básica x100, demanda básica x1000), permitiendo analizar los resultados obtenidos bajo diferentes escenarios de utilización de recursos.

### Cumplimiento de objetivos

**Tabla 1.** *Cumplimiento de Objetivos*

Objetivo	Cumplimiento
Definir y estructurar el problema de loteo en sistemas productivos, en marco de la programación de operaciones a corto plazo, mediante la fundamentación teórica alrededor de dichos temas.	Capítulo 2
Documentar los conceptos y principales resultados, provenientes de investigaciones previas en el tema de la programación de operaciones y el problema de loteo.	Capítulo 3
Construir un diseño experimental que permita evaluar el impacto de las políticas de tamaño de lote de proceso y lote de transferencia para la configuración productiva objeto de estudio, en términos de costos y tiempos.	Capítulo 4.
Formular y describir el modelo de Programación Lineal Entera Mixta, que permita determinar el valor óptimo en las medidas de desempeño consideradas en el diseño experimental.	Capítulo 4.
Calcular los parámetros del modelo para cada una de las situaciones de análisis, previstas en el diseño experimental.	Capítulo 4.
Solucionar el modelo a través del programa informático GAMS y el optimizador CPLEX para cada situación de análisis	Capítulo 4.
Analizar estadísticamente los resultados obtenidos del diseño experimental, presentar conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.	Capítulo 5

## **1. Generalidades del proyecto**

### **1.1. Descripción y formulación del problema**

La alta competitividad a la que están expuestas las organizaciones en la actualidad, ha impulsado a que las compañías tengan como uno de los retos clave trabajar para mejorar la eficiencia de sus procesos y sistemas productivos. De acuerdo a esto, los gerentes y administradores ven en la administración de operaciones la herramienta clave para lograr obtener mayores niveles de eficiencia; ya que permite diseñar, controlar, mejorar y evaluar cualquier sistema productivo. Entre las decisiones más importantes y complejas de la administración de operaciones, se encuentran las relacionadas con la programación de operaciones, dado que ésta tiene una incidencia inmediata en el desempeño del sistema productivo y por ende en la eficiencia y eficacia de cualquier organización.

Morton y Pentigo (1993) definen la programación de operaciones como “el proceso de organizar, elegir y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias, para producir las salidas deseadas en los tiempos deseados, satisfaciendo a la vez un gran número de restricciones de tiempos y de relaciones entre actividades y recursos” (p.695). De acuerdo con lo anterior, la programación de operaciones se convierte en una actividad única, que no puede tratarse siempre de la misma manera; ya que depende tanto de las características y capacidades del sistema productivo así como la posibilidad de la organización de adquirir los recursos requeridos y la demanda que jalona el proceso.

Una de los focos dentro de la programación de operaciones es el estudio del tamaño óptimo o ideal de los lotes dentro de un sistema productivo; ya que a través de la consolidación de una política del tamaño de lote adecuada y ajusta al sistema productivo en particular puede lograr eficiencias importantes dentro del proceso detrás de reducción en recursos claves como tiempos y costos. Muchas organizaciones en la búsqueda de tener procesos más simples, usan un único tamaño de lote dentro de su sistema productivo; sin embargo, logran diferenciar entre el lote de proceso y el lote de transferencia muchas veces ha mostrado tener un impacto positivo en la búsqueda de eficiencias.

Dentro de los criterios a considerar para determinar el tamaño ideal de los lotes de proceso y lotes de transferencia se encuentran: tiempos de preparación de las máquinas para alistar un nuevo lote, tiempos de flujo de transportar un lote de una estación a otra, capacidad de almacenamiento y espera, capacidad del sistema productivo que de una manera u otra impactan los costos del sistema productivo y por ende su eficiencia. En innumerables ocasiones, los gerentes definir el tamaño del lote de proceso en función de los tiempos de preparación de las máquinas; ya que al tener tiempos de preparación elevados se considera eficiente disminuir el número de cambios de productos mediante la definición de un tamaño de lote de proceso de mayor tamaño; sin embargo, al aumentar de manera considerable el tamaño de este tipo de lotes se impacta los tiempos de flujo del tipo de producto, ocasionando tardanza en la entrega del trabajo en la siguiente operación. Por lo que si se desea configurar una política con lotes de proceso de gran tamaño, se busca lograr eficiencias que reduzcan los tiempos de flujo de una máquina a otra; como la segmentación en pequeños lotes de transferencia, que permita fabricar un lote de proceso de manera simultánea en diferentes máquinas. Sin embargo, al tener un mayor

número de transferencia detrás de pequeños lotes entre las máquinas se impactan la eficiencia del sistema al requerir de un control adecuado de los productos y transporte de los mismos entre una máquina y otra. Por lo que la definición de dichos tamaños va a requerir la consolidación de variables y características propias del sistema productivo y los objetivos de la organización.

Durante los últimos años, los estudios e investigaciones enfocados en solucionar esta disyuntiva se han dividido en dos grandes grupos; la mayoría buscan analizar el impacto que tendrían diferentes políticas de tamaños de lotes de proceso y/o transferencia en índices de evaluación claves de un sistema productivo, otros buscan resolver el reto de la determinación del tamaño del lote de proceso y/o transferencia mientras se determina el orden y programación dentro de cada uno de las máquinas o unidades que componen el sistema productivo.

Esta investigación se relaciona con los primeros estudios, ya que busca evaluar el impacto en tiempos y costos que tiene la utilización de diferentes tamaños de lotes de proceso y lotes de transferencia en un sistema productivos; analizando el desempeño del sistema a partir del uso de tres tipos de lotes de proceso y cuatro tipos de lote de transferencia; variando los niveles de demanda y las mezclas de productos. Para su desarrollo se utilizó como caso referente un taller de trabajo tipo “*Job Shop*”; en términos concretos se utilizó el sistema productivo propuesto por Demeulemeester y Herroelen (1996), tomando como medidas de desempeño el Tiempo medio de Flujo “*Mean Flow Time*” y los Costos Totales en los que incurre el sistema durante el procesamiento de los trabajos.

## 1.2. Justificación de la investigación

Uno de los principales retos que tienen los Ingenieros Industrial, es proporcionar estrategias o herramientas que permitan lograr una mayor eficiencia o productividad en distintos procesos o sistemas productivos; desde un estudio robusto a través de diseño de experimentos formales donde las recomendaciones provengan de análisis de datos formales y extrapolables a la realidad de las empresas actuales.

Analizar el comportamiento de un sistema productivo, usando diferentes escenarios, permite generar, crear y validar hallazgos y conceptos existentes sobre las estrategias usadas para optimizar dichos sistemas; por ejemplo, al estudiar el impacto del uso de diferentes políticas de lote de proceso y lotes de transferencia en medidas de desempeño clave para cualquier organización permiten generar recomendaciones sobre la política o estrategia óptima para maximizar el desempeño de la organización, facilitando la mejora continua de las empresas así como servir de base para futuras investigaciones.

El caso de interés en esta investigación dentro de la programación de operaciones que permite determinar el impacto de usar distintos tamaños de lote de proceso y/o transferencia, ha sido estudiado en menor medida que la programación del orden y asignación de máquinas.

Adicional, en esta investigación se utilizará un sistema de productivo con un mayor grado de complejidad a usados en estudios anteriores; al utilizar más de una máquina, más de un tipo de producto, que permite la configuración distintos orden de uso de las máquinas y flujo de productos y utilizando tiempos de preparación. Además para evaluar el impacto del tamaño del

lote de proceso y/o transferencia en la mayoría de los estudios se consideraba una única medida de desempeño, generalmente relacionadas con los tiempos de finalización de producción y no realizaron pruebas estadísticas formales para determinar la significancia de las observaciones.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, serán de utilidad para los académicos, así como para diferentes empresas con el fin de extrapolar sus conclusiones a casos prácticos en el mundo industrial; y contar con información cuantitativa y extrapolable en el área de la toma de decisiones relacionadas con la programación de operaciones y el problema del dimensionamiento de lotes.

### **1.3. Objetivos**

**1.3.1. Objetivo General.** Analizar el impacto en costos y tiempo, que tienen diferentes políticas de tamaño de lote de proceso y de transferencia en un sistema productivo tipo “Job Shop”.

**1.3.2. Objetivos Específicos.** Definir y estructurar el problema de loteo en sistemas productivos, en marco de la programación de operaciones a corto plazo, mediante la fundamentación teórica alrededor de dichos temas.

Documentar los conceptos y principales resultados, provenientes de investigaciones previas en el tema de la programación de operaciones y el problema de loteo.

Construir un diseño experimental que permita evaluar el impacto de las políticas de tamaño de lote de proceso y lote de transferencia para la configuración productiva objeto de estudio, en términos de costos y tiempos.

Formular y describir el modelo de Programación Lineal Entera Mixta, que permita determinar el valor óptimo en las medidas de desempeño consideradas en el diseño experimental.

Calcular los parámetros del modelo para cada una de las situaciones de análisis, previstas en el diseño experimental.

Solucionar el modelo a través del programa informático GAMS y el optimizador CPLEX para cada situación de análisis.

Analizar estadísticamente los resultados obtenidos del diseño experimental, presentar conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

## **2. Fundamentación teórica**

### **2.1. Sistemas de producción**

Una de las definiciones de la teoría general de sistemas dice que los sistemas se identifican como conjuntos de elementos o entidades que guardan estrechas relaciones entre sí y que mantienen al sistema directo o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo, por ejemplo, optimizar la producción.

Un sistema puede ser abierto o cerrado. Los sistemas cerrados (o mecánicos) funcionan de acuerdo con predeterminadas relaciones de causa y efecto y mantienen un intercambio predeterminado también con el ambiente, donde determinadas entradas producen determinadas

salidas. En cambio un sistema abierto (orgánico) funcionan dentro de relaciones causa-efecto desconocidas e indeterminadas y mantienen un intercambio intenso con el ambiente.

En la realidad, las empresas son sistemas completamente abiertos con sus respectivas dificultades; Las empresas importan recursos a través de sus entradas, procesan y transforman esos recursos y exportan el resultado de ese procesamiento y transformación de regreso al ambiente a través de sus salidas.

La relación entradas/salidas indica la eficiencia del sistema. Un sistema de producción es entonces la manera en que se lleva a cabo la entrada de las materias primas (que pueden ser materiales, información, etc.) así como el proceso dentro de la empresa para transformar los materiales y así obtener un producto terminado para la entrega de los mismos a los clientes o consumidores, teniendo en cuenta un control adecuado del mismo.

**2.1.1. Clasificación de los sistemas productivos.** Los sistemas de producción se pueden clasificar según diferentes criterios, por ejemplo: Schroeder (1992) clasifica los sistemas productivos de acuerdo al flujo del producto; éste enfoque se relaciona con el volumen de producción y la variedad de productos. Existen tres tipos de flujo: continuo, intermitente y por proyectos. Así como existen diferencias en el tipo de flujo dentro de los sistemas productivos, también varía la forma como se programan las operaciones dentro de ellos.

**2.1.2. Decisiones en los sistemas de producción.** A lo largo de la historia, los enfoques de la planeación en los sistemas de producción han cambiado, y hoy se trabaja con una orientación hacia la Planeación Jerárquica de la Producción. Este proceso de Planeación está sustentado en una serie de decisiones interrelacionadas que deben tomarse al interior de la organización para marcar el camino a seguir y de esta manera fortalecer su posición en el mercado. No todos los individuos están encargados de tomar las decisiones, y no todas las decisiones se deben tomar para los mismos horizontes de tiempo. En primer lugar, las decisiones que corresponden a los altos niveles administrativos son las decisiones estratégicas; éstas de manera general marcan el rumbo de la organización, se fundamentan en la forma como la empresa desea llegar a los clientes y deben seguir los lineamientos definidos por la estrategia corporativa, por lo tanto, son decisiones tomadas para horizontes de largo plazo.

El nivel administrativo medio se encarga de tomar las decisiones tácticas, es aquí donde se lleva a cabo la planeación agregada; estas decisiones definen los niveles de producción en unidades agregadas, que son necesarios para cumplir lo establecido por las decisiones estratégicas. Aquí se determina, por ejemplo, el número de operarios y el momento en que serán necesarios, el nivel de inventario y el nivel de utilización de la planta.

Finalmente, el nivel administrativo bajo se encarga de las decisiones operacionales de planeación y control de la producción. Estas decisiones son de corto plazo y definen el programa final de operaciones adecuado para el cumplimiento de las metas que han sido precisadas en los niveles superiores.

## **2.2. Programación de Operaciones**

Díez (1982) enuncia el problema de la programación de operaciones como aquel que investiga una secuencia óptima, o en su defecto lo más próxima posible, para procesar  $n$  artículos en  $m$  máquinas, siendo el óptimo aquella secuencia que minimiza el tiempo total de ejecución. Por otra parte, Companys y Corominas (1996) exponen que “la idea es que  $n$  piezas deben realizarse en  $m$  máquinas. La realización de cada pieza consiste en someterla a una serie de operaciones prefijadas; cada operación está asignada a una máquina concreta y tiene una duración determinada conocida. Debe establecerse un programa, es decir, la secuencia de operaciones en cada máquina, que optimice un cierto índice de eficacia” (p.24). En términos generales, la idea es optimizar alguna medida de eficacia relacionada con el desempeño del taller cuando se define el programa de operaciones.

Pinedo (1995), habla sobre las características de escasez que tienen los recursos en los sistemas productivos reales y aclara que la meta de este problema es buscar la optimización de uno o más objetivos.

**2.2.1. Estructura y notación de los problemas programación de operaciones.** Para delimitar un problema dentro de la programación de operaciones usualmente se usan algunos términos claves para caracterizar la configuración productiva. Con el objetivo de estandarizar los conceptos claves para la presente investigación, se relacionan los más relevantes:

- Trabajo: Cantidades(es) de producto que serán facturadas en cada una de las máquinas dentro del sistema productivo.

- Máquina: Recurso usado para llevar a cabo la fabricación de los productos.
- Operación: Actividad a la que debe ser sometida el producto en una máquina.
- Ruta: Flujo que sigue el trabajo dentro del sistema productivo.
- Tiempo de ejecución: Tiempo requerido para realizar una operación en una máquina
- Tiempo de preparación: Tiempo requerido para preparar la máquina una vez termina una operación e inicia otra.

Debido al gran número de trabajos que se han realizado en el campo de la programación de operaciones, con el tiempo se ha desarrollado una notación particular que sirve para identificar los diversos casos que existen. Esta notación resume las características más importantes de los sistemas productivos que se estudian y ha apoyado la identificación rápida de los modelos. Pinedo (1995) en su libro presenta una adaptación de la notación antes mencionada de la siguiente forma  $\alpha / \beta / \gamma$ ,

Campo  $\alpha$ : Describe el ambiente de la máquina dentro del sistema productivo. Algunas de las especificaciones que se pueden encontrar en el campo  $\alpha$  son:

(1) una máquina: todos los trabajos se realizan en una sola máquina.

(Pm) Máquina paralelas idénticas: hay m máquinas idénticas en paralelo. Los trabajos pueden ser procesados en cualquiera de las m máquinas.

(Qm) Máquinas en paralelo con diferentes velocidades: hay m máquinas en paralelo con diferentes velocidades  $v_i$ . La velocidad de las máquinas no depende del trabajo que ésta esté procesando.

(Rm) Máquinas en paralelo no-relacionadas: al igual que el caso anterior, las máquinas están en paralelo y tienen diferentes velocidades, pero ahora las velocidades dependen del trabajo que las máquinas estén procesando.

(Fm) Flow Shop: hay  $m$  máquinas idénticas en serie. Para el desarrollo de las operaciones, los trabajos tienen la misma secuencia de uso de las máquinas. Una vez que un trabajo ha terminado de ser procesado en una máquina, sigue su camino y se une a la línea de espera de la máquina siguiente.

(FFc) Flow Shop Flexible: este es una generalización de los casos Flow shop y máquinas en paralelo. Aquí en lugar de existir  $m$  máquinas en serie, hay  $c$  etapas en serie, dentro de las cuales se ubican máquinas idénticas en paralelo. Un trabajo pasa de etapa en etapa y en cada una es procesado por una sola máquina, sin importar cuál sea.

(Fm) Job Shop: Hay  $m$  máquinas ubicadas en el taller. Cada producto sigue su propia secuencia de uso en las máquinas.

(FJc) Job Shop Flexible: Este caso también es una generalización de otros dos: Job Shop y de las máquinas en paralelo. Aquí en lugar de  $m$  máquinas, hay  $c$  etapas dentro de las cuales hay dispuestas máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo pasa por las etapas de acuerdo a su propia secuencia; y dentro de ellas es procesado por una sola máquina, sin importar cuál sea.

Campo  $\beta$ : describe características sobre el procesamiento de los trabajos y algunas restricciones que presenta el sistema. Puede contener más de una entrada de acuerdo a las particularidades de la configuración productiva. Algunas de las entradas son:

(Sjk) Tiempos de preparación dependientes de la secuencia: indica que los tiempos de preparación de las máquinas dependen de la secuencia establecida para los trabajos.

(prmp) Interrupciones: se permite interrumpir el procesamiento de un trabajo en una máquina si llega otro de mayor prioridad.

(prmu) permutación: indica que la regla para dar prioridad a las colas frente a una máquina está dada por la disciplina FIFO (Primero en llegar, primero en ser servido).

( $p_j = p$ ) Todos los tiempos de procesamiento son iguales.

( $d_j = d$ ) Todas las fechas de entrega son las mismas.

Campo  $\gamma$ : identifica el objetivo que debe ser optimizado en el problema de la programación de operaciones. Algunos de estos objetivos son:

(Cmax) Makespan: es el instante de salida de la última pieza del taller.

(Fmed) Mean Flow Time: tiempo de medio de permanencia de un trabajo en el taller.

(Lmax) Máximo retraso: mide la peor violación de las fechas comprometidas.

Los problemas de programación de operaciones también pueden clasificarse como determinísticos o estocásticos. En los modelos determinísticos no se presentan variaciones en los elementos que integran el problema. Por el contrario, en los modelos estocásticos dichos elementos tiene un comportamiento probabilístico.

### **2.3. Decisiones de dimensionamiento de lotes**

En la mayoría de las empresas tradicionales, en sus sistemas productivos se trabaja con un único tamaño de lote; sin embargo, con el avance de los estudios en la investigación de operaciones se han recomendado la utilización de lotes de proceso y su segmentación en lotes de menor tamaño para su transferencia entre las máquinas del sistema.

La determinación de las unidades que deberían definir dichas clases de lotes está en función de diferentes criterios que impactan al sistema productivo, tales como; # de máquinas en el sistema, tiempos de preparación de las máquinas, tiempos de transporte, capacidad de inventario entre máquina, manejo y control de los materiales, capacidad total de la operación, demanda del sistema entre otros.

**2.3.1. Lotes de Proceso.** Cantidad de piezas fabricadas en una misma máquina como resultado de una sola preparación y operación de dicha máquina; es decir, es la cantidad de producto que se elabora en la máquina antes de prepararla para fabricar otro producto.

Hopp y Spearman (2001) proponen una clasificación de los lotes de proceso en dos tipos: Lotes de proceso en serie y lotes de proceso en paralelo. Los lotes en serie son aquellas unidades de producto de un mismo trabajo que se requieren facturar en una máquina antes de que esta deba ser preparada para facturar otro tipo de producto; por otra parte los lotes en series son unidades de producto de distintos trabajos que pueden ser producidas en la máquina sin realizar ningún tipo de alistamiento o preparación de dicha máquina. Sin embargo, estos últimos tipo de

lote de proceso se presentan con baja probabilidad en los procesos de producción actuales; por lo que la determinación del tamaño de lote de proceso (en serie) queda principalmente en función del tiempo y costos de preparación de las máquinas del sistema productivo; por ejemplo, si se cuenta con altos tiempos y costos de preparación de máquinas se tiende a preferir tamaños de lote de proceso de gran tamaño para optimizar la producción de trabajos dentro del sistema al lograr una mayor producción o uso de las máquinas en producción de trabajos y minimizando el tiempo “muerto” y los costos generados detrás del alistamiento de máquinas.

Ahora bien, tener lotes de proceso de gran tamaño no siempre es beneficioso para los estándares de desempeño de los sistemas productivos; ya que al tener lotes de proceso con un gran número de unidades impacta en los tiempos de flujo de los trabajos entre las máquinas del sistema productivo, ocasionando altos niveles de inventarios entre las máquinas y largos tiempos de espera “tiempo muerto” de las máquinas subsiguientes que tengan tiempos de producción menores.

Los directores y gerentes de producción se encuentran expuestos a este tipo de disyuntivas en su día a día; por lo que tienen que considerar las particularidades de sus sistemas productivos: tiempos y costos de preparación, capacidad de contener inventario entre las máquinas del sistema, producción de productos de manera simultánea entre distintas máquinas; así como los objetivos generales del sistema productivo. Hopp y Spearman (2001) en su libro *Factory Physics* enuncian tres criterios relevantes a tener en cuenta para calcular el tamaño de lotes de proceso dentro de procesos productivos que incurran en tiempos y costos elevados de alistamiento de máquinas:

El tamaño mínimo para el lote de proceso que origina un sistema estable puede ser más grande que uno.

A medida que el tamaño del lote de proceso crece, el tiempo de ciclo se incrementa de manera proporcional con él

El tiempo de ciclo en una estación de trabajo puede ser minimizado para algunos tamaños de lote de proceso diferentes a uno (p.306).

De acuerdo a lo anterior, se recomienda el uso de lotes de proceso de mayor tamaño dentro de sistemas productivos que incurran en altos tiempos y costos de alistamiento de las máquinas y se tiene el objetivo de incrementar la eficiencia del proceso productivo a través de la mitigación de tiempos de preparación de las unidades de trabajo; pero contando con la posibilidad de tener un control y manejo eficiente de los materiales entre las unidades de trabajo y lo posibilidad de mitigar el efecto de las altas filas de espera.

**2.3.2. Lotes de Transferencia.** Se definen como unidades de productos de un mismo trabajo que se transporte de manera simultánea entre las máquinas o unidades de trabajo. El tamaño del lote de transferencia puede ser igual o menor al lote de proceso dependiendo de las características y objetivos del sistema productivo.

Hopp y Spearman (2001) afirman que “Los tiempos de ciclo en un segmento de la ruta son proporcionales a los tamaños de lote de transferencia usados en ese segmento, siempre que

no haya que esperar por los recursos encargados del transporte de las piezas” (p.312). De lo que se entiende que si en un sistema productivo se pretende reducir los tiempos de flujo se deberían disminuir el tamaño de los lotes de transferencia, diferenciando su tamaño del tamaño del lote de proceso; este tipo de estrategias se conoce como fraccionamiento de lotes.

La principal ventaja de programar lotes de transferencia de menor tamaño que los lotes de proceso permiten mejorar los tiempos de ciclo o flujo del sistema productivo al mitigar los tiempos muertos de las máquinas al utilizar en mayor medida las máquinas y reducir las unidades productivas de inventario en proceso.

### **3. Estado del arte**

Las estrategias de fraccionamiento de lotes han sido investigadas por diferentes autores, como una profundización dentro de los problemas de programación de operaciones a los que se enfrentan diferentes sistemas productivos. En el presente capítulo, se presentará una breve revisión de las investigaciones más recientes que trataron de analizar el impacto de la estrategia de lot splitting.

Uno de los primeros investigadores que analizaron el impacto de las estrategias de lot splitting en un sistema productivo fue Karmakar, quien estudiaba el impacto de operar bajo diferentes tamaños de lote de proceso en un sistema productivo con una sola máquina teniendo como medida de desempeño los tiempos de ciclo de producto en la máquina en 1983. En años posteriores, este mismo autor analizó sistemas de mayor complejidad en términos de un mayor número de máquinas dentro del sistema productivo el impacto en los tiempos de flujo y el inventario dentro del proceso productivo al utilizar diferentes políticas de lote de proceso.

La división del lote de proceso en lotes de menor tamaño denominados lotes de transferencia se introdujo en estudios realizados por Jacobs y Braggs (1988) mediante el estudio de lotes repetitivos, que no eran más que lotes de transferencia donde el transporte de material se hace a la siguiente operación o máquina únicamente cuando la fabricación del lote repetitivo se termina. Los autores concluyen que los tiempos de flujo de los productos se logran reducir mediante la división de los lotes de proceso especialmente en sistemas productivos expuestos a un alto volumen de demanda de productos.

El estudio del fraccionamiento de los lotes de proceso dentro de sistemas productivos de mayor complejidad fue analizado por Kropp y Smutt (1990) donde buscaron analizar el impacto de diferentes políticas de lote de transferencia en el tiempo medio de flujo de los productos usando tiempos de preparación diferentes; para esto utilizaron un diseño experimenta, donde el número de particiones del lote de proceso, el número de máquinas y el tiempo de preparación de las máquinas fueron los factores usados. Los autores afirman que cada una de las variables analizadas tiene un efecto en el tiempo de flujo de productos y se logra una reducción en la misma al dividir los lotes de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño.

Posteriormente, Benjaafar (1996) estudio el impacto de dividir los lotes de proceso en lotes de transferencia trabajando sobre el modelo propuesto por Karmakar en 1983. El autor demostró que el tamaño del lote de proceso y el uso de lotes de transferencia en el sistema productivo tienen un impacto en el tiempo medio de flujo. Para sistemas donde el lote de proceso es muy grande, el tiempo de procesamiento aumenta y eleva la capacidad de producción del sistema pero también aumenta el tiempo medio de flujo si no se cuenta con una política de fraccionamiento de dichos lotes en lotes de menor tamaño que se transfieran de una máquina a otra sin necesidad de esperar la terminación de los trabajos en la operación anterior. Sin embargo, también evidenció que la división del lote de proceso en lotes de transferencia unitarios debería evitarse ya que en sistemas productivos reales, cuando se elige este tipo de fraccionamiento impacta de manera importante el manejo de materiales entre las unidades de trabajo generando demoras en el sistema y pérdida de material.

Adicionalmente, el autor recomienda que para determinar la combinación óptima entre lotes de proceso y lotes de transferencia se requiere analizar a mayor detalle la capacidad y propiedades del sistema productivo.

Demeulemeester y Herroelen (1996) investigaron un caso de programación de operaciones, con el uso de diferentes tamaños de lote de proceso y lote de transferencia solucionando a través de Redes. Los autores concluyen que al reducir el tamaño de lote de transferencia siempre tiene un impacto directo y positivo en la disminución del makespan en el sistema analizado.

Drexler y Kimms (1997) concluyen que existe bajo nivel de conocimiento dentro de la evaluación del impacto de las estrategias de loteo en la programación de operaciones de sistemas productivos al construir un estado del arte en dicho tema.

En 1997, se estudiaron el impacto del uso de estrategias de lot splitting en sistemas productivos multiproducto; recomendando la conveniencia de procesar los trabajos en lotes mayores a uno cuando los tiempos de preparación son altos, sin sobrepasar la división de lotes dentro del sistema, ya que al incrementar el número de lotes el desempeño de las medidas de tiempo se ven afectadas.

Langevin y Riopel (1999) desarrollaron un modelo para identificar el tamaño de lote de transferencia que minimiza el costo total de producción en diferentes sistemas productivos. El modelo consideraba diferentes tipos de costos relacionados con las decisiones de loteo: el costo de manejo de materiales, el costo de transporte de productos y el costo de inutilización de las máquinas. La mayor contribución de esta investigación con respecto a investigaciones previas es que considera costos relevantes involucrados en la decisión del tamaño de lote de transferencia. Además, se comparó el costo total del lote de transferencia óptimo generado por el modelo con el costo de utilizar lotes de transferencia unitarios y de igual tamaño al lote de proceso, encontrando que el método propuesto en el estudio proporciona menores costos totales. Concluyen que, al requerir un solo tipo de pieza, el tamaño de lote de transferencia ideal es la

derivada de la sumatoria de cada uno de los costos en los que incurre el sistema. Por otra parte, cuando se requiere dos o más tipos de trabajos, mencionan que se complejiza el proceso de programación de operaciones por lo que proponen un sistema sin interrupciones como modelo de estudio en futuras investigaciones. El aporte más significativo de esta investigación es que dejaron una base sobre el proceso requerido para calcular el tamaño ideal de los lotes de transferencia revisando el impacto en una medida de desempeño relacionada con los costos de producción y no con tiempos.

Chinyao, Chih-Ming y Kay-I (2004) analizaron los beneficios detrás de la división de trabajos en pequeños lotes de transferencia dentro de un sistema productivo tipo “Job Shop” considerando un problema de secuenciación con el objetivo de minimizar el “makespan”; donde los tiempos de preparación fueron considerados. Para examinar la influencia de la división de trabajos en lotes de transferencia, los autores generaron dos experimentos de simulación donde se consideraron 4 ambientes diferentes de manufactura (variando el número de productos y el número de máquinas); el primer experimento, buscaba evaluar la influencia de lotes de transferencia de igual y diferente tamaño sobre la minimización de la variable objetivo, para esto consideraron cinco casos donde el trabajo se podía dividir sólo en dos partes; en los dos primeros casos el lote de transferencia inicial era de menor tamaño que el final, en el tercer caso los dos lotes de transferencia tenían igual tamaño, y en los dos últimos casos el lote inicial era de mayor tamaño al lote final. El segundo experimento, tenía como objetivo evaluar la influencia del número de lotes de transferencia sobre la minimización de la variable objetivo; para esto consideraron de cuatro casos donde, en el primer caso no se permitía la división del trabajo en lotes de transferencia, en el segundo se permitía la división en dos lotes, el tercer caso en tres lotes y el cuarto en cuatro lotes. Al finalizar el experimento los autores concluyen: 1) la división del trabajo en lotes de transferencia de igual tamaño provee un mejor beneficio en término de tiempo –un menor “makespan”- que dividir el trabajo en lotes de transferencia de diferente tamaño. 2) Dividir el trabajo en lotes de proceso provee mejores beneficios que el caso donde no se permite la división en lotes para todos los casos analizados; sin embargo el porcentaje de mejora sobre el caso donde no se permite la división en lotes disminuía a medida que el número de división permitido de lotes aumentaba.

Chiu y Chang (2005) desarrollaron dos modelos de optimización de costos para resolver el problema de división de lotes de proceso en lotes de transferencia en un sistema tipo flow shop; donde de cada máquina sólo existe una unidad y se producía un único tipo de trabajo. El objetivo de los dos modelos era determinar el número óptimo de lotes de transferencia en los cuales se dividía el lote de proceso que minimizará los costos totales. En el primer modelo propuesto, los autores consideraron cuatro componentes dentro del Costo total: costos de preparación de máquinas, costos relacionados con el movimiento de lotes dentro del sistema, costos relacionados con el inventario de producto en proceso y producto terminado y los costos relacionados con la entrega del producto terminado. El segundo modelo propuesto, no sólo incluía los cuatro criterios de costos del primer modelo, sino que también consideraba unos costos relacionados con el tiempo de salida de la última pieza en el sistema "Makespan". El objetivo de su investigación era explorar el efecto que se causaba sobre la solución óptima cuando se modificaban los parámetros de los cinco tipos de costos evaluados; para esto desarrollaron un experimento que constaba de tres fases: la primera fase tenía como objetivo explorar el efecto de cambiar bajo una misma razón de crecimiento el valor del costo por unidad de tiempo sobre la solución óptima del segundo modelo para lo cual crearon 10 casos de análisis. La segunda fase se proponía analizar el efecto sobre la solución óptima al cambiar bajo una misma razón de crecimiento el valor del costos para cada uno de los cuatro criterios utilizados en el modelo inicial, evaluando 10 casos distintos para cada criterio; y por último, la tercera fase tenía como propósito evaluar el impacto sobre la solución óptima al variar el costo por unidad de tiempo en los dos modelos considerados, utilizando para esto de nuevo 10 casos distintos de análisis. Con los resultados obtenidos al terminar el experimento, los autores concluyen a través de un análisis descriptivo de los resultados, que la variación de los parámetros de los costos de mantener los inventarios, preparación de máquinas y unidad de tiempo de procesamiento (makespan) tenían mayor impacto sobre la solución óptima que la variación de los parámetros de los costos relacionados con el movimiento de los lotes y la entrega de producto terminado. Al cierre del estudio, recomiendan utilizar un diseño factorial más detallado para analizar el efecto sobre la solución óptima de cada criterio de costos del modelo, cuando se cambian de manera simultánea los valores de dos o más parámetros relacionados.

En el año 2008, Chinyao y Yuling (2008) consideraron un problema de programación en donde cada trabajo dentro del sistema podía ser dividido en varios sub-lotes de proceso, los cuales necesitan ser procesados en una sola máquina, incurriendo en tiempo por preparación de las máquinas cuando había un cambio de procesamiento de un lote de un tipo de trabajo a un lote de otro tipo de trabajo. El objetivo de su investigación era desarrollar un modelo que permitiera minimizar las penalidades por terminación de los trabajos tanto después de la fecha estipulada de entrega, como antes de dicha entrega; para esto los autores propusieron dos enfoques de solución, la primera mediante un modelo de optimización matemática el cual era efectivo para sistemas con un número pequeño de trabajos ( $<10$ ) y un segundo enfoque de solución basado en el desarrollo de una heurística para sistemas con un número mayor de trabajos ( $\geq 10$ ). Durante su estudio, los autores analizaron el impacto que tenía dividir los trabajos en varios lotes de proceso bajo cuatro escenarios diferentes; cada escenario se mostraba un peso del tiempo de preparación de las máquinas diferente sobre el tiempo total de procesamiento ( $1/8, 1/4, 1/2$  e igual a 1); encontrando que la estrategia de dividir los trabajos en lotes de proceso sólo tenía beneficio sobre la variable objetivo (Penalidad de terminación temprana y tardía de los trabajos) en las situaciones donde el tiempo de preparación representaba menos del 25% del tiempo total de procesamiento requerido por un trabajo.

Luego en el mismo año, Sarin, Kalir y Chen (2008) estudiaron un sistema de manufactura tipo “flow shop” con varias máquinas, donde existía un único trabajo susceptible a ser dividido en lotes más pequeños de transferencia y el objetivo era determinar el número óptimo de lotes a dividir el trabajo que minimizará una función objetivo unificada de costos que contenía criterios pertenecientes a el instante de salida de la última pieza del sistema “makespan”, el tiempo medio de flujo, el tiempo que se mantenía inventario en proceso en el sistema, los de preparación de las máquinas y las transferencia de los lotes. Para esto propusieron un procedimiento de solución que era eficaz en la creación de soluciones cercanas a la óptima; luego propusieron un experimento de simulación para diferentes número de máquinas y presentaron resultados sobre el impacto relativo de la importancia (costos marginales) de cada uno de los criterios utilizados dentro de la función objetivo, mostrando que el tiempo que se mantenía el inventario de producto

en proceso dentro del sistema disminuía a medida que aumentaba el número de sublotes; mientras que el número de preparaciones y transferencia de lotes aumentaba. El “makespan” primero decrecía y luego aumentaba con el incremento de número de lotes en el sistema; asimismo encontraron que el criterio relacionado con el tiempo medio de flujo era el que mostraba una mayor sensibilidad (mayor marginalidad) sobre la medida objetivo total que los demás criterios.

Galeano (2008) analizó en términos del “makespan” y el “mean flow time” el comportamiento de un sistema productivo tipo “flow shop” cuando se utilizan cuatro políticas diferentes de tamaño de lote de transferencia. Para el desarrollo de su investigación, Galeano formuló un diseño experimental factorial con bloques; utilizando como factores principales la política de tamaño de lote de transferencia y la demanda agregada; además definió como factor bloque la mezcla de los productos. El análisis estadístico de la información le permitió demostrar que la utilización de los lotes de transferencia mejora el desempeño del sistema productivo. En los casos analizados, el traslado de las piezas en lotes de igual tamaño al lote de proceso, retrasó considerablemente la terminación de los trabajos y su flujo a través del sistema, mientras que la utilización de lotes de transferencia unitarios fue la que generó el mejor desempeño. Sin embargo, debido a la influencia de los tiempos de preparación, las reducciones observadas en las medidas de desempeño no eran igualmente significativas en todos los niveles de demanda, por lo cual, la autora concluye que la selección de la política más conveniente, depende de la cantidad de productos que se fabriquen dentro del sistema.

Huang (2010) formuló un modelo de secuenciación que buscaba determinar el número posible de lotes de transferencia mientras se minimizaba la función objetivo “Costos”; dicha función incluía criterios de costos relacionados con la estrategia de “lot splitting”: el costo de inventario de producto en proceso, el costo de tiempo ocioso de las máquinas y el costo de transporte de lotes dentro del sistema; donde el costo de inventario de producto en proceso era estimado a través del tiempo de flujo, el costo por tiempo ocioso de las máquinas a través del tiempo ocioso de las máquinas y costos de transporte a partir del número de veces que se transportaba un lote. En pequeños problemas (hasta 6 máquinas y 6 trabajos); el autor utilizó

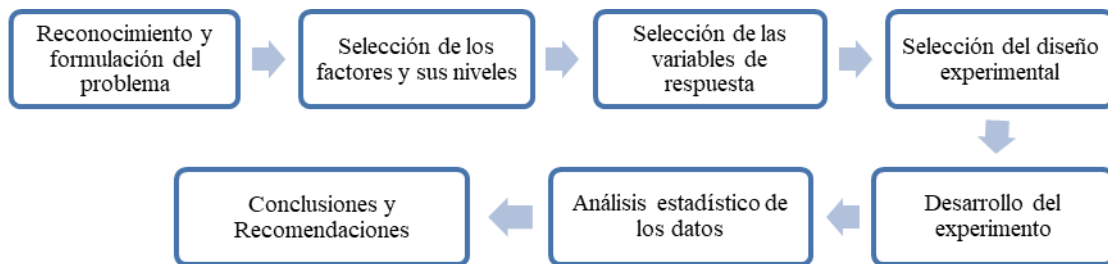
LINGO como software de optimización y utilizó dichos pequeños problemas para evaluar la eficiencia de un método heurístico utilizado para la solución de problemas de mayor complejidad, encontrando eficiencias de 88%. Asimismo, el autor propuso un experimento de simulación (13 casos) para indagar el beneficio de la división en lotes de transferencia; iniciando con un sistema de 3 máquinas y 3 trabajos hasta un sistema de 15 máquinas y 15 trabajos (13 en total). Al finalizar el experimento, el autor concluye que el tiempo de flujo y el tiempo ocioso de las máquinas decrecen a medida que aumenta el número de lotes en el sistema. Asimismo, manifestó que la disminución de los costos relacionados con el tiempo de flujo y el costo de tiempo ocioso era contrarrestada con el incremento de los costos de transporte a medida que aumentaba el número de lotes en el sistema; finalizando con la recomendación de desarrollar un experimento factorial formal para determinar la significancia de sus observaciones, basándose en el modelo de solución desarrollado.

En la mayoría de los estudios analizados los autores llegaron a las conclusiones obtenidas sólo usando los datos; sin la inclusión de un análisis estadístico robusto que permitiera determinar la veracidad de los resultados.

## **4. Diseño de la Investigación**

### **4.1. Diseño Experimental**

La metodología de investigación que se empleó en la presente investigación se basa en la estrategia expuesta por Montgomery (2002) y se ilustra en la siguiente figura.



*Figura 1.* Pautas generales para diseñar un experimento.

Nota: Adaptada de Diseño y Análisis de Experimentos. Montgomery (2002). Ed 2 México: Limusa Wiley

Esta metodología nos permite evaluar el impacto en costos y tiempos, como medidas de desempeño; usando distintas políticas para el tamaño de lote de proceso y de transferencia en un proceso productivo tipo “Job Shop” a través de una planeación de actividades para la recolección de información, para llegar a conclusiones y recomendaciones basadas en un análisis robusto de la información. Este enfoque divide la investigación en siete etapas:

Etapa 1. Reconocimiento y Formulación del problema: La caracterización, formulación y delimitación del problema es la base para lograr el éxito en la investigación planteada; se debe partir de la fundamentación teórica de los conceptos y definiciones claves para el problema planteado y el estado del arte en investigaciones sobre el objeto de estudio que permitan formular claramente el problema.

Etapa 2. Selección de los factores y sus niveles: Se denomina factores a todas aquellas variables que afectan el desempeño del proceso o sistema a estudiar; en esta fase se deben identificar y enumerar cada una de las variables; así como sus niveles que se conocen como las

número limitado de valores posibles que puede asumir los factores. Estos últimos pueden ser fijos o aleatorios.

Etapa 3. Selección de las variables de respuesta: Se denomina variables de respuesta aquella característica, índice de gestión o desempeño que se desea evaluar o entender dentro del experimento como consecuencia de los factores y sus niveles. Se recomienda dejar claro cómo se cuantifica dicha variable.

Etapa 4. Selección del diseño experimental: En esta etapa se debe enumerar las observaciones o casos a analizar, las hipótesis a probar o refutar; así como el enfoque matemático que se utilizará para representar los casos dentro de la investigación.

Etapa 5. Desarrollo del Experimento: En esta etapa se realiza el experimento en cuanto la recolección de datos para cada una de las situaciones o escenarios de análisis. Es de vital importancia que el experimento se ejecute en condiciones normales y uniformes que estén de acuerdo a lo estipulado en las etapas preliminares.

Etapa 6. Análisis estadístico de los datos: El análisis estadístico a ejecutar dependerá de los objetivos planteados en las etapas anteriores, así como el tipo de diseño de experimento seleccionado; se recomienda relacionar las fases del análisis a realizar que incluyen en otras cosas: estimaciones, contrastes a realizar, intervalos de confianza y grado de asertividad del modelo usado.

Etapa 7. Conclusiones y Recomendaciones: Dependiendo de los resultados obtenidos durante la etapa de análisis estadístico de los datos y la prueba o rechazo de las hipótesis definidas en la Etapa 4, se debe interpretar dichos resultados con el objetivo de llegar a conclusiones y recomendaciones sobre el problema planteado que sea de interés para la industria específica así como para investigaciones en el área de estudio.

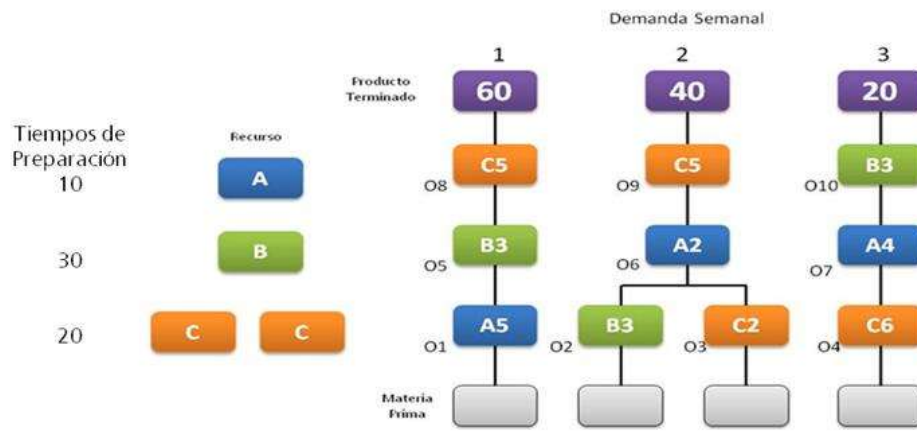
**4.1.1. Identificación y caracterización del problema de investigación.** Como se mencionó en el Capítulo 1, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el impacto en términos de costos y tiempos, que tiene la utilización de tres diferentes políticas de tamaño de lote de proceso y cuatro políticas de lote de transferencia en un sistema productivo tipo “Job Shop”; para responder a dicho objetivo se utilizó el sistema productivo tipo “Job Shop” propuesto por Demeulemeester y Herroelen (1996).

Se prefirió para el presente experimento un sistema productivo tipo “Job Shop” ya que en la mayoría de las investigaciones previas se ha estudiado la influencia del dimensionamiento de lotes en sistemas productivos de menor complejidad como sistemas con una sola máquina o sistemas tipo “Flow Shop”; sin embargo, los sistemas de producción tipo “Job Shop” han recibido menor atención, debido principalmente al mayor nivel de complejidad inherente en dichos sistemas. Como se mencionó anteriormente, se utilizó el sistema productivo propuesto por Demeulemeester y Herroelen (1996), donde analizaron como la modelación de procedimientos de solución para el problema de la programación de proyectos con restricción de recursos, puede ser usada en la programación de operaciones de sistemas reales que involucran

tiempos de preparación independientes de la secuencia, lotes de proceso y lotes de transferencia distintos. La configuración productiva se muestra en la figura 2.

Como se muestra en la figura, en el sistema operativo se producen 3 tipos de productos a partir de 3 tipos de materia prima distintos. El sistema está compuesto de 10 operaciones o actividades, las cuales son asignadas a uno de las tres clases de máquinas con las que cuenta el sistema productivo, de la Máquina C hay dos unidades disponibles y de las demás una unidad. Los nombres y duración de cada actividad u operación se muestran en la figura en color blanco dentro del cuadro de cada actividad. En la parte superior, los iconos en color morado representan la demanda de cada uno de los productos terminados que se producen en el sistema. En la izquierda del gráfico se evidencia cada una de las máquinas disponibles acompañada de su tiempo de preparación. En cuanto al flujo o ciclo del proceso, este inicia en la parte inferior donde las primeras actividades u operaciones (O1 a O4) utilizan la única materia prima disponible e inician el proceso hasta llegar al producto terminado indicado en la parte superior.

Ya que los tiempos de preparación de las máquinas, los tiempos de ejecución de las actividades presentes dentro del sistema productivo y la cantidad de trabajos no presentan variaciones durante el experimento se considera un sistema estático y se denotará como un estudio determinístico.



*Figura 2.* Configuración Productiva de análisis.

Nota: Tomado de Modeling setup times, process batches and transfer batches using activity network logic. Demeulemeester & Heroelen (1996). European Journal of Operational Research. Vol 89. (p.355).

**4.1.2. Elección de los factores y sus niveles.** Partiendo del objetivo de la presente investigación al analizar el impacto en costos y tiempo, que tienen el uso de diferentes políticas de lote de proceso y lote de transferencia en un sistema productivo tipo “Job Shop”, se definen como factores dentro del diseño la política de lote de proceso y la política de lote de transferencia; y se utilizarán los siguientes niveles para cada factor.

Factor 1. Política lote de proceso, como se mencionó en el Capítulo 2 el lote de proceso es la cantidad de piezas fabricadas en una misma máquina como resultado de una sola preparación y operación de dicha máquina; es decir, es la cantidad de producto que se elabora en la máquina antes de prepararla para fabricar otro producto.

## Niveles del factor 1

*Lote de proceso igual a la demanda:* Toda la demanda es procesada en un mismo centro de trabajo o máquina como resultado de un solo proceso de alistamiento.

*Lote de proceso igual a la mitad de la demanda:* La demanda es dividida en dos para ser procesada en un mismo centro de trabajo o máquina, realizando un proceso de alistamiento para cada división.

*Lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda:* La demanda es dividida en tres partes para ser procesada en un mismo centro de trabajo o máquina, realizando un proceso de alistamiento para cada división.

La tabla 2, muestra cada política con su código y nomenclatura correspondiente:

**Tabla 2.** Niveles política lote de proceso

<b>Código</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>
1	LP=Demanda	Lote de proceso igual a la demanda de cada trabajo
2	LP=Demanda/2	Lote de proceso igual a la mitad de la demanda.
3	LP=Demanda/3	Lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda

Factor 2. Política Lote de transferencia: Se definió anteriormente el lote de transferencia como las unidades de productos de un mismo trabajo que se transporte de manera simultánea entre las máquinas o unidades de trabajo. El tamaño del lote de transferencia puede ser igual o menor al lote de proceso dependiendo de las características y objetivos del sistema productivo.

Niveles del Factor 2.

*Lote de transferencia igual al lote de proceso:* Considera que todas las unidades del lote de proceso deben ser procesadas completamente en la máquina antes de ser enviadas a la siguiente operación.

*Lote de transferencia igual al lote de proceso, adelantando la preparación o alistamiento de las máquinas:* Considera que todas las unidades del lote de proceso deben ser procesadas completamente en la máquina antes de ser enviadas a la siguiente operación, sin embargo, se anticipa el proceso de preparación en la máquina que ejecutará la operación siguiente.

*Lote de transferencia igual a la mitad del tamaño del lote de proceso:* Esta política considera que una vez producida la mitad de los productos del lote de proceso; estos se trasladan a la máquina que ejecutará la operación siguiente y la siguiente mitad se traslada al terminar los productos restantes; es decir se realizan dos traslados del lote de proceso.

*Lote de transferencia unitario:* Esta política asume que cada unidad de producto se traslada a la siguiente máquina tan pronto finaliza su fabricación en la máquina actual. La tabla 3, muestra cada política con su código y nomenclatura correspondiente.

**Tabla 3.** Niveles política lote de transferencia

Código	Nomenclatura	Descripción
1	LT=LP	Lote de transferencia igual al lote de proceso
2	LT=LP-Setup	Lote de transferencia igual al lote de proceso, adelantando la preparación o alistamiento de las máquinas
3	LT=1/2 LP	Lote de transferencia igual a la mitad del tamaño del lote de proceso
4	LT=1	Lote de transferencia unitario

La demanda del sistema productivo puede afectar las medidas de eficiencia del proceso productivo; ya que las medidas de costos y tiempos están directamente relacionadas con el nivel de demanda al que está expuesto el sistema, incrementándose de manera proporcional en función de la cantidad de productos totales requeridos; sin embargo, este efecto es una consecuencia natural del incremento en la cantidad de productos y no se desea analizar dicho impacto en la presente investigación. Ahora bien, si se analiza el costo total y del flujo de los productos por unidad de producto fabricado, se podrá analizar el comportamiento de los factores de interés sin la influencia de la relación con la demanda a la que está expuesto el sistema.

La demanda considerada en el sistema productivo de Demeulemeester y Herroelen es de 120 unidades y se designará a través del término demanda básica. Si se considera la demanda como un factor de análisis; ya que existe la posibilidad que para distintos niveles de demanda, el efecto de los diferentes niveles propuestos para cada sea factores, existiendo así una interacción entre dichos factores y la demanda. Para esto, se considerará dos niveles adicionales para la de demanda; los cuales se generan después de multiplicar la demanda básica por cien y por mil, respectivamente. Estos otros dos niveles de demanda se designarán mediante los términos demanda básica x 100 y demanda básica x 1000. La tabla 4, muestra los códigos para cada nivel de demanda.

**Tabla 4.** *Niveles Demanda*

<b>Código</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>
0	Demanda básica	120 productos
1	Demanda básica x100	12.000 productos
2	Demanda básica x 1000	120.000 productos

Con el objetivo de estimar de manera más acertada el efecto de los factores así como su posible interacción, se utilizará un experimento factorial, usando réplicas en las combinaciones posibles de los niveles de dichos factores. De acuerdo a esto se replicará el experimento mediante la utilización de tres diferentes orden en la producción de los productos, variando la participación de cada uno de ellos en la demanda agregada y manteniendo está última constante. El efecto del orden en la producción de los productos en las variables de respuesta propuesta se sale del interés de la presente investigación, por lo que se debe bloquea dicho factor.

De acuerdo a lo anterior, para mejorar la precisión de las comparaciones entre los factores objeto de estudio se diseñaran bloques de acuerdo al orden de productos a producir y se correrá una réplica de un experimento factorial completo dentro de cada bloque. Se fijaron tres órdenes de productos diferentes con base en la cantidad de productos propuesta inicialmente en el sistema productivo de la figura 2.

La tabla 5 muestra el orden de productos en cada uno de los niveles del factor demanda.

**Tabla 5.** Niveles Factor Orden de productos

Nivel de Demanda	Código	Descripción	Trabajos		
			1	2	3
Demanda básica	1	Orden 1	60	40	20
	2	Orden 2	20	60	40
	3	Orden 3	40	20	60
Demanda básica x 100	1	Orden 1	6.000	4.000	2.000
	2	Orden 2	2.000	6.000	4.000
	3	Orden 3	4.000	2.000	6.000
Demanda básica x1000	1	Orden 1	60.000	40.000	20.000
	2	Orden 2	20.000	60.000	40.000
	3	Orden 3	40.000	20.000	60.000

Es importante mencionar que las conclusiones que se obtuvieron en la presente investigación se podrán aplicar solo a los niveles de los factores analizados y a la configuración productiva seleccionada.

**4.1.3. Selección de variables de respuesta.** Como la presente investigación tiene como objetivo analizar el impacto en términos de costos y tiempos, que tiene la utilización de diferentes políticas de tamaño de lote de proceso y lote de transferencia sobre un sistema productivo particular; se seleccionó como variables de respuesta dos medidas tradicionales para evaluar el funcionamiento de un sistema productivo relacionadas con nuestro objetivo: el “Mean Flow Time” como medida predictiva de la variable Tiempo y Los Costos Totales como medida predictiva de los costos incurridos por el sistema. A continuación se explicará a mayor detalle cada uno de las variables de respuesta.

“Mean Flow Time”: Es una medida que indica el tiempo promedio de flujo de los productos entre las máquinas y/o operaciones del sistema productivos dilucidando el tiempo promedio que tarda la fabricación de una unidad de producto dentro del proceso productivo. Este índice de evaluación nos permite evidenciar si hay una mejora a través de la definición de diferentes lotes de proceso y lotes de transferencia en el sistema productivo de análisis. El Mean Flow time, se calculó a partir de los tiempos de terminación de los trabajos presentes en el sistema productivo. Si  $n$  representa la cantidad de trabajos a fabricar,  $X_i$  representa el instante en que el trabajo  $i$  sale del sistema y  $D_i$  la cantidad de productos en el trabajo  $i$ , el tiempo de flujo promedio por unidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FTM = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i}}{n}$$

Como en el sistema productivo hay 3 trabajos, le ecuación anterior se conforma de acuerdo a:

$$FTM = \frac{\frac{X_1}{D_1} + \frac{X_2}{D_2} + \frac{X_3}{D_3}}{3}$$

Costos Totales: Esta variable define los costos totales en los que incurre el sistema para producir los trabajos requeridos. En la presente investigación, la representación de los costos en los que incurre el sistema productivo objeto de estudio se basa en la representación de costos propuesta por Low et al. (2008) y la propuesta por Huang (2010). En dichas investigaciones los autores analizan el efecto que tienen diferentes criterios de costos sobre la determinación del tamaño óptimo del lote de transferencia. A continuación, se expondrá con más detalle en qué consiste cada uno de los criterios de costos propuestos y la forma en que se incluyeron en el presente estudio.

*Costos de Preparación de las máquinas (CP):* Se entiende como costos de preparación de las máquinas, aquellos costos en los que incurre el sistema como resultado de la preparación/alistamiento necesario en cada una de las máquinas para cambiar de una operación a otra. En este estudio se asume que el costo de preparación unitario de cada máquina es una constante que no varía de una maquina a otra, ni tampoco varía entre las operaciones que se realizan en una máquina como funciona en la mayoría de los sistemas productivos según Low et al. (2008). Por lo tanto, el costo total de preparación en que incurre el sistema está en función

del número de preparaciones (operaciones) que se realicen en el sistema –cada vez que un trabajo llega a una máquina a realizar una operación, se requiere que dicha maquina sea preparada para realizar dicha operación-; adicionalmente, se considera que el costo total por preparación de máquinas se encuentra en función de la política de lote de proceso del sistema; ya que si se permite la partición de los trabajos en lotes de proceso de menor tamaño; se ocasiona que cada vez que llegue un lote de determinado trabajo a una máquina para realizar una operación, sea necesario preparar la máquina independientemente del tipo de trabajo que se haya realizado justo antes. De acuerdo con lo anterior, la fórmula que representa el costo total en que incurre el sistema por la preparación de las máquinas es:

$$CP = C_{cp} \times \xi \times n$$

Donde,

$C_{cp}$ , representa el costo por preparación unitario de una máquina en el sistema,

$\xi$ , representa el número de operaciones necesarias para la producción de los trabajos,

$n$ , representa el número de lotes de proceso en los que se divide la demanda.

*Costos de Transferencia (CT)*: Entendido como los costos en los que incurre el sistema como resultado del transporte de lotes de una máquina a otra para realizar la operación subsiguiente. Para cuantificar el costo total incurrido por la transferencia de lotes de una máquina a otra, se utilizó la representación utilizada por Huang (2010) en la cual, el sistema incurre en un costo cuando cada lote de transferencia es transportado de una máquina a otra; el costo de transferencia unitario se considera como una constante que no varía de acuerdo al tamaño del lote de transferencia, ni tampoco varía entre la interacción de las diferentes

operaciones/maquinas. De acuerdo con lo anterior, el costo total en que incurre el sistema objeto de estudio se encuentra en función del número de lotes a transportar dentro del sistema, el cual se encuentra definido por la política de lote de proceso y de la política de lote de transferencia que se esté considerando en cada uno de los casos de estudio. Entonces, la fórmula que representa el costo total en que incurre el sistema por la transferencia de los trabajos es:

$$CT = Cct \times (\xi - 1) \times n \times \partial$$

Donde,

Cct, representa el costo por transferencia unitario,

$\xi$ , representa el número de operaciones dentro del sistema,

n, representa el número de lotes de proceso en los que se divide la demanda,

$\partial$ , representa el criterio de la política de lote de transferencia.

*Costos de inventario de producto en proceso "CIP"*: se considera como el costo de mantener el inventario existente entre el punto inicial y final de la ruta de producción. Para calcular dicho costo se utilizó la ley de Little, enunciada por Hopp y Spearman (2001) en el libro *Factory Physics*, la cual enuncia: "La relación fundamental entre el inventario en proceso "WIP", el rendimiento "throughput" y el tiempo de flujo "flow time" en un sistema producción en estado de equilibrio es:  $WIP = Throughput \times Flow Time$ " (p.89).

El rendimiento o "throughput" se define como la salida promedio de una unidad de producción por unidad de tiempo; el inventario en proceso como el inventario entre el punto

inicial y final del flujo de producción y el tiempo de flujo como el tiempo promedio que toma al trabajo siendo Inventario en proceso.

De acuerdo con lo anterior, la fórmula que representa el cálculo del costo de inventario en producto en proceso es:

$$CIP = C_{cip} \times \text{Throughput} \times ff$$

Donde,

$C_{cip}$ , representa el costo de mantener inventario en proceso por unidad de tiempo dentro del sistema,

Throughput, salida promedio de una unidad de producción por unidad de tiempo

$ff$ , representa el Flow Time.

La anterior representación se ha utilizado en múltiples investigaciones relacionadas con la programación de operaciones en sistemas que consideran la división de lotes de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño: Ramasesh et al (2000), Li y Xia (2004), Hoque y Goyal (2005), Sarin et al. (2008) y Huang (2010).

Entonces, el cálculo de los costos totales en los que incurre el sistema por realizar la producción se puede describir de la siguiente forma:

$$\text{Costos Totales} = CP + CT + CIP$$

Donde, CP corresponde al costo por la preparación de las máquinas para desarrollar las operaciones requeridas, CT corresponde al costo de transportar todos los lotes de una máquina a otra dentro del sistema y CIP corresponde al costo por inventario de producto en proceso existente dentro del sistema.

Para el desarrollo de la presente investigación, se evaluó el costo total por unidad de producción; dicho valor representa el costo en el que incurre el sistema para producir una unidad de cualquier producto. Si CT representa los costos en los que se incurrieron para producir los trabajos y Di la cantidad de productos en el trabajo i, el costo total por unidad de producción se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$CTM = \frac{CT}{\sum D_i}$$

La tabla 6 muestra el código asignado a cada una de las variables de respuesta consideradas en la presente investigación.

**Tabla 6.** *Códigos variables de respuesta*

Código	Variable
1	Mean Flow Time
2	Costos Totales

En la figura 3 se simboliza el diseño de experimento de la presente investigación. Se utiliza un modelo diferente para cada medida de desempeño, ya que el análisis de los resultados se realizará por separado para identificar el impacto de cada uno de los factores en cada medida de desempeño.



Figura 3. Modelo general del diseño experimental

**4.1.4. Elección del diseño experimental.** El efecto de los tres factores mencionados junto con su posible interacción puede modelarse mediante un experimento factorial, usando varias réplicas en todas las combinaciones posibles de los niveles de los tres factores. La realización de las réplicas permite estimar el error experimental y valorar de una manera más precisa el efecto de los factores.

De acuerdo con lo anterior, se realizó un experimento en el que interviene el tres factores principales (Política de Lote de proceso, Política lote de transferencia y nivel de demanda) que podrían interactuar entre sí y un factor bloque que permite replicar el experimento, aislando su efecto dentro del experimento. Las observaciones del diseño experimental se pueden representar a través un modelo lineal como sigue:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \delta_l + \epsilon_{ijkl}$$

Donde  $\mu$  es el efecto promedio global,  $\tau_i$  es el efecto del nivel  $i$ -ésimo del factor de política de lote de proceso,  $\beta_j$  es el efecto del nivel  $j$ -ésimo del factor de política de lote de transferencia,  $\gamma_k$  es el efecto del nivel  $k$ -ésimo del factor demanda,  $(\tau\beta)_{ij}$  es el efecto de la interacción entre la política de lote de proceso y la política de lote de transferencia,  $(\tau\gamma)_{ik}$  es el efecto de la interacción entre la política del lote de proceso y la demanda,  $(\beta\gamma)_{jk}$  es el efecto de la interacción entre la política del lote de transferencia y la demanda,  $\delta_1$  es el efecto del factor bloque mezcla y  $\varepsilon_{ijkl}$  es un componente del error aleatorio.

El objetivo de este diseño experimental es probar las hipótesis respecto a la igualdad de los efectos de los factores política lote de proceso, política lote de transferencia, nivel de demanda y su el posible efecto de la combinación de dichos factores.

Las hipótesis consideradas respecto a los factores política de lote de proceso, política de lote de transferencia y nivel de demanda aseveran que las medias poblacionales definidas por sus niveles son iguales, lo cual indica que el efecto del factor es nulo; es decir que no tendrían efecto sobre las medidas de desempeño consideradas en la presente investigación. De acuerdo a esto, dichas hipótesis pueden simbolizarse como:

$$H_0: \tau_i = 0 \quad H_0: \beta_j = 0 \quad H_0: \gamma_k = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \quad H_1: \beta_j \neq 0 \quad H_1: \gamma_k \neq 0$$

Las hipótesis consideradas sobre el posible efecto de la interacción entre los factores afirman que tal efecto es nulo sobre las medidas de desempeño consideradas y se podrían describir como:

$$\begin{array}{cccc}
 H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 & H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0 & H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0 & H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \\
 H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 & H_1: (\tau\gamma)_{ik} \neq 0 & H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 & H_1: (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0
 \end{array}$$

Para esta investigación y partiendo del hecho de que se trabaja con un sistema factorial con bloques se considerará que la interacción entre los bloques y los tratamientos tienda a ser cero o nula.

#### 4.2. Realización del experimento

Posterior a la definición y caracterización del problema, así como la definición de los factores, sus niveles y las variables de respuestas que se representaran en diseño experimental es necesario representar de manera clara cada una de las situaciones de análisis o casos experimentales presentes en el experimento. Por lo que es primordial poder unificar criterios y definiciones que se incluirán en la representación de las situaciones de análisis. A continuación, se relacionan las definiciones de cada concepto.

Trabajos: Se define como el total de las unidades de un tipo de producto que deben ser fabricadas en el sistema productivo. La cantidad de unidades de cada trabajo está en función de los niveles considerados en el factor orden de producto. A continuación, en la tabla 7 se muestra el nombre de los trabajos considerados.

**Tabla 7.** *Nombre de los trabajos dentro del sistema productivo*

Trabajos	
1	Trabajo 1
2	Trabajo 2
3	Trabajo 3

Operaciones: Se definen como cada una de las actividades o etapa productiva que deben realizarse para la producción completa de cada trabajo. En el sistema productivo de estudio se ejecutan 10 operaciones. A continuación, en la tabla 8 se muestra el nombre de las operaciones consideradas.

Máquinas: Se definen como las unidades productivas encargadas de realizar cada una de las operaciones requeridas para la fabricación de los trabajos. Para esta investigación se representa cada una de las máquinas con la letra “M” seguida de dos números. El primer número representa el tipo de máquina y el segundo número considera la diferenciación entre las unidades disponibles de la misma máquina. A continuación, se muestra el nombre de cada una de las máquinas consideradas en el sistema productivo.

**Tabla 8.** *Nombre de las operaciones dentro del sistema productivo*

Operaciones	
O1	Operación 1
O2	Operación 2
O3	Operación 3
O4	Operación 4
O5	Operación 5
O6	Operación 6
O7	Operación 7
O8	Operación 8
O9	Operación 9
O10	Operación 10

**Tabla 9.** Nombre de las máquinas dentro del sistema productivo

Máquinas	
M11	Máquina 1
M21	Máquina 2
M31	Máquina 3
M32	

**4.2.1. Modelización del sistema productivo objeto de estudio.** La programación lineal permite modelar diferentes problemas a través de una función matemática lineal con el objetivo de optimizar la función objetivo o resultado esperado; considerando a través de variables cada una de las restricciones o condiciones específicas que afectan la función objetivo o variable dependiente. Usualmente se utiliza la programación lineal dentro de la administración de operaciones con el objetivo de modelar el problema de asignación de recursos a ciertas actividades para lograr un objetivo final.

El objetivo último de la programación lineal es identificar o seleccionar la solución que optimice (maximice o minimice según corresponda) la función objetivo dentro de un grupo limitado o ilimitado de soluciones factibles.

De acuerdo a lo anterior, el reto de optimización planteado en el sistema productivo de estudio que busca la asignación de recursos (materia prima) a cada una de las actividades (operaciones) para lograr la fabricación de unos trabajos, puede modelarse a través de un problema de programación lineal; específicamente como un problema de programación lineal entera mixta; donde se asignan cada uno de los trabajos a las máquinas mediante variables

binarias y los tiempos de inicio de las operaciones en dichas máquinas a través de variables enteras.

Para realizar la modelización del sistema productivo de estudios, se baso en la programación utilizada por Niño (2002) en su tesis doctoral, sumando la capacidad de secuenciar operaciones adicionales cuando se dividen los lotes de proceso y una medida de desempeño *Costos Totales* de acuerdo a lo presentado en la sección 4.1.3. El modelo de programación lineal busca identificar la secuencia de operaciones factible que genere el valor óptimo en las variables de Tiempos de Flujo medio y Costos totales; al asignar los trabajos con sus actividades en cada una de las máquinas requeridas. Este modelo se construye principalmente a través de dos clases de restricciones: restricciones de secuencia y restricciones de interferencia.

*Las restricciones de secuencia* se utilizan para garantizar que las operaciones se realicen en el orden que establece en el sistema productivo y se basan en el principio de que el tiempo de inicio de la operación siguiente debe ser mayor o igual al tiempo de inicio de la operación precedente más el tiempo total de ejecución de la operación precedente o tiempo de inicio más temprano posible para la operación siguiente “TT”; las desiguales que se definen se modifican dependiendo del número de unidades disponibles de cada una de las máquinas comprometidas en el sistema productivo.

*Las restricciones de Interferencia*, son utilizadas para evitar que dos operaciones se programen simultáneamente en una misma máquina y se basan en el principio de que el tiempo de inicio de la operación “x” menos el tiempo de inicio de la operación “y” (dos operaciones que se realizan en la máquina A) debe ser mayor o igual al tiempo de procesamiento del lote “PL”

durante la operación. Al igual que las restricciones de secuencia las desiguales que se definen se modifican dependiendo del número de unidades disponibles de cada una de las máquinas comprometidas en el sistema productivo.

El Anexo A, contiene el modelo completo y la lógica en la que se basó su construcción.

Una vez definido el problema a través de un modelo de programación lineal entera mixta, se procede a buscar optimizador que permita resolver el problema de optimización lineal; para esto se utiliza el lenguaje de optimización matemático de alto nivel GAMS (General Algebraic Modeling System) como herramienta de representación y se utiliza el optimizador GAMS/Cplex para la resolución de cada una de las situaciones de análisis dentro de la presente investigación.

El Anexo B, contiene la formulación general del modelo de programación lineal entera mixta desarrollado según el lenguaje GAMS. Mostrando ejemplos para las formulaciones específicas de los casos: A-1-1-1-0-1, A-2-1-1-0-1, A-1-2-4-1-1, A-2-2-4-1-1 y A-2-3-1-0-1.

La formulación de cada uno de los 216 modelos correspondientes, se diferencian por el valor de los parámetros tiempo de inicio más temprano posible para la operación siguiente “TT” y tiempo de procesamiento del lote “PL” presentes en las restricciones y en la función objetivo.

Una vez formulado el modelo de programación así como la codificación en el lenguaje de programación requerido; se procede a calcular cada uno los parámetros que diferencian las situaciones de estudio de la presente investigación.

**4.2.2. Parametrización del modelo.** Para las “216” situaciones de análisis, se especificaron los parámetros de tiempo de procesamiento de lote “PL”, tiempo de inicio más temprano “TT”, así como el cálculo de cada uno de los parámetros incluidos en los criterios de costo en los que incurre el sistema durante la producción de la demanda en cada situación.

*Tiempo de Proceso de lote – PL –* : Este parámetro muestra el tiempo de producción del lote de proceso de cada actividad, considerando el tiempo de alistamiento de la máquina requerida en dicha actividad. Este parámetro se encuentra en las restricciones de interferencia para determinar que la diferencia entre los tiempos de inicio de dos operaciones que se realizan en la misma máquina, deben ser igual (como mínimo) al tiempo que tarda dicha máquina en procesar el lote completo de la primera operación programada. Como en esta investigación, se pretende modelar diferentes políticas de tamaño de lote de proceso, permitiéndose la división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño; el parámetro “PL” permite modificar las restricciones de interferencia y representar cada una de las tres políticas de lote de proceso, debido a que su valor define el tiempo de fabricación del lote de proceso de determinado tamaño en cada una de las operaciones del sistema.

El parámetro “PL” de cada actividad en cada situación se calculó multiplicando el tamaño de lote de proceso (según la política de lote evaluada) de dicha operación por su correspondiente tiempo de proceso unitario, y, sumando a este valor el tiempo de alistamiento de la máquina en la que se realiza la operación. Los valores de éste parámetro en los casos de

estudio correspondientes a la variable “mean flow time” son iguales a los asignados a los casos de la variable “costos totales” y no varían entre las diferentes políticas de lote de transferencia. En el Anexo C, se encuentra el procedimiento requerido para el cálculo de cada uno de los 27 casos de estudio.

*Tiempo de Terminación más temprano – TT –*: Este parámetro marca el tiempo mínimo de inicio de la operación siguiente; es decir, indica el instante en que el lote de transferencia pasa de una máquina a otra, asegurando que la operación siguiente en el flujo del sistema productivo no inicie antes de que la operación anterior haya alcanzado la fabricación del lote de transferencia determinado; de esta manera permite modelar cada una de las políticas de lote de transferencia que se analizan en la presente investigación. Entonces, a través del parámetro TT se representa el instante en que el lote de transferencia puede ser transportado de una máquina a otra.

El transporte de cada una de las unidades de producción depende de las política de lote de transferencia determinada, los parámetros “TT” se calcularon para cada tamaño de lote de proceso, lote de transferencia, nivel de demanda y mezcla; generando 108 casos de estudio para cada medida de desempeño, sin embargo, entre las dos medidas de desempeño se conservan los mismos valores. En la figura 4 se muestra el concepto en el cual se basa el procesamiento general de cada una de las políticas de transferencia.

El Anexo D, muestra el cálculo para los parámetros “TT” de los 108 situaciones de estudio utilizados con cada medida de desempeño.

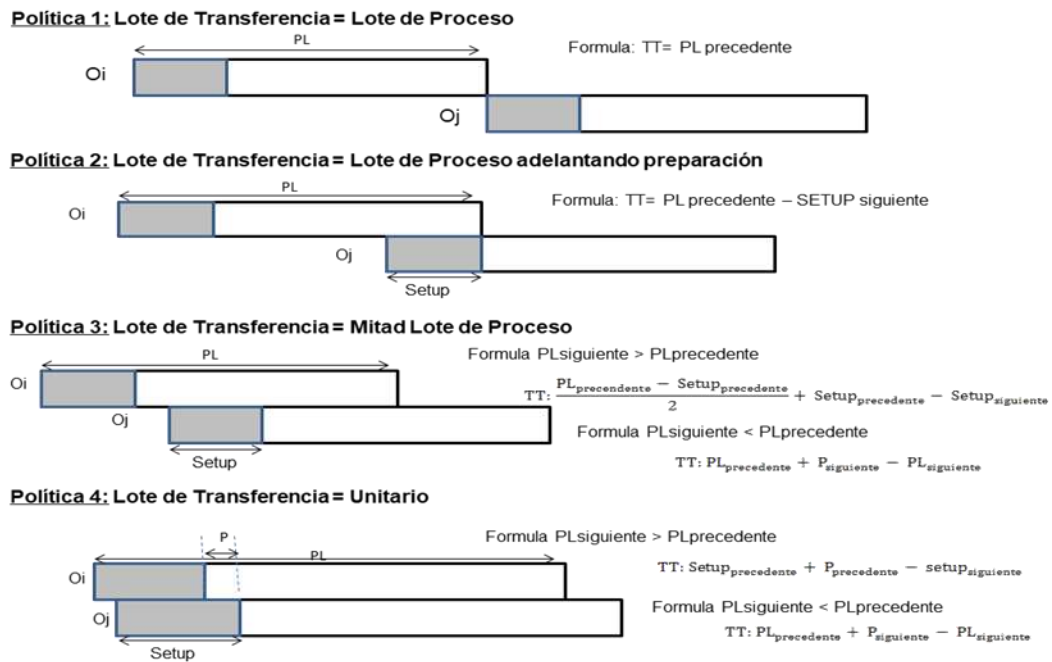


Figura 4. Descripción del cálculo del parámetro TT para cada política de lote de transferencia.

*Parametrización Criterios de Costos:* Dentro del sistema de manufactura propuesto por Demeulemeester y Herroelen (1996) y descrito en la sección 4.1.1. no se incluye ningún parámetro relacionado con los costos incurridos por el sistema al procesar los trabajos requeridos; así que en la presente investigación se propone que los tres criterios de costos incluidos tengan un coeficiente constantes a través de las 108 situaciones de análisis e iguales entre sí con el objetivo de no priorizar entre los diferentes criterios de costos. La tabla 10 muestra los coeficientes relacionados con los cuatro de costos incluidos.

Tabla 10. Coeficientes de los cuatro criterios de costos

Coeficiente	Unidades
Coeficiente Costo de Preparación de máquinas	10 Unidades /Preparación
Coeficiente Costo de Transporte de Lotes	10 Unidades/ Transporte
Coeficiente Costo Inventario en Proceso	10 Unidades / Unidad de tiempo

Sin embargo, para el cálculo total de cada tipo de costo, se requiere la parametrización de las 108 situaciones; ya que dicho cálculo se encuentra en función de variables como: Número de Operaciones en el sistema, Número de Lotes de Proceso, Criterio Política de lote de transferencia; que son incluidos dentro de la formulación del modelo productivo como parámetros.

A continuación se relaciona la forma en que se parametrizaron las variables que influyen en el cálculo de cada uno de los criterios de costos considerados.

*Costo de Preparación de Máquinas:* Como se mencionó anteriormente, el cálculo del Costo Total de preparación de las máquinas se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$CP = C_{cp} \times \xi \times n$$

Donde,

$C_{cp}$ , representa el costo unitario por preparación de máquina dentro del sistema y se considera igual a 10 unidades de costo por cada preparación, el cual se mantiene constante a través de los 108 casos de estudio considerados.

$\xi$ , representa el número de operaciones necesarias para la producción de los trabajos y es igual 10, el cual es constante a través de los 108 casos de estudio.

$n$ , representa el número de lotes de proceso en los que se divide la demanda.

Ahora bien, el número de lotes de proceso “ $n$ ” en los que se divide la Demanda varía para cada uno de los niveles del factor política de lote proceso, pero se mantiene igual para cada uno

de los niveles de los demás factores incluidos en el diseño del presente experimento; dando tres posibles opciones de parámetro para la variable costos. La tabla 11 muestra el valor del parámetro “n” para las dos variables de respuesta de modelo al momento de cambiar de un nivel a otra del factor política de lote de proceso.

**Tabla 11.** *Parámetro de número de lote de proceso*

<b>Código</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Parámetro</b>
1	LP=Demanda	Lote de proceso igual a la demanda de cada trabajo	1
2	LP=Demanda/2	Lote de proceso igual a la mitad de la demanda.	2
3	LP=Demanda/3	Lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda	3

*Costo de Transferencia:* De acuerdo a la sección 4.1.3. se definió que el costo total de transferencia en el que incurre el sistema es igual a:

$$CT = Cct \times (\xi - 1) \times n \times \partial$$

Donde,

Cct, representa el costo unitario por transferencia de un lote de una máquina a otra y es igual a 10 unidades de costo por transferencia; el cual no varía a través de las diferentes situaciones de estudio.

ξ, representa el número de operaciones necesarias para la producción de los trabajos y es igual 10 y es constante a través de los 108 casos de estudio.

n, representa el número de lotes de proceso en los que se divide la demanda y depende del nivel que tome el factor política de lote de proceso en cada situación de análisis. Los valores del parámetro n son iguales a los mostrados en la tabla 13.

$\delta$ , representa el número en que se divide el lote de proceso en lotes de transferencia y se definen de la siguiente manera:

Cuando la Política de lote de transferencia es igual al Lote de Proceso, se utiliza como Criterio el número 1; ya que para transportar el lote de proceso, se espera la terminación de todo el lote de proceso completo en la máquina incurriendo en un solo transporte por operación/lote de proceso; y una vez llegue el lote a la máquina siguiente, esta empieza su proceso de preparación.

Cuando la Política de lote de Transferencia es igual al Lote de Proceso adelantando el tiempo de preparación, se utiliza como Criterio el número 1; ya que ya que para transportar el lote de proceso, se espera la terminación de todo el lote de proceso en la máquina incurriendo en un solo transporte por operación/lote de proceso; sólo que la máquina siguiente inició su proceso de preparación antes de que llegue el lote de proceso a dicha máquina.

Cuando la Política de lote de Transferencia es igual a la mitad del lote de Proceso: en este caso se utiliza como Criterio el número 2; ya que el lote de proceso se divide en dos lotes de transferencia que corresponde a la mitad del lote de proceso; entendiéndose como, una vez la mitad del lote de proceso haya realizado la operación en la máquina predecesora se podrá transportar a la siguiente máquina, incurriendo en un total de 2 transportes por cada operación/lote de proceso.

Cuando la Política de lote de Transferencia es unitario: en este caso se utiliza como criterio el nivel de Demanda del sistema; ya que una vez cada unidad termine su operación en una determinada máquina, éste será transportado a la máquina siguiente para iniciar su operación en dicha máquina.

El anexo E, muestra el valor que toma cada uno de los parámetros del cálculo costo de transferencia, para las 108 situaciones donde se evaluó la variable Costos Totales.

*Costo de Inventario de producto en proceso:* De acuerdo a la sección 4.1.3, el costo de inventario de producto en proceso incluido en el presente estudio se define como:

$$CIP = C_{cip} \times \text{Throughput} \times ff$$

Donde,

$C_{cip}$ , representa el costo unitario de mantener una unidad de producto en inventario en proceso y es igual a 10 unidades de costo por unidad de tiempo, el cual no varía durante el desarrollo del presente experimento.

$ff$ , representa el Flow Time; este valor también se encuentra incluido dentro de la formulación del modelo matemático como una variable y depende del nivel que tome cada uno de los factores de análisis incluidos en la presente investigación.

Como en la presente investigación se considera que el sistema de producción es estático; el rendimiento del sistema o “Throughput” se comportará como una constante, pues la naturaleza y mecanismos de las máquinas son los mismos durante todo el experimento y es inherente al

sistema productivo analizado. Al observar la Figura 2, se puede concluir que una unidad de producción (los tres trabajos considerados) sale del sistema productivo cada seis unidades de tiempo (Máximo tiempo de operación unitario: Operación 4); por lo que el “Throughput” será igual a  $1/6$ .

**4.2.3. Procesamiento de los casos planteados.** Una vez parametrizadas cada uno de los 216 casos de estudios para los “PL”, “TT” y los criterios de costos, se realizó la corrida de cada uno de ellos en GAMS/Cplex para obtener su solución óptima. Primero, se realizó el proceso para los 108 casos de la medida de eficacia de tiempo, *Mean Flow Time* y luego se realizó el proceso para los 108 casos para la medida de eficacia relacionada con Costos, *Costos Totales*. Ya que el modelización de cada uno de las situaciones se realizó usando el mismo método de optimización, siendo este un proceso exacto donde independiente del orden en el que se corra cada uno de los casos, GAMS/Cplex encuentra siempre la opción factible óptima, no requiriendo aleatorización en la corrida de dichos casos.

**4.2.4. Resultados obtenidos.** Se realizó la corrida de cada uno de los 216 casos planteados por separado en GAMS/Cplex. Antes de realizar la corrida, el programa realiza un proceso de verificación para identificar errores y luego corre el algoritmo de solución para buscar la opción factible que optimiza la función objetivo.

A continuación, se muestra el proceso de verificación para el modelo A-1-2-4-1-1, el cual muestra de manera de resumen el tamaño del modelo que se está solucionando; En este

caso, el modelo contiene 19 bloques de ecuaciones y un total de 609 restricciones y 249 variables.

```

Model statistics
Blocks of equations  19  single equations  609
Blocks of variables  8  single variables  249
Non zero elements   1699  discrete variables  214
Generation time    =    0.015 seconds  1.6 mb  win211-135
Execution time     =    0.015 seconds  1.6 mb  win211-135

```

Una vez corrido el algoritmo, GAMS/Cplex muestra la solución mostrada dando un resumen sobre los detalles de la corrida, que incluyen el valor de la función objetivo bajo el escenario óptimo.

```

Solve summary
  model tipo2      objective ff
  type mip        direction minimize
  solver cplex     from line 155
**** solver status 1 normal completion
**** Model status  1 optimal
**** objective value      158576.0000
resource usage, limit     11.500   1000.000
iteration count, limit    116963   100000

```

La solución arrojada por GAMS/Cplex para cada uno de los casos de estudio fue óptima.

A modo de ejemplo se muestra la solución obtenida para el caso A-1-2-4-1-1.

---- VAR x Tiempo de inicio operación

	Lower	level	upper	marginal
t1.11.o1 .m11	.	18112.000	+INF	.
t1.11.o5 .m21	.	24095.000	+INF	.
t1.11.o8 .m31	.	.	+INF	EPS
t1.11.o8 .m32	.	24108.000	+INF	.
t1.12.o1 .m11	.	33122.000	+INF	.
t1.12.o5 .m21	.	39105.000	+INF	.

t1.12.o8 .m31	.	39118.000	+INF	.
t1.12.o8 .m32	.	.	+INF	EPS
t2.11.o2 .m21	.	.	+INF	5.000
t2.11.o3 .m31	.	6020.000	+INF	.
t2.11.o3 .m32	.	6007.000	+INF	.
t2.11.o6 .m11	.	10034.000	+INF	.
t2.11.o9 .m31	.	.	+INF	EPS
t2.11.o9 .m32	.	10026.000	+INF	.
t2.12.o2 .m21	.	12090.000	+INF	.
t2.12.o3 .m31	.	10074.000	+INF	.
t2.12.o3 .m32	.	.	+INF	EPS
t2.12.o6 .m11	.	14102.000	+INF	.
t2.12.o9 .m31	.	14094.000	+INF	.
t2.12.o9 .m32	.	.	+INF	EPS
t3.11.o4 .m31	.	.	+INF	EPS
t3.11.o4 .m32	.	.	+INF	EPS
t3.11.o7 .m11	.	6024.000	+INF	.
t3.11.o10.m21	.	9060.000	+INF	.
t3.12.o4 .m31	.	.	+INF	EPS
t3.12.o4 .m32	.	.	+INF	1.000
t3.12.o7 .m11	.	2014.000	+INF	.
t3.12.o10.m21	.	6030.000	+INF	.

---- VAR t Tiempo de terminacion de lote

	Lower	level	upper	marginal
t1.11	.	39128.000	+INF	.
t1.12	.	54138.000	+INF	.
t2.11	.	20046.000	+INF	.
t2.12	.	24114.000	+INF	.
t3.11	.	12090.000	+INF	.
t3.12	.	9060.000	+INF	.
	Lower	level	upper	marginal
---- VAR ff		-INF	1.5858E+5	+INF

El anexo F, muestra a manera de ejemplo los informes de salida correspondientes a los casos: A-2-1-1-0-1 y A-1-2-4-1-1. Los resultados obtenidos para los 108 casos de cada una de las medidas de eficacia se muestran en el Anexo G.

## 5. Análisis estadístico de los resultados

### 5.1. Análisis estadístico de la variable “Mean Flow Time”

El Mean Flow time se calculó a partir de los tiempos de terminación de los 3 trabajos que se fabrican en el proceso productivo, como se indicó en la sección 4.1.3. Los tiempos promedio de flujo por unidad calculados se muestran en la tabla 12.

El análisis estadístico realizado consta de tres partes: La primera parte muestra el análisis descriptivo, la segunda parte muestra el análisis de varianza y la última parte muestra el análisis de comparaciones múltiples para aquellas combinaciones de factores que mostraron que su interacción era estadísticamente significativa. Para la realización de las tres partes se utilizó la herramienta SPSS.

**Tabla 12.** Respuesta obtenida – Tiempos promedio de flujo

Política LP	Mezcla Política LT	0: Demanda Básica			1: Demanda Básica x 100			2: Demanda Básica x 1000		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1: LP=Demanda	1: LT=LP	16,3	16,2	15,0	14,2	13,9	12,9	14,2	13,8	12,8
	2: LT=LP-Setup	15,0	15,2	13,5	14,9	13,8	12,8	14,2	13,8	12,8
	3: LT=1/2LP	10,9	13,6	9,4	9,6	8,8	8,5	9,6	8,8	8,4
	4: LT=1	10,1	8,7	8,6	8,8	8,0	7,6	8,8	7,9	7,6
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	14,8	13,4	12,6	10,4	9,5	10,4	10,4	9,5	10,4
	2: LT=LP-Setup	12,3	12,0	11,7	10,4	9,5	10,4	10,4	9,5	10,4
	3: LT=1/2LP	11,3	9,0	9,3	7,8	9,4	7,2	8,6	9,3	7,2
	4: LT=1	10,9	8,6	8,5	7,0	8,6	6,8	7,0	8,6	6,8
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	14,1	13,9	13,6	9,2	8,7	8,5	9,1	8,5	8,0
	2: LT=LP-Setup	11,6	10,9	11,6	9,1	8,6	9,6	9,1	8,5	8,4
	3: LT=1/2LP	12,3	10,8	11,5	8,2	8,7	6,8	8,1	7,3	6,8
	4: LT=1	12,2	9,7	10,7	7,1	8,4	7,4	6,4	6,3	6,1

**5.1.1. Análisis descriptivo.** Con el objetivo de exponer el comportamiento de la variable Mean Flow Time, cuando se modifican los niveles de los factores considerados en el diseño experimental se realizó un análisis descriptivo; iniciando con la creación de unos gráficos de línea; donde el eje de las abscisas muestra los niveles de los dos factores principales de la presente investigación: Política Lote de Proceso y Política Lote de Transferencia, y el eje de las ordenadas representa el comportamiento de la variable “Mean Flow Time”; un gráfico para cada nivel de Demanda.

Adicionalmente, dentro de cada gráfica se incluyó en líneas separadas cada una de las tres mezclas de productos contempladas en el diseño experimental. Los gráficos mencionados se muestran en las figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

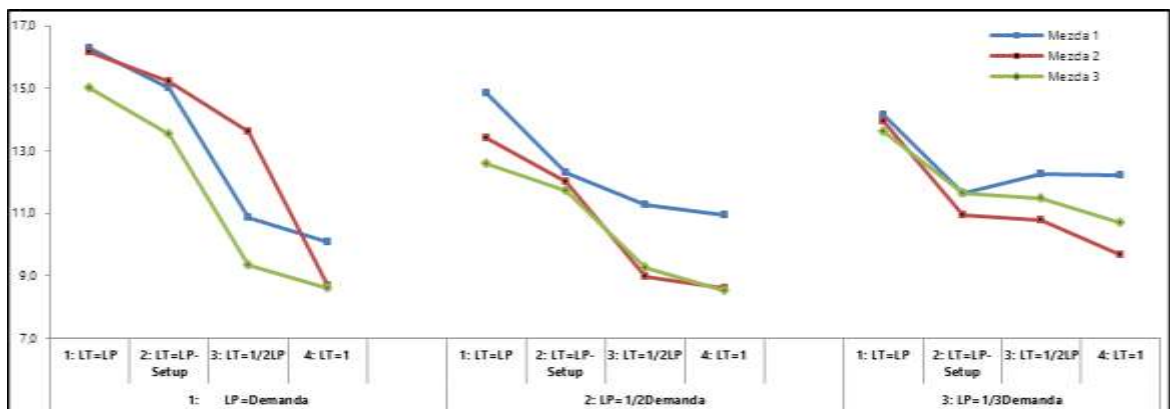


Figura 5. Gráfico de línea MFT Vs Lote de Transferencia – Demanda Básica

Puede observarse en los tres gráficos de línea iniciales, que independiente de la política de lotes de proceso y el nivel de demanda que se esté evaluando, al cambiar de la política de operación de lote de transferencia igual al lote de proceso hacia la utilización de lotes de transferencia unitarios, se reduce el tiempo medio de flujo de los productos en el sistema. De acuerdo con lo anterior, se puede pensar que el uso de lotes de transferencia de menor tamaño en el sistema productivo de análisis permita la reducción del flujo promedio de los productos dentro del proceso productivo.

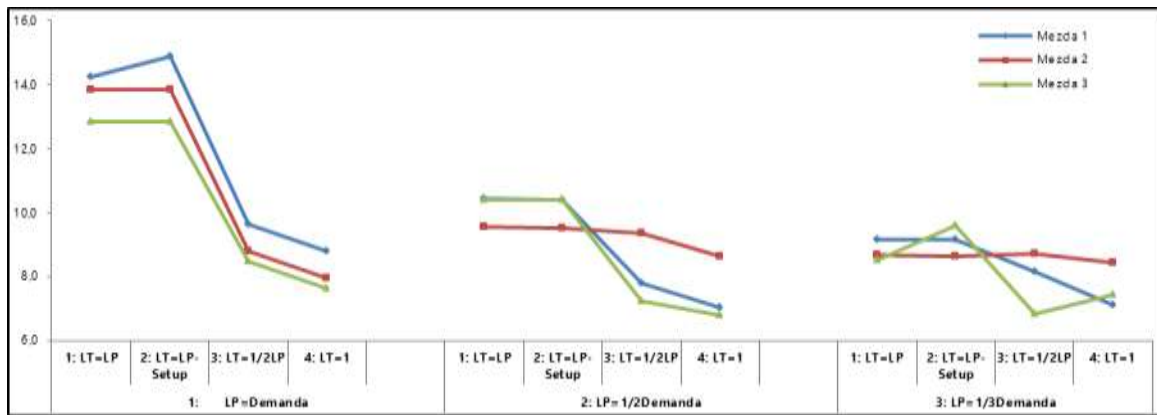


Figura 6. Gráfica línea MFT Vs Lote de Transferencia Demanda Básica x 100

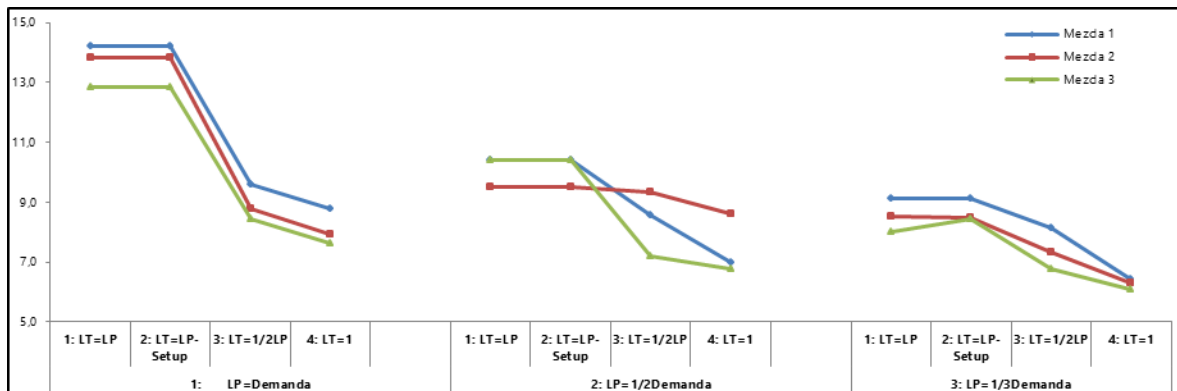


Figura 7. Gráfica línea MFT Vs Lote de Transferencia Demanda Básica x 1000

En dichos gráficos también se puede observar, que la reducción obtenida en el tiempo medio de flujo al pasar de la política de lote de transferencia igual al lote de proceso a la segunda política donde se adelanta el tiempo de alistamiento de la máquina siguiente en los dos niveles de demanda aumentada, no es tan significativa como en la demanda básica. Pero, cuando se utiliza el lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso o lotes de transferencia unitarios, se observa una reducción similar en todos los niveles de demanda, independientemente de la política de lote de proceso que se esté evaluando.

Este comportamiento de la variable de respuesta relacionada con el tiempo cuando se pasa de la primera política a la segunda política donde se anticipa el tiempo de alistamiento en la máquina siguiente en el nivel de demanda básica, en comparación con los niveles de demanda aumentada, indica que es posible que la interacción entre las políticas de operación y el nivel de demanda sea significativa, es decir, que el cambio de una política a otra no produzca el mismo efecto entre niveles de demanda diferentes.

Ahora bien, si se observa el comportamiento del tiempo medio de flujo de productos cuando cambiamos de política de operación del lote de proceso, utilizando lotes de proceso igual a la demanda hacia una utilización de lotes de proceso más pequeños, encontramos dos efectos: En los niveles de demanda aumentados, independientemente de la política de lote de transferencia y mezcla de productos que se esté evaluando siempre se reduce el “mean flow time” indicando que dividir grandes demandas en lotes de proceso más pequeños reduce el tiempo de flujo de los productos; pero, en el nivel de demanda básica, al cambiar la política de

lote de proceso de utilizar lotes de proceso iguales a la demanda hacia la utilización de lotes de proceso más pequeños, sólo se reduce el tiempo de flujo para las dos primeras políticas de lote de transferencia (igual al lote de proceso, y adelantando el tiempo de alistamiento en la máquina siguiente); sin embargo, para las políticas de lote de transferencia que consideran lotes de transferencia más pequeños, al cambiar la utilización de lotes de proceso hacia la utilización de lotes de proceso más pequeños, todas las mezclas de productos mostraron un incremento en el tiempo medio de flujo, posiblemente influenciado por la mayor importancia del tiempo de alistamiento de las máquinas sobre el tiempo total de producción en niveles de demanda pequeños. De acuerdo a lo anterior, es posible que la interacción entre las políticas de lote de proceso y el nivel de demanda sea significativa, es decir, que el cambio de una política a otra no produzca el mismo efecto entre niveles de demanda diferentes.

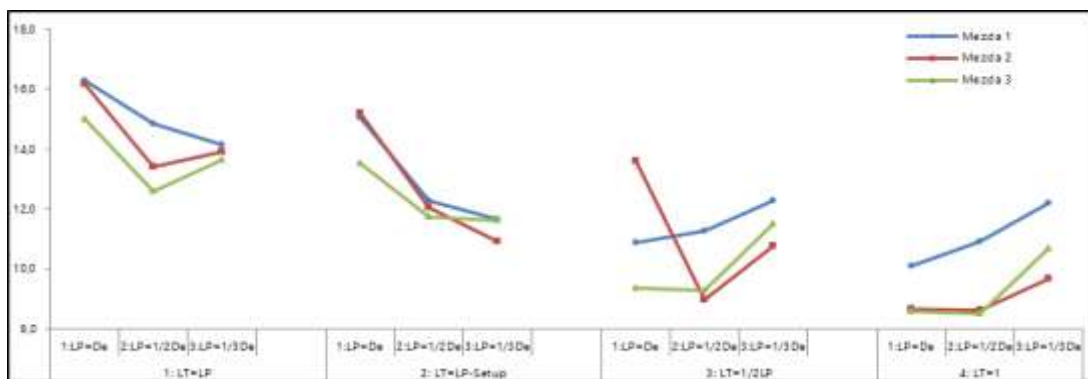


Figura 8. Gráfica línea MFT Vs Política Lote de Proceso – Demanda Básica

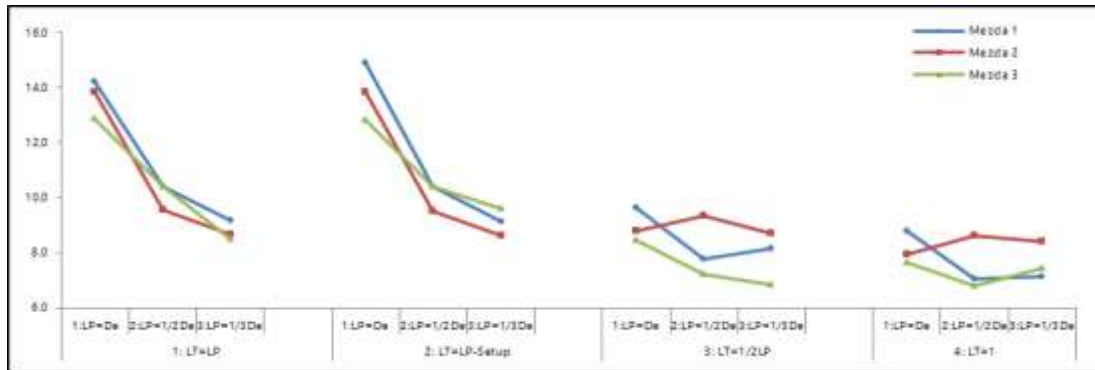


Figura 9. Gráfica Línea MFT Vs Lote de Proceso – Demanda Básica x 100

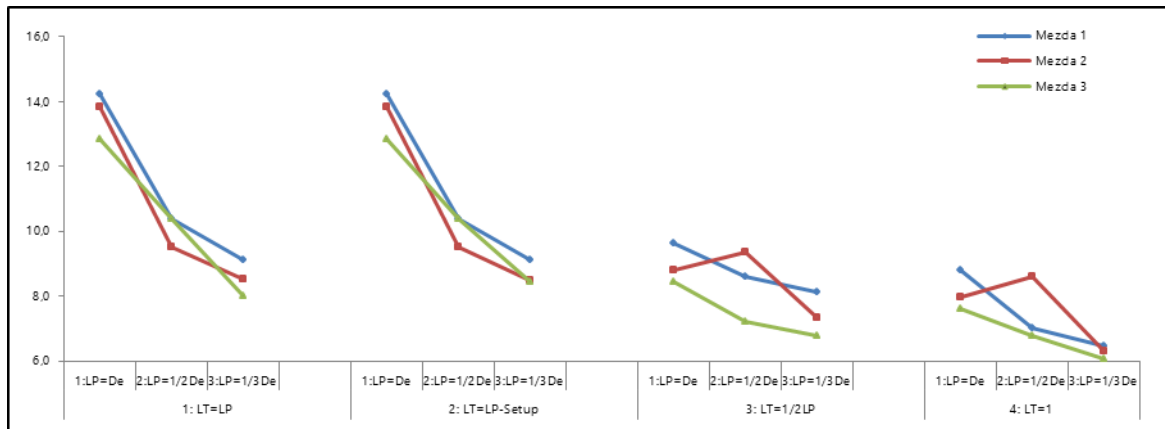


Figura 10. Gráfica línea MFT Vs Lote de Proceso – Demanda Básica x 1000

El mayor tiempo de flujo se genera siempre con la primera política de lote de transferencia y la primera política de lote de proceso independientemente del nivel de demanda analizado; es decir, en aquellos sistemas donde el lote de proceso es igual a la demanda planteada y que no consideran la estrategia de dividir los lotes de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño, el sistema siempre está más congestionado y se impide el flujo suave de los productos a través del mismo. Ahora bien, el menor tiempo de flujo generado por la combinación de las políticas de lote de transferencia y lote de proceso pareciera depender del

nivel de demanda al cual esté expuesto el sistema; ya que para el nivel de demanda básica, el menor tiempo de flujo se mostró con la primera política de lote de proceso (igual a la demanda) y la política de lote de transferencia unitario. En el nivel de demanda “Demanda Básicax100”, el menor tiempo de flujo se presentó con la utilización de lotes de proceso igual a la mitad de la demanda y la política de lote de transferencia unitario; y para el nivel de demanda “Demanda Básicax1000”, el menor tiempo de flujo se presentó con la utilización de lotes de proceso igual a la tercera parte de la demanda y la política de lote de transferencia unitario. Entonces, determinar la política que genera un mejor desempeño del sistema dependerá del nivel de demanda analizado.

El siguiente paso durante el análisis descriptivo consistió en analizar los datos en conjunto; para esto se calcularon estadísticos descriptivos (media, desviación, rango, valor mínimo/máximo) en cada nivel de demanda, los cuales se enuncian en las tablas 13, 14 y 15.

Al observar dichas tablas, se puede comprobar que en términos generales, los estadísticos descriptivos mostrados son representativos de las 3 mezclas, porque, muestran el mismo comportamiento observado en los gráficos anteriores. En primera instancia, se observa que al cambiar de la política de lote de transferencia igual al lote de proceso hacia políticas donde el lote de transferencia es de menor tamaño, siempre se genera una reducción en el tiempo medio de flujo independientemente del nivel de demanda y de la política de lote de proceso analizados.

**Tabla 13.** Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda básica

Política LP	Política LT	N	Statistics				
			Mean	Std Deviation	Range	Minimum	Maximum
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	<b>15,8</b>	0,7	1,3	15,0	16,3
	2: LT=LP-Setup	3	14,6	0,9	1,7	13,5	15,2
	3: LT=1/2LP	3	11,3	2,2	4,2	9,4	13,6
	4: LT=1	3	<b>9,1</b>	0,9	1,5	8,6	10,1
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	13,6	1,1	2,3	12,6	14,8
	2: LT=LP-Setup	3	12,0	0,3	0,6	11,7	12,3
	3: LT=1/2LP	3	9,8	1,3	2,3	9,0	11,3
	4: LT=1	3	9,3	1,4	2,4	8,5	10,9
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	13,9	0,3	0,5	13,6	14,1
	2: LT=LP-Setup	3	11,4	0,4	0,7	10,9	11,6
	3: LT=1/2LP	3	11,5	0,8	1,5	10,8	12,3
	4: LT=1	3	10,9	1,3	2,5	9,7	12,2

**Tabla 14.** Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda Básica x 100

Política LP	Política LT	N	Statistics				
			Mean	Std Deviation	Range	Minimum	Maximum
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	<b>13,7</b>	0,7	1,4	12,9	14,2
	2: LT=LP-Setup	3	13,9	1,0	2,1	12,8	14,9
	3: LT=1/2LP	3	9,0	0,6	1,2	8,5	9,6
	4: LT=1	3	8,1	0,6	1,2	7,6	8,8
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	10,1	0,5	0,9	9,5	10,4
	2: LT=LP-Setup	3	10,1	0,5	0,9	9,5	10,4
	3: LT=1/2LP	3	8,1	1,1	2,1	7,2	9,4
	4: LT=1	3	<b>7,5</b>	1,0	1,8	6,8	8,6
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	8,8	0,3	0,7	8,5	9,2
	2: LT=LP-Setup	3	9,1	0,5	1,0	8,6	9,6
	3: LT=1/2LP	3	7,9	1,0	1,9	6,8	8,7
	4: LT=1	3	7,7	0,7	1,3	7,1	8,4

También puede observarse que cuando se tienen altos niveles de demanda, independiente de la política de lote de proceso, al pasar de la primera política de lote de transferencia a las segunda no se reducen significativamente los tiempos de flujo (0,1% en el segundo nivel de demanda y 1% en el tercero en promedio), en comparación con la reducción en el nivel de demanda básica (12,1% en promedio).

**Tabla 15.** Estadísticos descriptivos – Mean Flow Time – Demanda Básica x 1000

Política LP	Política LT	N	Statistics				
			Mean	Std Deviation	Range	Minimum	Maximum
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	<b>13,6</b>	0,7	1,4	12,8	14,2
	2: LT=LP-Setup	3	13,6	0,7	1,4	12,8	14,2
	3: LT=1/2LP	3	8,9	0,6	1,2	8,4	9,6
	4: LT=1	3	8,1	0,6	1,2	7,6	8,8
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	10,1	0,5	0,9	9,5	10,4
	2: LT=LP-Setup	3	10,1	0,5	0,9	9,5	10,4
	3: LT=1/2LP	3	8,4	1,1	2,1	7,2	9,3
	4: LT=1	3	7,5	1,0	1,8	6,8	8,6
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	8,5	0,6	1,1	8,0	9,1
	2: LT=LP-Setup	3	8,7	0,4	0,7	8,4	9,1
	3: LT=1/2LP	3	7,4	0,7	1,4	6,8	8,1
	4: LT=1	3	<b>6,3</b>	0,2	0,4	6,1	6,4

Asimismo, se observa que para los niveles de demanda aumentada siempre al cambiar de una política de lote de proceso igual a la demanda hacia políticas de lotes de proceso más pequeños, se muestra una reducción importante en el tiempo de promedio de flujo (17% de pasar de un lote de proceso igual a la demanda a un lote de proceso igual a la mitad de la demanda y 25% de pasar de un lote de proceso igual a la demanda a un lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda) independientemente de la política de lote de transferencia considerada.

Pero para el nivel de demanda básica, el comportamiento de la reducción sobre el tiempo medio de flujo por el cambio en la política de lote de proceso depende de la política de lote de transferencia considerada; es decir, en los casos donde la política de lote de transferencia es igual al lote de proceso o donde se adelanta la preparación, al cambiar de una política de lote de proceso igual a la demanda hacia políticas de lotes de proceso más pequeños se muestra una reducción del tiempo de flujo (16% en promedio); pero en los casos donde la política de lote de transferencia permite tamaños más pequeños, al cambiar la política de lote de proceso hacia una

política de lote de proceso más pequeño, se genera un aumento del tiempo de flujo (3% en promedio). Lo anterior, puede ser consecuencia de la interacción existente entre los factores demanda y política lote de proceso, y entre los factores política lote de proceso y política lote de transferencia.

También se observa que para los tres niveles de demanda se obtiene el mayor tiempo promedio de flujo unitario con la política de tamaño de lote de transferencia igual a lote de proceso y lote de proceso igual a la demanda y que éste se va reduciendo a medida que se implementa el fraccionamiento de lotes, obteniendo los valores más pequeños con la política de lote de transferencia unitario y lote de proceso igual a la demanda, para la demanda básica; con la política de lote de transferencia unitario y lote de proceso igual a la mitad de la demanda para la demanda básicax100 y con la política de lote de transferencia unitario y lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda para la demanda básicax1000.

Asimismo, puede observarse que los valores del tiempo promedio de flujo por unidad en los dos niveles de demanda aumentada son muy parecidos, pero a su vez, son menores que los obtenidos en el nivel de demanda básica, lo cual indica que en los ambientes que exigen mayor uso de recursos, los productos van moviéndose de una estación a otra más rápidamente.

**5.1.2. Análisis de Varianza.** Aunque con el análisis descriptivo se obtuvieron hallazgos interesantes, éste análisis se complementó con el análisis de varianza, a fin de establecer la validez y significancia de los resultados obtenidos en la etapa anterior.

El análisis de varianza permite realizar comparaciones homogéneas entre cada combinación de tratamientos, para detectar los cambios producidos en la variable de respuesta como consecuencia de la influencia de los factores que se analizan. El análisis se basa en determinar el efecto causado por los factores: *política lote de proceso*, *política lote de transferencia* y *nivel demanda* sobre la variable “mean flow time”; así como el efecto de la interacción entre estos factores sobre la variables de respuesta relacionada con el tiempo.

La tabla 16, muestra el resumen de los resultados provenientes del análisis de varianza del experimento arrojado por SPSS 18 utilizando el procedimiento MLG con el objetivo de poder validar o rechazar las hipótesis enunciadas en la sección 4.1.4.

La tabla resumen del análisis de varianza contiene las fuentes de variación, las sumas de cuadrados, los grados de libertad, las medias cuadráticas, los estadísticos F y los niveles críticos asociados a cada estadístico F. Toda la información está referida a los efectos principales de los factores *política lote de proceso*, *política lote de transferencia* y *nivel de demanda*; No aparece la interacción entre los demás factores y el factor mezcla porque éste factor fue considerado como un factor bloque y se asume que su interacción no es significativa. En el anexo H, se realizan algunas pruebas para verificar que efectivamente éste supuesto se cumple.

El nivel crítico asociado al estadístico F de la fila modelo corregido “Corrected Model” ( $p=0,000 < 0,05$ ) indica que el modelo explica una parte significativa de la variación observada en el tiempo promedio de flujo. El valor  $R^2$  (0,976), indica que los 8 efectos incluidos en el modelo (*loteproceso*, *lotetransferencia*, *Demanda*, *mezcla*, *loteproceso\*lotetransferencia*,

loteproceto\*Demanda, lotetransferencia\*Demanda, loteproceto\*lotetransferencia\*Demanda) están explicando el 97,6% de la variabilidad mostrada en el tiempo promedio de flujo unitario.

**Tabla 16.** *Análisis de Varianza – Mean Flow Time – Demanda Básica x 1000*

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3453,379 <sup>a</sup>	35	98,668	82,427	,000
Intercept	30458,405	1	30458,405	25444,831	,000
loteproceto	1967,802	2	983,901	821,947	,000
lotetransferencia	708,083	3	236,028	197,177	,000
Demanda	528,261	2	264,131	220,654	,000
Mezcla	222,895	8	37,149	1,806	,000
loteproceto * lotetransferencia	6,149	6	1,025	,856	,531
loteproceto * Demanda	202,653	4	50,663	42,324	,000
lotetransferencia * Demanda	30,250	6	5,042	4,212	,001
loteproceto * lotetransferencia * Demanda	10,181	12	,848	,709	,738
Error	86,187	72	1,197		
Total	33997,970	108			
Corrected Total	3539,565	107			

a. R Squared = ,976 (Adjusted R Squared = ,964)

Las cuatro filas siguientes recogen los efectos principales, es decir, los efectos de los cuatros factores incluidos en el modelo: política lote de proceso, política lote de transferencia, nivel de demanda y mezcla. Los niveles críticos (Sig.) para estos cuatros factores ( $p=0,000 < 0,05$ ) proporcionan una evidencia en contra de la hipótesis nula; es decir, los efectos de la política lote de proceso, política lote de transferencia, nivel de demanda y mezcla en el tiempo medio de flujo unitario son significativos con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, el tiempo de flujo varía cuando se utilizan diferentes tamaños de lote de proceso, tamaños de lote de transferencia, niveles de demanda y mezclas de productos.

Analizando el estadístico F obtenido en la tabla 16 para los efectos del factor política lote de proceso (983,901), política lote de transferencia (236,028), nivel de demanda (264,131) y mezcla (222,895), se puede observar que, como el estadístico asociado con la política de lote de proceso es mayor que los demás, la implementación de una política de fraccionamiento de lote de proceso contribuye más a la variabilidad de los datos que los demás factores; seguido por el nivel de demanda considerado y la política de lote de transferencia. En conclusión, es posible reducir el tiempo medio de flujo mediante la selección de un tamaño de lote de proceso y lote de transferencia adecuado para cada nivel de demanda dentro de un sistema productivo tipo Job Shop.

Las filas 7, 8, 9 y 10 contienen información sobre el efecto de la interacción entre los factores considerados. El estadístico F correspondiente al efecto de la interacción entre los factores política lote de proceso-política lote de transferencia y los factores política lote de proceso-política lote de transferencia-Demanda llevan asociado un nivel crítico mayor a 0,05 (0,531 y 0,738 respectivamente), lo cual indica que la interacción entre estos factores no posee un efecto significativo sobre el tiempo promedio de flujo unitario. Ahora bien, el nivel crítico asociado con el estadístico F correspondiente al efecto de la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de transferencia-Demanda es menor a 0,05 (0,000 y 0,001), indicando que estas interacciones poseen un efecto significativo sobre el tiempo promedio de flujo; es decir, las diferencias que se dan en los tiempos de flujo entre las diferentes políticas de lote de proceso y lote de transferencia no son las mismas entre los tres niveles de demanda considerados.

Como ayuda para interpretar los resultados del experimento, se construyeron gráficos de las respuestas promedios para cada combinación de los tratamientos, denominado gráfico de perfil, los cuales, se muestran en las figuras 11 y 12. Las líneas de las dichas figuras muestran el significado de la interacción. Como las rectas no son completamente paralelas, la interacción es significativa, lo cual, es consecuente con los resultados del análisis de varianza. Cuando analizamos la Figura 11, se puede concluir que en niveles de demanda pequeños (demanda básica) se consigue el menor del tiempo medio de flujo cuando el lote de proceso es igual a la mitad de la demanda; pero para niveles de demanda de mayor tamaño (demanda aumentadas) se consigue el menor tiempo de flujo cuando el lote de proceso es igual a la tercera parte de la demanda (menor tamaño).

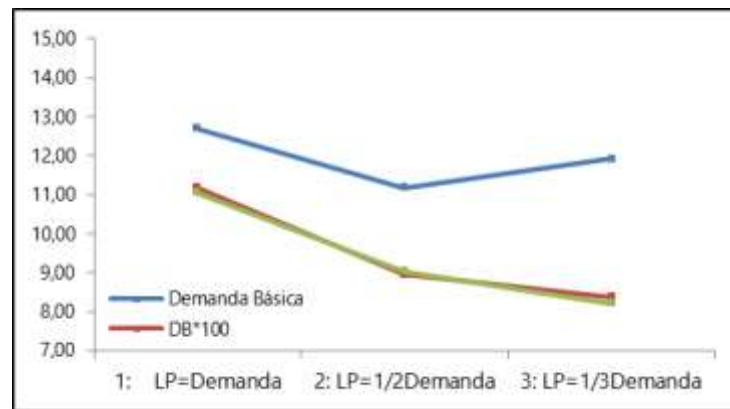


Figura 11. Gráfico de perfil – MFT: Lote de proceso/Demanda

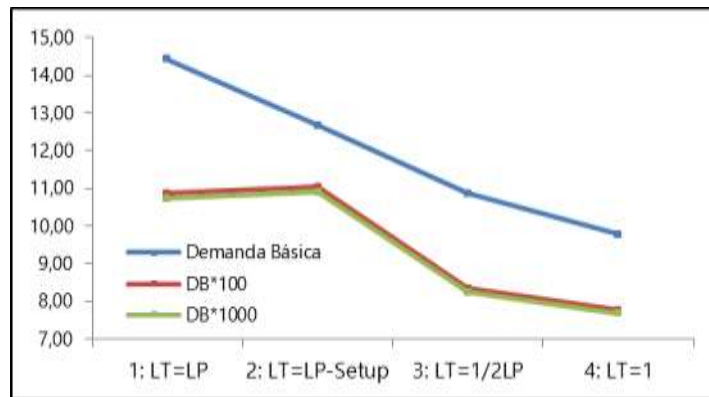


Figura 12. Gráfico de perfil – MFT: Lote de transferencia/Demanda

Analizando ahora la Figura 12, se observa que el menor tiempo de flujo unitario a través de todos los niveles de demanda siempre se encuentra con tamaños de lote de transferencia unitarios. Sin embargo, se puede observar que al pasar de la primera política de operación a la segunda, el tiempo medio de flujo sólo disminuye en el nivel de demanda básica y se mantiene sin cambio para los niveles de demanda aumentada. El comportamiento anterior, demuestra la influencia del tiempo de preparación, porque, cuando se fabrican lotes de proceso pequeños, el tiempo de preparación de la máquina representa una proporción importante del tiempo de procesamiento total del lote. Por otra parte, con demandas y lotes de proceso grandes, el tiempo de preparación de la máquina en comparación con el tiempo de fabricación del lote es prácticamente despreciable, por lo que en estos ambientes la aplicación de una política para anticipar las preparaciones no contribuye a mejorar el desempeño del sistema si ésta no va acompañada adicionalmente de una política de fraccionamiento de lotes.

La descomposición de la variabilidad presente en las observaciones mediante el análisis de varianza requiere que se satisfagan ciertos supuestos. Específicamente, esos supuestos son que

el modelo describe de manera adecuada las observaciones, y que los errores siguen una distribución normal e independiente con media cero y varianza  $\sigma^2$  constante pero desconocida. Para comprobar que las conclusiones del análisis de varianza son válidas, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad en el Anexo I.

**5.1.3. Efectos simples y comparaciones múltiples.** Como la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de transferencia-Demanda resultó significativa, es necesario realizar análisis de efectos simples y de contrastes particulares de medias para dichas interacciones.

Efectos simples: El análisis de efectos simples permite comprobar si existen diferencias significativas entre los niveles del factor política de lote dentro de cada nivel de demanda.

Las tablas 17 y 18, muestran los resultados obtenidos con el análisis de efectos de simples para evaluar la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de transferencia-Demanda respectivamente, las tablas muestran el valor F y el nivel de significancia en cada nivel del factor demanda.

Los resultados obtenidos para las dos interacciones entre los factores lote de proceso y lote de transferencia con el factor Demanda es menor a 0,05; indican que existe una diferencia significativa entre los niveles de la política de lote de proceso y lote de transferencia en el nivel de demanda básica y los niveles de demanda aumentada.

**Tabla 17.** *Análisis de efectos simples – Mean Flow Time: Loteprocreso/Demanda*

<b>Demanda</b>		<b>Sum of Squares</b>	<b>df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Demanda básica	Contrast	1376,329	2	688,164	574,890	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		
Demanda basicax100	Contrast	413,376	2	206,688	172,666	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		
Demanda basicax1000	Contrast	380,751	2	190,375	159,039	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		

Each F tests the simple effects of loteprocreso within each level combination of the other effects shown. These tests are based on the linearly independent pairwise comparisons among the estimated marginal means.

**Tabla 18.** *Análisis de efectos simples – Mean Flow Time: Lotetransferencia/Demanda*

<b>Demanda</b>		<b>Sum of Squares</b>	<b>df</b>	<b>Mean Square</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Demanda básica	Contrast	305,427	3	101,809	85,051	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		
Demanda basicax100	Contrast	217,607	3	72,536	60,596	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		
Demanda basicax1000	Contrast	215,299	3	71,766	59,953	<b>,000</b>
	Error	86,187	72	1,197		

Each F tests the simple effects of lotetransferencia within each level combination of the other effects shown. These tests are based on the linearly independent pairwise comparisons among the estimated marginal means.

Como los estadísticos F correspondientes a los efectos simples son significativos, se sabe que existen diferencias entre las políticas de operación en cada nivel de demanda, pero no se sabe dónde se encuentran, es decir, no se conoce en concreto que políticas difieren de las demás en cada uno de los niveles de demanda.

*Comparaciones múltiples:* Como la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de transferencia-Demanda es significativa, las comparaciones entre las medias del factor política lote de proceso y política lote de transferencia pueden ser oscurecidas

por dicha interacción. Para evitar esto, se aplicaron las pruebas de comparaciones múltiples en cada nivel de demanda por separado.

Las tablas 19 y 20 muestran el resultado obtenido en las comparaciones múltiples mediante la prueba Sidak; sin embargo, en el Anexo I se muestra un resumen de los resultados obtenidos con las comparaciones múltiples de las pruebas de Bonferroni y LSD. Puede observarse que se llega a las mismas conclusiones.

*Interacción política lote de proceso-Demanda:* En la tabla 19 se puede observar que las comparaciones entre las diferentes políticas de lote de proceso en todos los niveles de demanda difieren estadísticamente, es decir, en todos los niveles de demanda el desempeño del sistema por la aplicación de diferentes políticas de lote de proceso varía considerablemente.

**Tabla 19.** Comparaciones múltiples – Mean Flow Time: Loteprocreso/Demanda

Demanda	(I) loteprocreso	(J) loteprocreso	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. <sup>a</sup>	95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup>	
						Lower Bound	Upper Bound
Demanda basica	1/2Demanda	1/3Demanda	8,567 <sup>*</sup>	,447	,000	-9,659	-7,475
		Demanda	6,533 <sup>*</sup>	,447	,000	5,441	7,625
	1/3Demanda	1/2Demanda	-8,567 <sup>*</sup>	,447	,000	7,475	9,659
Demanda basicax100	Demanda	1/2Demanda	-15,100 <sup>*</sup>	,447	,000	14,008	16,192
		1/3Demanda	-6,533 <sup>*</sup>	,447	,000	-7,625	-5,441
	1/2Demanda	1/3Demanda	15,100 <sup>*</sup>	,447	,000	-16,192	-14,008
Demanda basicax1000	1/2Demanda	1/3Demanda	-4,083 <sup>*</sup>	,447	,000	-5,175	-2,991
		Demanda	4,217 <sup>*</sup>	,447	,000	3,125	5,309
	1/3Demanda	1/2Demanda	4,083 <sup>*</sup>	,447	,000	2,991	5,175
Demanda basicax1000	Demanda	Demanda	8,300 <sup>*</sup>	,447	,000	7,208	9,392
		1/2Demanda	-4,217 <sup>*</sup>	,447	,000	-5,309	-3,125
	1/3Demanda	1/2Demanda	-8,300 <sup>*</sup>	,447	,000	-9,392	-7,208
Demanda basicax1000	1/2Demanda	1/3Demanda	-3,675 <sup>*</sup>	,447	,000	-4,767	-2,583
		Demanda	4,283 <sup>*</sup>	,447	,000	3,191	5,375
	1/3Demanda	1/2Demanda	3,675 <sup>*</sup>	,447	,000	2,583	4,767
Demanda basicax1000	Demanda	Demanda	7,958 <sup>*</sup>	,447	,000	6,866	9,050
		1/2Demanda	-4,283 <sup>*</sup>	,447	,000	-5,375	-3,191
		1/3Demanda	-7,958 <sup>*</sup>	,447	,000	-9,050	-6,866

Based on estimated marginal means

\*. The mean difference is significant at the 0,05 level./ a. Adjustment for multiple comparisons: Sidak.

Ahora bien, si observamos las diferencias obtenidas en el nivel de demanda básica, se observa que el menor tiempo de flujo se presenta cuando se utilizan lotes de proceso igual a la mitad de la demanda, demostrando que para sistemas de manufactura con demandas pequeñas se puede mejorar el movimiento de las partes a través del sistema sólo hasta la división de la demanda en dos partes; porque, el valor que se obtiene del tiempo medio de flujo por unidad es estadísticamente diferente al valor obtenido cuando no se contempla la política de división en lotes de proceso. De igual forma, aunque la política de división de la demanda en tres lotes de proceso muestra valores estadísticamente diferentes al valor obtenido cuando no se contempla la política de división en lotes de proceso, en este caso la diferencia es positiva; indicando que para sistemas de manufactura con demandas pequeñas dividir dicha demanda en tres lotes de proceso, desmejora el movimiento de las partes dentro del sistema. Por otra lado, para los niveles de demanda aumentada, el menor tiempo de flujo siempre se presenta cuando se utilizan lotes de proceso igual a la tercera parte de la demanda indicando que para sistemas de manufactura con grandes demandas se puede mejorar el movimiento de las partes a través del sistema mediante la división de la demanda en mínimo tres partes; porque, el valor que se obtiene del tiempo medio de flujo por unidad es estadísticamente diferente al valor obtenido cuando no se contempla la política de división en lotes de proceso.

Interacción política lote de transferencia -Demanda: Al observar la Tabla 21, las comparaciones entre las diferentes políticas en el nivel de demanda básica, se puede argumentar que todos los promedios comparados difieren estadísticamente, es decir, que en el nivel de demanda básica el desempeño del sistema por la aplicación de diferentes políticas de tamaño de lote de transferencia varía considerablemente, obteniendo el menor tiempo de flujo cuando se

utilizan lotes de transferencia unitarios. Entonces, si se pasa de una política en la cual no se contempla la división del lote de proceso en lotes de transferencia hacia una política de división del lote de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño, siempre se mejora el movimiento de las partes a través del sistema, obteniendo el mejor desempeño con lotes de transferencia unitarios. Por otro lado, se puede observar que en los dos niveles de demanda aumentada, los valores de las diferencias son similares, lo cual, es consecuente con los hallazgos obtenidos en la gráfica de perfil, en donde las rectas para estos dos niveles de demanda se encuentran casi justo una encima de la otra.

En cuanto a las diferencias obtenidas en estos dos niveles de demanda aumentada, se puede observar que en contraste con el nivel de demanda básica, en estas dos demandas aumentadas, no hay diferencias significativas entre utilizar la primera política y la segunda política (lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando la preparación de las máquinas siguientes). Por lo tanto, anticipar el tiempo de preparación en sistemas productivos similares a la configuración estudiada, cuando se fabrica un gran número de productos, no permite mejorar significativamente el tiempo promedio de flujo. Pero al igual que en la demanda básica, las diferencias entre la primera política (no división de lotes) y las dos últimas (lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso y lote de transferencia unitario) son significativas. La diferencia más significativa se obtuvo entre las dos primeras y la última, lo cual indica que pasar de un lote de transferencia igual al lote de proceso cuando se anticipa o no el tiempo de preparación a un lote de transferencia unitario permite reducir significativamente el tiempo medio de flujo, haciendo que ésta última política sea la más conveniente en sistemas productivos tipo “job sop” en los que se fabrica gran cantidad de productos.

**Tabla 20.** Comparaciones Múltiples – Mean Flow Time: Lotettransferencia/Demanda

Demanda	(I) lotetferenc ia	(J) lotetferere ncia	Mean Differen ce (I-J)	Std. Erro r	Sig. <sup>a</sup>	95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup>	
						Lower Bound	Upper Bound
Demanda basica	1/2LP	LP	-6,267*	,516	,000	-7,662	-4,871
		LP- Setup	-3,133*	,516	,000	-4,529	-1,738
		Unitario	1,233*	,516	,111	-,162	2,629
	LP	1/2LP	6,267*	,516	,000	4,871	7,662
		LP- Setup	3,133*	,516	,000	1,738	4,529
		Unitario	7,500*	,516	,000	6,105	8,895
	LP- Setup	1/2LP	3,133*	,516	,000	1,738	4,529
		LP	-3,133*	,516	,000	-4,529	-1,738
		Unitario	4,367*	,516	,000	2,971	5,762
	Unitario	1/2LP	-1,233*	,516	,111	-2,629	,162
		LP	-7,500*	,516	,000	-8,895	-6,105
		LP- Setup	-4,367*	,516	,000	-5,762	-2,971
Demanda basicax100	1/2LP	LP	-4,422*	,516	,000	-5,818	-3,027
		LP- Setup	-4,456*	,516	,000	-5,851	-3,060
		Unitario	1,878*	,516	,444	-,518	2,273
	LP	1/2LP	4,422*	,516	,000	3,027	5,818
		LP- Setup	<b>-,033</b>	,516	1,000	-1,429	1,362
		Unitario	5,300*	,516	,000	3,905	6,695
	LP- Setup	1/2LP	4,456*	,516	,000	3,060	5,851
		LP	<b>,033</b>	,516	1,000	-1,362	1,429
		Unitario	5,333*	,516	,000	3,938	6,729
	Unitario	1/2LP	-1,878*	,516	,444	-2,273	,518
		LP	-5,300*	,516	,000	-6,695	-3,905
		LP- Setup	-5,333*	,516	,000	-6,729	-3,938
Demanda basicax1000	1/2LP	LP	-4,433*	,516	,000	-5,829	-3,038
		LP- Setup	-4,311*	,516	,000	-5,706	-2,916
		Unitario	1,944*	,516	,358	-,451	2,340
	LP	1/2LP	4,433*	,516	,000	3,038	5,829
		LP- Setup	<b>,122</b>	,516	1,000	-1,273	1,518
		Unitario	5,378*	,516	,000	3,982	6,773
	LP- Setup	1/2LP	4,311*	,516	,000	2,916	5,706
		LP	<b>-,122</b>	,516	1,000	-1,518	1,273
		Unitario	5,256*	,516	,000	3,860	6,651
	Unitario	1/2LP	-1,944*	,516	,358	-2,340	,451
		LP	-5,378*	,516	,000	-6,773	-3,982
		LP- Setup	-5,256*	,516	,000	-6,651	-3,860

Based on estimated marginal means

\*. The mean difference is significant at the 0,05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Sidak.

Con los hallazgos anteriores se estableció que para las políticas de lote de proceso o lote de transferencia son estadísticamente diferentes en cada nivel de demanda, pero, resulta interesante investigar en qué nivel de demanda la combinación entre la política de lote de proceso y la política de lote de transferencia genera la diferencia más significativa sobre el valor del tiempo medio de flujo respecto a una política que no considera la división de lotes dentro del sistema. De acuerdo a lo anterior, y con base en los tiempos promedio de flujo de las 3 mezclas en cada política de operación y nivel de demanda, se calculó un intervalo de confianza del 95% para estimar los porcentajes de cambio de la variable de desempeño en los pares de políticas que reportaron diferencias significativas con la prueba de Sidak. La tabla 21 muestra los resultados obtenidos. No se consideró el cambio de la primera política de lote de transferencia a la segunda en los niveles de demanda aumentada porque su diferencia no es significativa.

Al analizar los porcentajes de reducción obtenidos sobre la variable “mean flow time” respecto a una política que no considera el fraccionamiento de lotes de proceso ni lotes de transferencia, se puede concluir que:

Para un sistema de manufactura tipo “Job Shop” similar al analizado en la presente investigación con un nivel de demanda relativamente pequeño, la estrategia que permite la mayor reducción en el tiempo promedio de flujo y por ende permite la reducción de inventarios; es aquella que considera la división de la demanda en dos lotes de proceso de igual tamaño y permite lotes de transferencia unitarios. Por otra parte, la estrategia que muestra la menor reducción sobre el tiempo promedio de flujo es aquella que no considera la división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño y sólo permite adelantar el tiempo de alistamiento de la máquina siguiente antes de ser terminado el procesamiento en la máquina precedente.

**Tabla 21.** Intervalos de confianza – Mean Flow Time

Demand a	Política Lote de Proceso	Política Lote de Transferencia	Límite Inferior	Límite Superior	Promedio Reducción MFT		
Demanda Básica	1: LP=Demand a	1: LP=Demand a	2: LT=LP-Setup 3: LT=1/2LP 4: LT=1	7% 26% 39%	8% 31% 46%	8% 28% 42%	
		2: LP=1/2Demand a	1: LT=LP 2: LT=LP-Setup 3: LT=1/2LP 4: LT=1	13% 24% 35% 39%	15% 27% 48% 52%	14% 26% 42% 46%	
		3: LP=1/3Demand a	1: LT=LP 2: LT=LP-Setup 3: LT=1/2LP 4: LT=1	12% 28% 34% 30%	12% 31% 42% 38%	12% 30% 40% 34%	
		1: LP=Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	32% 37% 37%	37% 44% 44%	34% 41% 41%	
		2: LP=1/2Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	25% 39% 44%	28% 53% 60%	26% 46% 52%	
		3: LP=1/3Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	34% 39% 43%	37% 53% 53%	36% 46% 48%	
	Demanda Básica x 100	1: LP=Demand a	1: LP=Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	32% 37% 37%	37% 44% 44%	35% 40% 40%
			2: LP=1/2Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	24% 36% 44%	27% 49% 59%	26% 43% 51%
			3: LP=1/3Demand a	1: LT=LP 3: LT=1/2LP 4: LT=1	35% 45% 61%	40% 56% 66%	38% 50% 63%

Al igual que para demandas pequeñas, para un sistema de demanda mediana (básicax100), la estrategia que permite la mayor reducción en el tiempo promedio de flujo; es aquella que considera la división de la demanda en dos lotes de proceso de igual tamaño y permite lotes de transferencia unitarios. Sin embargo, la estrategia que muestra la menor reducción sobre el tiempo promedio de flujo es aquella que considera la división de la demanda

en dos lotes de proceso de igual tamaño pero no permite la división de dicho lote de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño.

Para sistemas productivos con grandes demandas, la estrategia que permite la mayor reducción en el tiempo promedio de flujo es aquella que considera la división de la demanda en tres lotes de proceso de igual tamaño y permite lotes de transferencia unitarios; y la estrategia que muestra la menor reducción sobre el tiempo promedio de flujo es aquella que considera la división de la demanda en dos lotes de proceso de igual tamaño pero no permite la división de dicho lote de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño.

Por último, analizando la tabla se observa que en promedio la utilización de políticas de fraccionamiento de lotes de proceso y lotes de transferencia genera una mayor reducción en el tiempo promedio de flujo en sistemas de manufactura con grandes demandas (43% de reducción) que en sistemas de manufactura con demandas pequeñas (21% de reducción).

## **5.2. Análisis estadístico de la variables “costos Totales”**

Esta variable se calculó a partir de los costos totales en los que incurre el sistema por realizar cada uno de los 3 trabajos que se fabrican en el sistema productivo, como se indicó en la sección 4.1.3. Los costos totales promedio por unidad obtenidos se muestran en la tabla 22.

Al igual que el análisis estadístico realizado con la variable mean flow time, el análisis de la variable “costos totales por unidad” consta de tres partes: 1) Análisis descriptivo, 2) análisis de

varianza y 3) análisis de comparaciones múltiples, los cuales se realizaron con la herramienta SPSS.

**5.2.1. Análisis descriptivo.** Al observar los gráficos de línea es difícil analizar el impacto sobre los “Costos Totales por unidad” al cambiar entre las diferentes políticas de lote de proceso y lote de transferencia; por lo cual se evaluó adicionalmente los datos por medio de estadísticos descriptivos (media, desviación, rango, valor mínimo/máximo) en cada nivel de demanda, los cuales se muestran en las tablas 23, 24 y 25.

**Tabla 22.** Resultados – Costos Totales promedio por unidad

Política LP	Política LT	0: Demanda Básica			1: Demanda Básica x 100			2: Demanda Básica x 1000		
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
1: LP=Demanda	1: LT=LP	13,2	10,7	13,2	10,9	8,4	10,9	10,8	8,3	10,8
	2: LT=LP- Trans	12,5	10,1	12,6	10,8	8,4	10,9	10,8	8,3	10,8
	3: LT=1/2LP	10,2	8,2	9,4	7,5	6,1	6,7	7,5	6,1	6,7
	4: LT=1	98,0	97,1	97,9	97,0	95,8	96,7	96,9	95,8	96,7
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	11,9	10,5	11,5	7,5	6,3	7,4	7,5	6,3	7,4
	2: LT=LP- Trans	11,5	10,5	11,2	7,5	6,3	7,4	7,5	6,3	7,4
	3: LT=1/2LP	9,7	9,7	9,7	6,4	5,3	6,7	6,4	5,3	6,7
	4: LT=1	189,0	189,0	189,0	186,4	185,3	186,7	186,4	185,3	186,7
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	13,3	13,3	13,3	6,8	5,9	7,2	6,8	5,8	7,1
	2: LT=LP- Trans	13,3	13,3	13,3	6,8	5,9	7,2	6,8	5,8	7,1
	3: LT=1/2LP	12,5	12,5	12,5	6,5	5,4	6,7	6,4	5,3	6,7
	4: LT=1	281,0	281,0	281,0	276,4	275,3	276,7	276,4	275,3	276,7

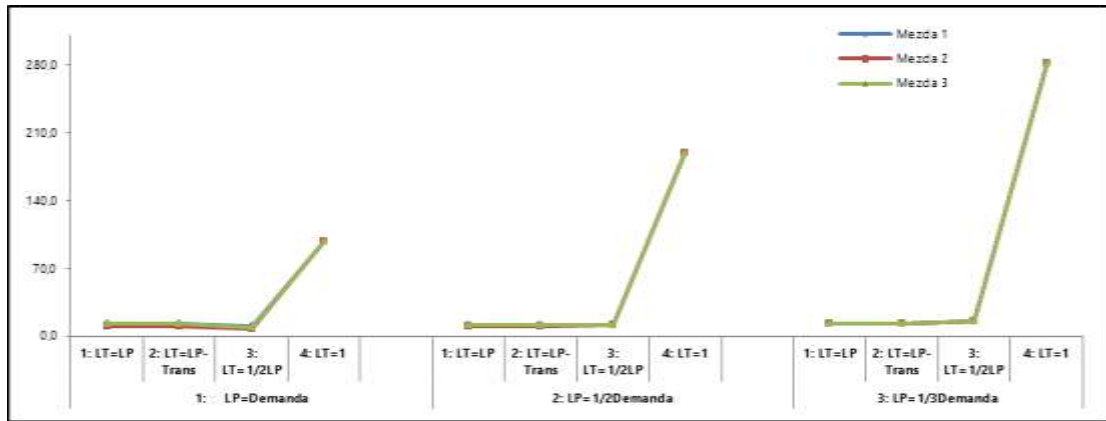


Figura 13. Gráfico de línea Costo Total Vs lote de transferencia Demanda Básica

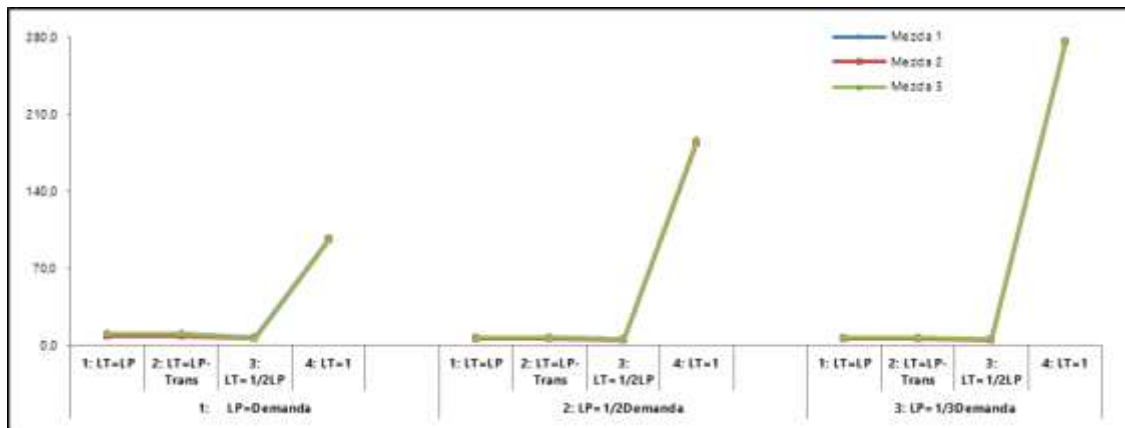


Figura 14. Gráfico de línea Costo Total Política lote de transferencia Demanda Básica x100

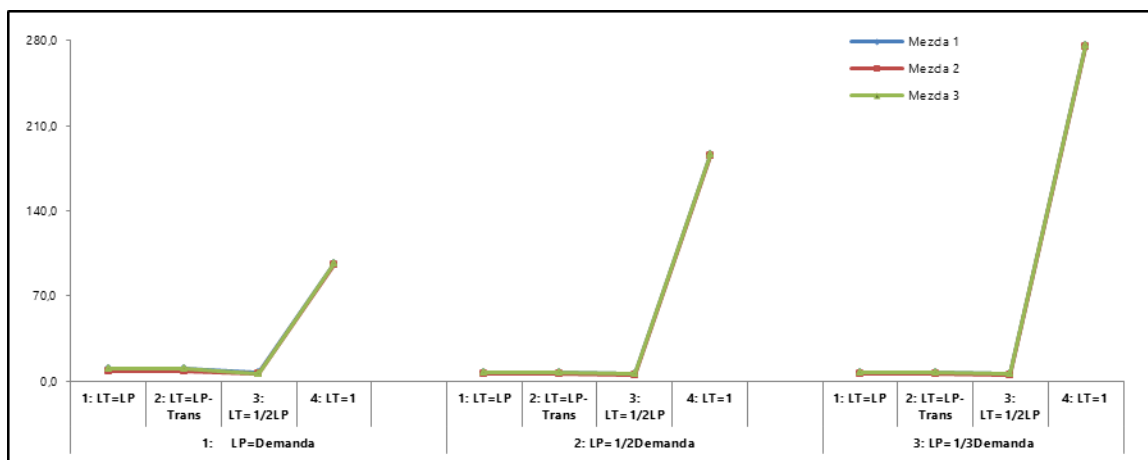


Figura 15. Gráfico de línea Costo Total Política lote de transferencia Demanda Básica x1000

En las tablas puede observarse, que independiente de la política de lotes de proceso y el nivel de demanda que se esté evaluando, al cambiar de la política de operación de lote de transferencia igual al lote de proceso hacia la utilización de lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso, se reduce el costo total por unidad producida en el sistema. Sin embargo, al cambiar la política de operación de lote de transferencia hacia una política de lote de transferencia unitario, siempre se incrementa notablemente (por encima del valor mostrado con las tres anteriores políticas) el costo total por unidad producida.

**Tabla 23.** Estadístico descriptivos – Costo Total por unidad – Demanda básica

		Statistics					
Política LP	Política LT	N	Mean	Std Deviation	Range	Minimun	Maximun
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	12,3	1,4	2,5	10,7	13,2
	2: LT=LP-Setup	3	11,7	1,4	2,5	10,1	12,6
	3: LT=1/2LP	3	<b>9,2</b>	1,0	2,0	8,2	10,2
	4: LT=1	3	97,7	0,5	0,9	97,1	98,0
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	11,3	0,7	1,4	10,5	11,9
	2: LT=LP-Setup	3	11,1	0,5	1,0	10,5	11,5
	3: LT=1/2LP	3	9,7	0,0	0,0	9,7	9,7
	4: LT=1	3	189,0	0,0	0,0	189,0	189,0
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	13,3	0,0	0,0	13,3	13,3
	2: LT=LP-Setup	3	13,3	0,0	0,0	13,3	13,3
	3: LT=1/2LP	3	12,5	0,0	0,0	12,5	12,5
	4: LT=1	3	<b>281,0</b>	0,0	0,0	281,0	281,0

De acuerdo con lo anterior, es posible que el uso de lotes de transferencia igual al lote de proceso adelantando el tiempo de preparación e incluso un lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso ayuda a reducir los costos en que incurre el sistema, detrás de una reducción significativa del inventario en producto en proceso.

Sin embargo, al considerar una política de lote de transferencia unitario, los costos en los que incurre el sistema muestran un incremento significativo impulsado por la explosión en el

costo de transporte de cada uno de los lotes de transferencia dentro del sistema y que a pesar de la reducción mostrada en el costos relacionados con el inventario de producto en proceso, no compensa el incremento alcanzado por dichos costos de transporte de lotes.

**Tabla 24.** Estadístico descriptivos Costo Total por unidad – Demanda básica x100

Política LP	Política LT	N	Statistics				
			Mean	Std Deviation	Range	Minimun	Maximun
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	10,0	1,4	2,5	8,4	10,9
	2: LT=LP-Setup	3	10,0	1,4	2,5	8,4	10,9
	3: LT=1/2LP	3	6,8	0,7	1,4	6,1	7,5
	4: LT=1	3	96,5	0,6	1,1	95,8	97,0
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	7,1	0,7	1,3	6,3	7,5
	2: LT=LP-Setup	3	7,1	0,7	1,3	6,3	7,5
	3: LT=1/2LP	3	<b>6,2</b>	0,7	1,4	5,3	6,7
	4: LT=1	3	186,1	0,7	1,4	185,3	186,7
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	6,6	0,7	1,3	5,9	7,2
	2: LT=LP-Setup	3	6,6	0,7	1,3	5,9	7,2
	3: LT=1/2LP	3	<b>6,2</b>	0,7	1,4	5,4	6,7
	4: LT=1	3	<b>276,1</b>	0,7	1,4	275,3	276,7

**Tabla 25.** Estadístico descriptivos Costo Total por unidad – Demanda básica x 1000

Política LP	Política LT	N	Statistics				
			Mean	Std Deviation	Range	Minimun	Maximun
1: LP=Demanda	1: LT=LP	3	10,0	1,4	2,5	8,3	10,8
	2: LT=LP-Setup	3	10,0	1,4	2,5	8,3	10,8
	3: LT=1/2LP	3	6,8	0,7	1,4	6,1	7,5
	4: LT=1	3	96,5	0,6	1,1	95,8	96,9
2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	3	7,0	0,7	1,3	6,3	7,5
	2: LT=LP-Setup	3	7,0	0,7	1,3	6,3	7,5
	3: LT=1/2LP	3	<b>6,1</b>	0,7	1,4	5,3	6,7
	4: LT=1	3	186,1	0,7	1,4	185,3	186,7
3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	3	6,6	0,7	1,3	5,8	7,1
	2: LT=LP-Setup	3	6,6	0,7	1,3	5,8	7,1
	3: LT=1/2LP	3	<b>6,1</b>	0,7	1,4	5,3	6,7
	4: LT=1	3	<b>276,1</b>	0,7	1,4	275,3	276,7

Asimismo, puede observarse que el efecto causado sobre los costos totales por unidad producida al cambiar la política de lote de transferencia es el mismo a través de todos los niveles de demanda, indicando que posiblemente no hay interacción significativa entre las políticas de

operación de lote de transferencia y el nivel de demanda. Por el contrario, puede observarse a través de todos los niveles de demanda, que el efecto generado sobre los costos totales por unidad al cambiar la política de lote de transferencia es distinto a través de cada uno de los niveles de la política de lote de proceso; en la primera política de lote de proceso (Igual a la demanda) siempre se obtienen las mayores reducciones en el costo total por unidad (25% de reducción en promedio) al pasar de una política de lote de transferencia igual al lote de proceso hacia las dos políticas siguientes (anticipando la preparación de la máquina siguiente e igual a la mitad del lote de proceso); pero a medida que se cambia hacia políticas de lote de proceso de menor tamaño, las reducciones obtenidas sobre el costo total son menores al pasar de la primera política de lote de transferencia hacia la segunda y la tercera (13% y 6% respectivamente). El anterior comportamiento, puede estar indicando que hay una interacción significativa entre los factores política lote de proceso y política lote de transferencia.

Ahora bien, si se observa el comportamiento del costo total por unidad cuando se cambia de política de operación del lote de proceso hacia la utilización de lotes de proceso más pequeños, se observa que en los niveles de demanda aumentada se logra reducir el costo total por unidad; sin embargo, para el nivel de demanda básica sólo se reduce el costo total por unidad cuando se pasa de una política de lote de proceso igual a la demanda a un lote de proceso igual a la mitad de la demanda; esto dentro de las tres primeras políticas de lote de transferencia (igual al lote de proceso, igual al lote de proceso anticipando la preparación e igual a la mitad de la demanda) ya que para la política de lote de transferencia unitario, al pasar de una política de lote de proceso igual a la demanda hacia un lote de proceso igual a la tercera parte de la misma, siempre se incrementa significativamente el costo total por unidad producida. Este

comportamiento es otro indicio de que la interacción entre la política de lote de proceso y el nivel de demanda sea significativa.

El mayor costo total por unidad siempre se genera con la última política de lote de transferencia y la última política de lote de proceso, es decir, cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios y cuando la demanda se divide en lotes de proceso iguales a la tercera parte de la demanda. Entonces, la política que más genera costos en el sistema es aquella en la que se contempla el fraccionamiento de lotes de transferencia unitario y la demanda se divide en tres lotes de proceso; debido al alto costo relacionado con el transporte de lotes unitarios dentro del sistema que a pesar del posible reducción en los costos por inventario de producto en proceso, no se logra compensar el aumento importante mostrado por el transporte de lotes.

Ahora bien, el menor costo total por unidad producida se genera con la política de lote de proceso igual a la demanda y con la política de lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso para la demanda básica. Pero, para los niveles de demanda aumentada el menor costo total por unidad se presente con la política de lote de proceso igual a la mitad de la demanda o igual a la tercera parte de la demanda pero sólo con una política de lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso. Entonces, para determinar la política de loteo que genera el mayor beneficio para el sistema siempre dependerá del nivel de demanda analizado.

También, puede observarse que los valores del costo total por unidad en los dos niveles de demanda aumentada son muy parecidos, pero a su vez, son menores que los obtenidos en el nivel de demanda básica, lo cual indica que en los ambientes que exigen mayor uso de recursos,

con una adecuada política de loteo se pueden reducir los costos de producción posiblemente debido a un menor inventario de producto en proceso.

Al igual que para la variable tiempo promedio de flujo; el uso de las mezclas como factor bloque fue una buena elección, ya que en los tres niveles de demanda analizados, mezclas diferentes originan valores diferentes en el costo por unidad, influyendo así este factor en la variabilidad de la medida de desempeño.

Adicionalmente, cuando se pasa de una política de operación a otra tanto de lote de proceso como lote de transferencia y de un nivel de demanda a los demás, la mezcla tiene el mismo efecto en el “costo promedio por unidad”, es decir, aquellas mezclas con costos por unidad más altos o más bajos siguen conservando su posición; este comportamiento es un indicio de que no existe interacción entre el factor mezcla y los factores política de lote de proceso, política lote de transferencia y nivel de demanda.

**5.2.2. Análisis de varianza.** Para el caso del Costo Total por unidad, el análisis se basa en evaluar el efecto causado por los factores: política lote de proceso, política lote de transferencia y nivel demanda; así como su interacción. La tabla 26, muestra el resumen del análisis de varianza completo del experimento arrojado por SPSS a través del procedimiento MLG (Modelo Lineal General).

En la tabla resumen del análisis de varianza no aparece interacción entre los demás factores y el factor mezcla, porque éste última es un factor bloque y se ha asumido que su interacción no es significativa. En el anexo K, se realizan algunas pruebas para verificar que efectivamente éste supuesto se cumple.

**Tabla 26.** *Análisis de Varianza – Costo Total por unidad*

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	792646,808 <sup>a</sup>	35	22647,052	34032,261	,000
Intercept	307968,480	1	307968,480	462791,530	,000
loteprocso	35585,417	2	17792,709	26737,525	,000
lotetransferencia	644932,534	3	214977,511	323051,799	,000
Demanda	366,547	2	183,273	275,409	,000
Mezcla	179,360	8	89,680	107,224	,000
loteprocso * lotetransferencia	111682,664	6	18613,777	27971,364	,000
loteprocso * Demanda	71,112	4	17,778	26,715	,000
lotetransferencia * Demanda	7,168	6	1,195	1,795	,112
loteprocso * lotetransferencia * Demanda	1,366	12	,114	,171	,999
Error	47,913	72	,665		
Total	1100663,201	108			
Corrected Total	792694,721	107			

a. R Squared = ,991 (Adjusted R Squared = ,985)

El nivel crítico asociado al estadístico F de la fila modelo corregido “Corrected Model” ( $p=0,000 < 0,05$ ) indica que el modelo explica una parte significativa de la variación observada en el Costo Total por Unidad. El valor R2 (0,991), indica que los 8 efectos incluidos en el modelo (loteprocso, lotetransferencia, Demanda, mezcla, loteprocso\*lotetransferencia, loteprocso\*Demanda, lotetransferencia\*Demanda, loteprocso\*lotetransferencia\*Demanda) están explicando el 99,1% de la variabilidad mostrada en el costo total por unidad producida.

Las cuatro filas siguientes recogen los efectos principales, es decir, los efectos de los cuatro factores incluidos en el modelo: política lote de proceso, política lote de transferencia, nivel de demanda y mezcla. Los niveles críticos (Sig.) para estos cuatro factores ( $p=0,000 < 0,05$ ) proporcionan una evidencia en contra de la hipótesis nula; es decir, los efectos de la política lote de proceso, política lote de transferencia, nivel de demanda y mezcla en el costo total por unidad producida son significativos con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, el costo total por unidad producida varía cuando se utilizan diferentes tamaños de lote de proceso, tamaños de lote de transferencia, niveles de demanda y mezclas de productos.

Analizando el estadístico F obtenido en la tabla 18 para los efectos del factor política lote de transferencia (644932,5), política lote de proceso (35585,4), nivel de demanda (366,5) y mezcla (179,4), se puede observar que, como el estadístico asociado con la política de lote de transferencia es mayor que los demás, la implementación de una política de fraccionamiento de lote de transferencia contribuye más a la variabilidad de los datos que los demás factores; seguido por la política de lote de proceso, el nivel de demanda considerado y la mezcla de producto.

En conclusión, es posible reducir el costo total por unidad producida mediante la selección de un tamaño de lote de transferencia y lote de proceso adecuado para cada nivel de demanda dentro de un sistema productivo. Las filas 7, 8, 9 y 10 contienen información sobre el efecto de la interacción entre los factores considerados. El estadístico F correspondiente al efecto de la interacción entre los factores política lote de transferencia-Demanda y los factores política lote de proceso-política lote de transferencia-Demanda llevan asociado un nivel crítico

mayor a 0,05 (0,11 y 0,99 respectivamente), lo cual indica que la interacción entre estos factores no posee un efecto significativo sobre el costo total por unidad producida.

Ahora bien, el nivel crítico asociado con el estadístico F correspondiente al efecto de la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de proceso-política lote de transferencia es menor a 0,05 (0,000 y 0,000), indicando que estas interacciones poseen un efecto significativo sobre el costo total por unidad producida; es decir, las diferencias que se dan en los costos totales entre las diferentes políticas de lote de proceso no son las mismas entre los tres niveles de demanda considerados; y las diferencias que se dan en la variable de respuesta entre las diferentes políticas de lote de transferencia no son las mismas entre las tres políticas de lote de proceso consideradas en la presente investigación.

Como ayuda para interpretar los resultados del experimento, se construyeron gráficos de perfil para las respuestas promedios para cada combinación de los tratamientos, los cuales se muestran en las figuras 16 y 17.

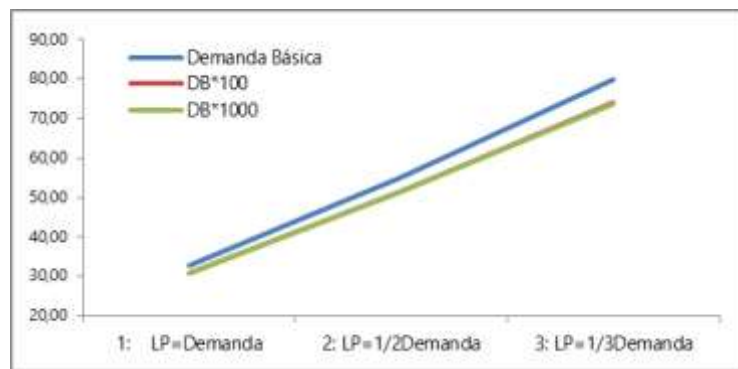


Figura 16. Gráfico de perfil Costo Total Promedio: Lote de proceso/Demanda

Las líneas de las Figuras 16 y 17 muestran el significado de la interacción. Como las rectas no son completamente paralelas, la interacción es significativa, lo cual, es consecuente con los resultados del análisis de varianza.

Cuando analizamos la Figura 16, se puede concluir que a través de todos los niveles de demanda se consigue el menor costo total por unidad producida cuando el lote de proceso es igual a la demanda; es decir, cuando no se considera una estrategia de división de lotes; y a medida que se considera la división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño el costo total por unidad producida empieza a aumentar, con mayor velocidad en los sistemas de manufactura donde se cuenta con una demanda pequeña en comparación con sistemas con demandas mucho más grandes.

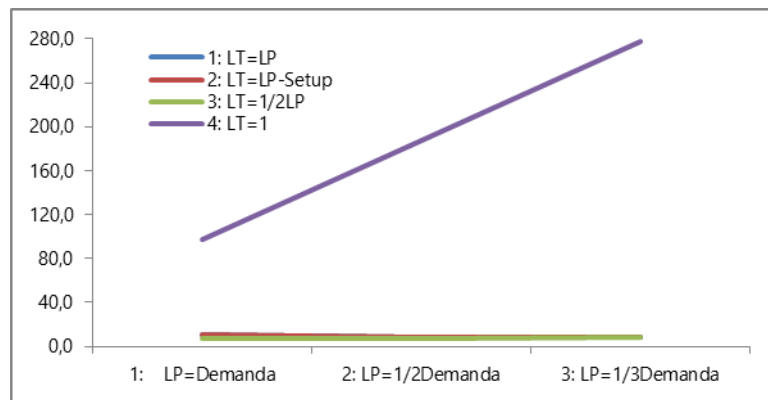


Figura 17. Gráfico de perfil Costo Total Promedio: Lote de proceso/Lote de transferencia

Analizando ahora la Figura 17, se observa que el menor costo total por unidad producida generado al variar la política de lote de proceso depende de la política de lote de transferencia que se esté evaluando. Cuando se considera las tres primeras políticas de lote de transferencia

(igual al lote de proceso adelantando o no el tiempo de alistamiento de la máquina siguiente e igual a la mitad del lote de proceso), el menor costo por unidad producida se genera cuando se considera una política de lote de proceso igual a la mitad parte de la demanda; pero cuando se considera una política de lote de transferencia unitario el menor costo por unidad producida se genera cuando no se considera la división de la demanda en lotes de proceso.

Para comprobar que las conclusiones del análisis de la varianza son válidas, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad en el Anexo L.

**5.2.3. Efectos simples y comparaciones múltiples.** Como la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de proceso-política lote de transferencia resultó significativa, se realizaron análisis de efectos simples y contrastes particulares de medias.

*Efectos simples:* El análisis de efectos simples para el “costo total por unidad producida” se obtuvo mediante el mismo procedimiento utilizado con la variable “mean flow time”. Las tablas 27 y 28 muestran los resultados obtenidos con el análisis de efectos de simples para evaluar la interacción entre los factores política lote de proceso-Demanda y política lote de proceso-política lote de transferencia respectivamente, incluyendo el valor F y el nivel de significancia en cada nivel de demanda/política de lote de transferencia.

Los resultados obtenidos para las interacciones entre el factor política lote de proceso y demanda; y política lote de proceso y política lote de transferencia ( $p=0,000 < 0,05$ ) sugieren que

existe una diferencia significativa entre los niveles de la política de lote de proceso en el nivel de demanda básica y los niveles de demanda aumentada; y que existe una diferencia significativa entre los niveles de la política de lote de proceso a través de los niveles de la política lote de transferencia.

**Tabla 27.** *Análisis de efectos simples Costo Total por unidad: Loteprocreso/Demanda*

Demanda		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Demanda básica	Contrast	13404,767	2	6702,383	10071,830	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		
Demanda basicax100	Contrast	11134,700	2	5567,350	8366,188	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		
Demanda basicax1000	Contrast	11117,063	2	5558,531	8352,937	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		

Each F tests the simple effects of loteprocreso within each level combination of the other effects shown. These tests are based on the linearly independent pairwise comparisons among the estimated marginal means.

**Tabla 28.** *Análisis efectos simples Costo Total por unidad Loteprocreso/transferencia*

lotetransferencia		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1/2LP	Contrast	4,265	2	2,132	3,204	<b>,046</b>
	Error	47,913	72	,665		
LP	Contrast	28,154	2	14,077	21,154	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		
LP- Setup	Contrast	24,341	2	12,171	18,289	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		
Unitario	Contrast	147211,321	2	73605,660	110608,969	<b>,000</b>
	Error	47,913	72	,665		

Each F tests the simple effects of loteprocreso within each level combination of the other effects shown. These tests are based on the linearly independent pairwise comparisons among the estimated marginal means.

Como los estadísticos F correspondientes a los efectos simples son significativos, se sabe que existen diferencias entre las políticas de operación, pero no se sabe dónde se encuentran, es decir, no se conoce en concreto que políticas difieren de las demás en cada uno de los niveles de

demanda/política lote de transferencia. Una interpretación correcta del efecto de la interacción exige utilizar comparaciones múltiples para comparar las medias individuales de cada una de las políticas de operación en cada nivel de demanda, y así descubrir diferencias específicas.

*Comparaciones múltiples:* Las comparaciones múltiples se aplicaron a las medias del factor política lote de proceso fijando cada uno de los tres niveles de demanda investigados y cada una de las cuatro políticas de lote de transferencia investigados. Las tablas 29 y 30, muestran el resumen del resultado obtenido con las comparaciones múltiples basado en el procedimiento Sidak. Además el anexo M muestra las pruebas de Bonferroni y LSD. Puede observarse que se llega a las mismas conclusiones con los tres procedimientos.

*Interacción política lote de proceso-Demanda:* En la tabla 29 se puede observar que las comparaciones entre las diferentes políticas de lote de proceso a través de todos los niveles de demanda considerados difieren estadísticamente, es decir, el desempeño del sistema relacionado con los costos totales que incurre por la producción de los trabajos varía considerablemente entre las tres políticas de lote de proceso consideradas; obteniéndose el mejor desempeño cuando no se considera una política de fraccionamiento de la demanda en lotes de proceso.

Asimismo, se puede observar que en el nivel de demanda básica se presenta el mayor incremento en los costos totales por unidad al pasar de una política de lote de proceso igual a la demanda hacia una política de lote de proceso igual a la tercera parte de la demanda; y que el impacto ocasionado sobre los costos totales al variar entre las tres políticas de lote de proceso en los niveles de demanda aumentada son muy similares.

Interacción política lote de proceso-política lote de transferencia: Al observar la Tabla 31, las comparaciones obtenidas entre las diferentes políticas de lote de proceso cuando se considera un lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando o no la preparación de la máquina siguiente, se puede concluir que pasar de una política de lote de proceso igual a la demanda hacia políticas de lote de proceso de menor tamaño generan una reducción estadísticamente significativa sobre los costos totales por unidad incurridos por el sistema.

**Tabla 29.** Comparaciones múltiples Costos Totales: Lote proceso /Demanda

Demanda	(I) lote proceso	(J) lote proceso	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. <sup>a</sup>	95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup>	
						Lower Bound	Upper Bound
Demanda basica	1/2Demanda	1/3Demanda	-24,735*	,333	,000	-25,549	-23,921
		Demanda	22,514*	,333	,000	21,700	23,328
	1/3Demanda	1/2Demanda	24,735*	,333	,000	23,921	25,549
		Demanda	47,249*	,333	,000	46,435	48,063
Demanda basicax100	Demanda	1/2Demanda	-22,514*	,333	,000	-23,328	-21,700
		1/3Demanda	-47,249*	,333	,000	-48,063	-46,435
	1/2Demanda	1/3Demanda	-22,289*	,333	,000	-23,103	-21,475
		Demanda	20,781*	,333	,000	19,967	21,595
Demanda basicax1000	1/3Demanda	1/2Demanda	22,289*	,333	,000	21,475	23,103
		Demanda	43,070*	,333	,000	42,256	43,884
	Demanda	1/2Demanda	-20,781*	,333	,000	-21,595	-19,967
		1/3Demanda	-43,070*	,333	,000	-43,884	-42,256
Demanda basicax1000	1/2Demanda	1/3Demanda	-22,273*	,333	,000	-23,087	-21,459
		Demanda	20,763*	,333	,000	19,948	21,577
	1/3Demanda	1/2Demanda	22,273*	,333	,000	21,459	23,087
		Demanda	43,036*	,333	,000	42,222	43,850
Demanda	1/2Demanda	-20,763*	,333	,000	-21,577	-19,948	
	1/3Demanda	-43,036*	,333	,000	-43,850	-42,222	

Based on estimated marginal means

\*. The mean difference is significant at the 0,05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Sidak.

Ahora bien, cuando el sistema cuenta con una estrategia de división de los lotes de proceso en dos lotes de transferencia de igual tamaño (tercera política), dividir la demanda en

lotes de proceso de menor tamaño no genera una reducción o aumento significativo sobre los costos totales por unidad incurridos por el sistema; por otra parte, cuando el sistema cuenta con una política de transferencia del lote de proceso de en unidad en unidad (cuarta política), dividir la demanda en lotes de proceso de menor tamaño genera un aumento significativo sobre los costos totales por unidad incurridos por el sistema.

**Tabla 30.** Comparaciones múltiples Costos Totales: Lote proceso /transferencia

lotetransferenci a	(I) loteproceto	(J) loteproceto	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. <sup>a</sup>	95% Confidence Interval for Difference <sup>a</sup>	
						Lower Bound	Upper Bound
LP	1/2Demand a	1/3Demanda	-,353	,385	,739	-1,293	,587
		Demanda	-2,321*	,385	,000	-3,261	-1,381
	1/3Demand a	1/2Demanda	,353	,385	,739	-,587	1,293
		Demanda	-1,968*	,385	,000	-2,908	-1,028
		1/2Demanda	2,321*	,385	,000	1,381	3,261
	1/3Demanda	1,968*	,385	,000	1,028	2,908	
LP- Setup a	1/2Demand a	1/3Demanda	-,430	,385	,606	-1,370	,510
		Demanda	-2,194*	,385	,000	-3,134	-1,254
	1/3Demand a	1/2Demanda	,430	,385	,606	-,510	1,370
		Demanda	-1,764*	,385	,000	-2,704	-,824
		1/2Demanda	2,194*	,385	,000	1,254	3,134
	1/3Demanda	1,764*	,385	,000	,824	2,704	
1/2LP	1/2Demand a	1/3Demanda	-,947*	,385	,048	-1,887	-,007
		Demanda	-,277	,385	,855	-1,217	,663
	1/3Demand a	1/2Demanda	,947*	,385	,048	,007	1,887
		Demanda	,670	,385	,236	-,270	1,610
		1/2Demanda	,277	,385	,855	-,663	1,217
	1/3Demanda	-,670	,385	,236	-1,610	,270	
Unitario	1/2Demand a	1/3Demanda	-90,667*	,385	,000	-91,607	-89,727
		Demanda	90,202*	,385	,000	89,262	91,142
	1/3Demand a	1/2Demanda	90,667*	,385	,000	89,727	91,607
		Demanda	180,869*	,385	,000	179,929	181,809
		1/2Demanda	-90,202*	,385	,000	-91,142	-89,262
	1/3Demanda	-180,869*	,385	,000	-181,809	-179,929	

Based on estimated marginal means

\*. The mean difference is significant at the 0,05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Sidak.

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que una estrategia de lote fraccionamiento de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, sólo genera una mejora en el desempeño del sistema (reducción de los costos totales) cuando el sistema no cuenta con una política de fraccionamiento del lote de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño o cuando el sistema considera la estrategia de adelantar el alistamiento de la máquina siguiente cuando no ha terminado aún la producción del lote completo en la máquina precedente; por otra parte, considerar la estrategia del fraccionamiento de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, cuando el sistema cuenta con una política de fraccionamiento del lote de proceso en lotes de transferencia unitarios genera un deterioro en el desempeño del sistema (aumento de los costos totales).

Con los hallazgos anteriores se estableció qué par de políticas ya sea de lote de proceso o lote de transferencia son estadísticamente diferentes en cada nivel de demanda, pero, resulta interesante investigar en qué nivel de demanda la combinación entre la política de lote de proceso y la política de lote de transferencia genera la diferencia más significativa sobre el valor del costo total por unidad producida respecto a una política que no considera la división de lotes dentro del sistema.

Por eso, con base en los costos totales por unidad de las 3 mezclas en cada política de operación y nivel de demanda, se calculó un intervalo de confianza del 95% para estimar los porcentajes de cambio de la variable de desempeño en los pares de políticas que reportaron diferencias significativas con la prueba de Sidak.

La tabla 31 muestra los resultados obtenidos. No se consideró el cambio en las políticas de lote de proceso a través de aquellos casos que considera una política de lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso debido a que la diferencia en dichos casos no es estadísticamente significativa.

**Tabla 31.** *Intervalos de confianza Reducción de Costos Totales*

Demanda	Politica Lote de Proceso	Politica Lote de Transferencia	Límite Inferior	Límite Superior	Reducción Costos Totales	
Demanda Básica	1: LP=Demanda	1: LP=Demanda	2: LT=LP-Setup	4%	6%	5%
		LT=LP	3: LT=1/2LP	22%	28%	25%
			4: LT=1	-688%	-696%	-692%
		2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	8%	9%	8%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	11%	16%	13%
			4: LT=1	-631%	-736%	-683%
Demanda Básicax 100	1: LP=Demanda	3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	-7%	-7%	-7%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	-2%	-3%	-3%
			4: LT=1	-696%	-703%	-699%
		1: LP=Demanda	2: LT=LP-Setup	0%	0%	0%
		LT=LP	3: LT=1/2LP	27%	38%	32%
			4: LT=1	-762%	-963%	-863%
Demanda Básicax 1000	1: LP=Demanda	2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	26%	33%	29%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	22%	38%	29%
			4: LT=1	-737%	-931%	-833%
		3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	30%	38%	34%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	25%	44%	34%
			4: LT=1	-730%	0%	-829%
Demanda Básicax 1000	1: LP=Demanda	1: LP=Demanda	2: LT=LP-Setup	0%	0%	0%
		LT=LP	3: LT=1/2LP	29%	36%	32%
			4: LT=1	-859%	-870%	-865%
		2: LP=1/2Demanda	1: LT=LP	26%	33%	30%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	22%	38%	30%
			4: LT=1	-738%	-933%	-835%
Demanda Básicax 1000	1: LP=Demanda	3: LP=1/3Demanda	1: LT=LP	30%	38%	34%
		LT=LP	2: LT=LP-Setup	25%	44%	34%
			4: LT=1	-730%	-932%	-830%

Al analizar los porcentajes de reducción/incremento obtenidos sobre la variable “costos totales por unidad producida” respecto a una política que no considera el fraccionamiento de lotes, se puede concluir que:

Para un sistema de manufactura tipo “Job Shop” similar al analizado en la presente investigación con un nivel de demanda relativamente pequeño, la estrategia que permite la mayor reducción en el costo total por unidad producida; es aquella que no considera la división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño; pero si permite la división del lote de proceso en dos lotes de transferencia de igual tamaño. Por otra parte, la estrategia que muestra el mayor incremento sobre el costo total por unidad producida es aquella que considera la división de la demanda en tres lotes de proceso de igual tamaño y permite la división del lote de proceso en lotes de transferencia unitarios.

Ahora bien, para un sistema de demanda mediana y grande (básicax100 y básicax1000), la estrategia que permite la mayor reducción en el costo total por unidad; es aquella que considera la división de la demanda en tres lotes de proceso de igual tamaño y permite adelantar el tiempo de alistamiento en la máquina siguiente antes de que se termine la producción del lote de proceso en la máquina precedente. Sin embargo, la estrategia que muestra el mayor incremento sobre el costo total por unidad producida es aquella que considera la división de la demanda en tres lotes de proceso de igual tamaño y permite la división de dicho lote de proceso en lotes de transferencia unitario.

Asimismo, se puede observar que considerar una política de tamaño de lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando la preparación de las máquinas sin una estrategia de división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, sólo muestra una reducción en los sistemas expuestos a demandas pequeñas; comportamiento influenciado por la mayor importancia en los tiempos de preparación sobre el tiempo de procesamiento en este tipo

de demandas. Dicha reducción en el tiempo de flujo por adelantar la preparación de las máquinas permite que el inventario de producto en proceso permanezca menos tiempo dentro del sistema, por ende se incurre en menos costos.

Ahora bien, para sistemas de manufactura expuestos a demandas de mayor tamaño (demanda básica x100 y x1000); utilizar una política de tamaño de lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando la preparación de las máquinas sólo genera una reducción en los costos totales si se divide la demanda en lotes de proceso de menor tamaño (32% de reducción Vs 0% de reducción).

Por último, analizando la tabla se observa que en promedio la utilización de políticas de fraccionamiento de lotes de proceso y lotes de transferencia (sin incluir la política de lote de transferencia unitario) generan una mayor reducción en el costo total por unidad producida en sistemas de manufactura con grandes demandas (25% de reducción) que en sistemas de manufactura con demandas pequeñas (7% de reducción) influenciado por la reducción de los costos por inventario de producto en proceso. Sin embargo, al utilizar una política de lote de transferencia unitario; los sistemas de demandas pequeñas muestran un menor incremento (690% de incremento) en los costos incurridos que los sistemas expuestos a demandas de mayor tamaño (842%), debido a que la reducción obtenida en los costos de inventario de producto en proceso no compensa el mayor costo de transporte de piezas en el sistema a transportar de manera unitaria.

## 6. Conclusiones

La estrategia de fraccionamiento de lotes dentro de un sistema productivo tipo “Job Shop” similar al sistema productivo estudiado, si contribuye a mejorar el desempeño del sistema en términos de las medidas de eficacia consideradas: el “Mean Flow Time” y los Costos Totales; considerando como fraccionamiento tanto la división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, como la división de dichos lotes de proceso en lotes de transferencia de menor tamaño. En general, en todas las mezclas de productos y niveles de demanda considerados existe una estrategia de fraccionamiento de lotes que permite utilizar más eficientemente los recursos del sistema, disminuir los niveles de inventario, dinamizar el flujo de las piezas a través de los diferentes centros de trabajo y cumplir con las fechas de entrega; Sin embargo, la definición de la estrategia específica de fraccionamiento de lote que genere el mejor desempeño dentro del sistema productivo depende de dos criterios: el nivel de demanda al cual este expuesto el sistema productivo y la medida de eficacia que se busca optimizar.

El impacto ocasionado sobre las dos medidas de eficacia analizadas, al utilizar estrategias de fraccionamiento de lotes en comparación a la no utilización de lotes dentro del sistema no generan el mismo comportamiento a través de los tres niveles de demanda considerados. Es decir, en sistemas de manufactura expuestos a demandas pequeñas, se generan las menores impactos en el tiempo de flujo promedio del sistema y en el costo total por unidad producida cuando el sistema considera políticas de fraccionamiento de lotes; en comparación con sistemas de manufactura expuestos a grandes niveles de demanda, donde se presentan las mayores impactos en el tiempo promedio de flujo y en el costo total por unidad producida; lo que recalca

la importancia de determinar estrategias de fraccionamiento de lotes en sistemas expuestos a grandes niveles de demanda.

Cuando se evalúan estrategias de fraccionamiento de loteo en función del tiempo (mean flow time) como medida de desempeño, independientemente de los costos en los cuales incurriría el sistema con dicha estrategia; utilizar una estrategia de no fraccionamiento de lotes siempre genera el mayor tiempo promedio de flujo en el sistema, es decir, ocasiona que las piezas permanezcan un mayor tiempo dentro del sistema. En contraste, la utilización de lotes de transferencia unitarios independientemente del nivel de demanda al cual este expuesto el sistema productivo siempre genera un menor tiempo de flujo en el sistema; pero la utilización de lotes de proceso dependerá del nivel de demanda al cual este expuesto el sistema; para niveles de demanda pequeñas/medianas la mejor estrategia es la utilización de lotes de proceso iguales a la mitad de la demanda (maximizándose con la utilización de lotes de transferencia unitarios) y para niveles de demanda grandes, la mejor estrategia es la utilización de lotes de proceso iguales a la tercera parte de la demanda (maximizándose con la utilización de lotes de transferencia unitarios).

Cuando se busca una estrategia de fraccionamiento de lotes que genere el mejor desempeño en términos de costos (costos totales por unidad producida), se observa que dicha estrategia dependerá del nivel de demanda al que se encuentre expuesto el sistema de manufactura. Para un sistema de manufactura tipo “Job Shop” similar al analizado en la presente investigación con un nivel de demanda relativamente pequeño, la estrategia que permite la mayor reducción en el costo total por unidad producida; es aquella que no considera la división de la

demanda en lotes de proceso de menor tamaño, pero si permite la división del lote de proceso en dos lotes de transferencia de igual tamaño; pero para sistemas con demanda mediana o grande (básicax100 y basicax1000), la estrategia que permite la mayor reducción en el costo total por unidad; es aquella que considera la división de la demanda en tres lotes de proceso de igual tamaño y permite adelantar el tiempo de alistamiento en la máquina siguiente antes de que se termine la producción del lote de proceso en la máquina precedente.

Ahora bien, si en dichos sistemas expuestos a grandes demandas no se puede dividir la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, una estrategia de división del lote de proceso/demanda en lotes de transferencia de igual tamaño genera una buena alternativa para reducir los costos incurridos (90% de eficacia Vs la estrategia que permite la división de la demanda).

Considerar una política de tamaño de lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando la preparación de las máquinas sin una estrategia de división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño, sólo muestra una reducción en los sistemas expuestos a demandas pequeñas; comportamiento influenciado por la mayor importancia en los tiempos de preparación sobre el tiempo de procesamiento en este tipo de demandas. Dicha reducción en el tiempo de flujo por adelantar la preparación de las máquinas permite que el inventario de producto en proceso permanezca menos tiempo dentro del sistema, por ende se incurre en menos costos. Ahora bien, para sistemas de manufactura expuestos a demandas de mayor tamaño (demanda básica x100 y x1000); utilizar una política de tamaño de lote de transferencia igual al lote de proceso adelantando la preparación de las máquinas sólo genera una reducción en los costos

totales si se divide la demanda en lotes de proceso de menor tamaño (32% de reducción Vs 0% de reducción).

A pesar de que la estrategia de división del lote de proceso en lotes de transferencia unitarios genera la mayor reducción en el tiempo de flujo (maximizándose la reducción si se encuentra acompañada de una estrategia de división de la demanda en lotes de proceso de menor tamaño) para todos los niveles de demanda observada; la utilización de dicha estrategia ocasiona un incremento desproporcionado en los costos totales por unidad producida, incluso por encima de los escenarios en los cuales no se considera el fraccionamiento de lotes; debido a la explosión en el aumento de los costos de transporte unitario de piezas. De acuerdo a lo anterior, se recomienda la utilización de dicha estrategia cuando el costo unitario de transporte de lote es despreciable respecto a los costos de preparación de las máquinas y los costos por inventario de producto en proceso en sistemas de productivos expuestos a altos niveles de demanda.

## **7. Recomendaciones**

Sería interesante que en futuras investigaciones se analizará el problema de fraccionamiento de lotes considerando dentro del modelo los tiempos relacionados con el transporte de los lotes de transferencia dentro del sistema y la programación de lotes de proceso considerándose el tiempo de preparación entre las máquinas en función del tipo de lote siguiente y precedente en cada operación; puede ser que las reducciones observadas en las dos medidas de eficacia analizadas al considerar diferentes políticas de loteo dentro del sistema sean

significativamente diferentes a las mostradas en la presente investigación, al considerar los anteriores dos aspectos.

Asimismo, se recomienda que en futuras investigaciones se analice el impacto que tiene cada uno de los criterios de costos considerados dentro de la variable costos al utilizar diferentes políticas de fraccionamiento de lotes. En la presente investigación se consideró que todos los criterios relacionados con la variable costos tenían el mismo impacto sobre el sistema productivo y se analizó el impacto de diferentes políticas de fraccionamiento de lotes sobre la variable total “costos”; sin embargo, puede ser que el fraccionamiento de lotes genere un impacto distinto entre cada uno de los criterios de costos considerados.

### Referencias Bibliográficas

- Benjaafar, S., Sheikhzadeh, M. (1997). Scheduling policies, batch sizes, and manufacturing lead times. *Iie transactions*, 29, 159-166.
- Chinyao, L., Chih-Ming H. y Kay-I, A. (2004). Benefits of lot splitting in job-shop scheduling. *International Journal of Advance Manufacturer technology*, 24, 773-780.
- Chinyao, l y Yuling, Y. (2004). The impact of lot splitting in a single machine scheduling problem with Earliness – Tardiness Penalties. *Manufacturing systems and Technologies for the new frontier*. (7), 293-296.
- CHIU, H., CHANG, J. (2005). Cost models for lot streaming in a multistage flow shop. *The International Journal of Management Science*, 33, 435-450.
- Companys, P. y Corominas, A. (Ed.). (1996). Organización de la producción II: Dirección de Operaciones 4. Ediciones UPC
- Demeulemeester, E. y Heroelen, W. (1996). Modelling setup tiems, process batches and transfer batches using activity network logic. *Europen Journal of Operation Research*, 89, 355-365.
- Díez, E. (Ed.) (1982). Producción Industrial: modelos de secuencias. Sevilla: Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

- Drexl, A. y Kimms A. (1997). Lot sizing and scheduling: survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99, 221-235.
- Galeano, A. (2008). Estudio de las políticas de tamaño del lotes de transferencia en un sistema productivo tipo Flow Shop. Universidad Industrial, Bucaramanga, Colombia.
- Hopp, W. y Spearman, M. (Ed.). (2001) . *Factory Physics*. 2 ed. Mc Graw Hill.
- Hoque, M.A. y Goyal, S.K.. (2005). On lot streaming in multistage production systems. *International Journal of production Economics*, 95, 195-202.
- Huang, R. (2010). Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production. *International Journal of productions economics*, 124, 206-213.
- Jacobs, R. y Bragg, D. (1988). Repetitive lots: Flow-time reductions through sequencing and dynamic batch sizing. *Decision Sciences*, 19, 281-294.
- Karmakar, U. (1987). Lot sizes, lead times and In-process inventories. Graduate School of Management, University of Rochester
- Kropp, D. y Smunt, T. (1990). Optimal and Heuristic Models for Lot Splitting in a Flow Shop. *Decision Sciences*, 24 (4), 691-708
- Langevin, A y Riopel, D. (1999). Transfer Batch sizing in Flexible manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 18( 2), 140-151

LI, C.L y XIAO, W.Q. (2004). Lot Streaming with supplier-manufacturer coordination. *Naval Research Logistics*, 51, 522-542.

Low C., HSU, C., Huang, K. (2004). Benefits fo lot splitting in job-shop scheduling. *International of Advance Manufacturer Technology*, 24, 773-780.

Morton, T.W y Pentico, D.W. (1993). *Heuristic scheduling systems*. NY: John Wiley & Sons.

Niño, M. (2002). *Evaluación del sistema programación de operaciones DBR*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Pinedo, M. (Ed.) (1995). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. 2 ed. Prentice – hall.

SARIN, Subhash C. KALIR Adar A. CHEN Ming: A single-lot, unified cost-based flow shop lot-streaming problem. En: *International Journal of productions economics*. Vol 113 (2008). P;413-424.

Schroeder, R. (Ed.) (1992). *Administración de Operaciones*. 3ed. Mc Graw Hill.